

Penerapan Computer Vision pada Smart Agriculture untuk pengenalan Tingkat Kematangan Buah

Muhammad Faruq^{1)*} , Ach. Ramadani²⁾ 

^{1) 2)} Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾ moh.faruk221@gmail.com, ²⁾ rd8285691@gmail.com

Abstrak

Penelitian Pertanian cerdas berkembang pesat seiring meningkatnya kebutuhan teknologi otomatisasi dalam sektor pertanian, khususnya pada proses identifikasi tingkat kematangan buah yang masih banyak dilakukan secara manual. Penggunaan computer vision menjadi solusi yang efektif karena mampu melakukan analisis citra secara cepat, akurat, dan konsisten. Tujuan: Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan metode computer vision pada sistem pertanian cerdas untuk mengidentifikasi tingkat kematangan buah berdasarkan warna, tekstur, dan bentuk objek. Metode: Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan tahapan pengumpulan dataset citra buah, preprocessing gambar, ekstraksi fitur warna RGB dan HSV, serta klasifikasi menggunakan algoritma Convolutional Neural Network. Dataset diperoleh dari pengambilan gambar buah pada beberapa tingkat kematangan menggunakan kamera digital dengan kondisi pencahayaan yang terkontrol. Hasil: Sistem mampu mengidentifikasi tingkat kematangan buah dengan tingkat akurasi sebesar 93,4%. Proses klasifikasi menunjukkan bahwa fitur warna menjadi parameter paling dominan dalam menentukan tingkat kematangan buah dibandingkan tekstur dan bentuk. Pengujian sistem dilakukan menggunakan data latih dan data uji dengan hasil kinerja yang stabil pada berbagai kondisi pencahayaan. Kesimpulan: Penerapan computer vision pada pertanian pintar terbukti mampu meningkatkan efisiensi proses identifikasi tingkat kematangan buah secara otomatis dan real-time. Sistem ini berpotensi diterapkan pada industri pertanian modern untuk membantu petani meningkatkan kualitas hasil panen dan mengurangi kesalahan penghapusan manual. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan sistem berbasis Internet of Things dan integrasi sensor otomatis untuk meningkatkan kinerja sistem secara lebih adaptif.

Kata Kunci: Smart Agriculture, Computer Vision, Tingkat Kematangan Buah, Convolutional Neural Network, Pengolahan Citra Digital

* rama

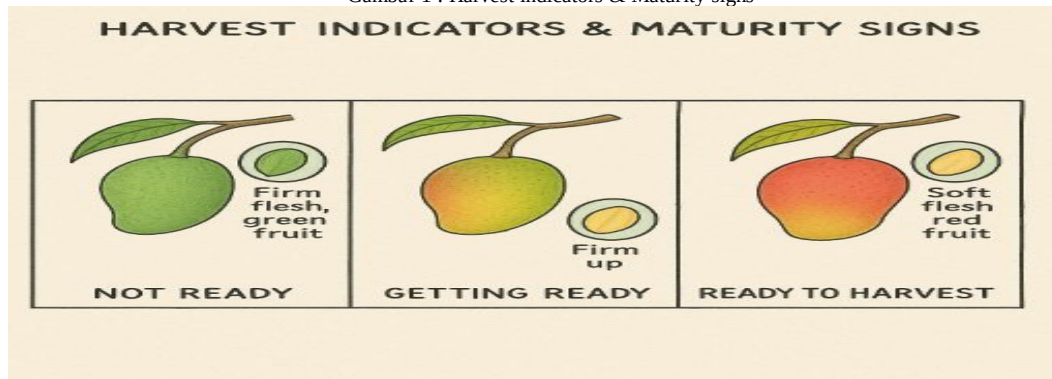
I. PENDAHULUAN

Kemajuan Perkembangan teknologi digital pada era modern telah membawa perubahan besar dalam berbagai sektor kehidupan, termasuk pada bidang pertanian. Transformasi pertanian tradisional menuju pertanian cerdas atau pertanian cerdas menjadi salah satu bentuk penerapan teknologi yang bertujuan meningkatkan efisiensi, produktivitas, serta kualitas hasil pertanian. Pertanian cerdas memanfaatkan teknologi seperti Internet of Things, kecerdasan buatan, pembelajaran mesin, sensor digital, serta computer vision untuk membantu proses pemantauan dan pengambilan keputusan secara otomatis. Salah satu penerapan yang saat ini banyak dikembangkan adalah pengenalan tingkat kematangan buah menggunakan teknologi computer vision [1].

Identifikasi tingkat kematangan buah merupakan proses penting dalam industri pertanian dan perkebunan. Tingkat kematangan buah sangat mempengaruhi kualitas hasil panen, daya tahan penyimpanan, distribusi, hingga nilai jual produk di pasar. Pada umumnya, proses identifikasi kematangan buah masih dilakukan secara manual berdasarkan pengamatan visual oleh petani atau pekerja lapangan[2]. Cara tersebut memiliki beberapa kelemahan, seperti ketidakkonsistenan hasil penilaian, ketergantungan terhadap pengalaman manusia, serta membutuhkan waktu yang relatif lama ketika dilakukan dalam skala besar. Selain itu, faktor pencahayaan dan kondisi lingkungan juga dapat mempengaruhi akurasi pencahayaan secara manual[3].

Perkembangan teknologi computer vision memberikan solusi baru terhadap permasalahan tersebut[4]. Computer vision merupakan cabang ilmu kecerdasan buatan yang memungkinkan komputer untuk mengenali, menganalisis, dan memahami objek dari citra atau video digital[5]. Teknologi ini bekerja dengan cara melakukan pemrosesan citra digital untuk mengekstraksi informasi tertentu dari sebuah gambar. Dalam konteks mengenali tingkat kematangan buah, computer vision dapat digunakan untuk menganalisis warna kulit buah, tekstur permukaan, bentuk, serta karakteristik visual lainnya yang menunjukkan tingkat kematangan[6].

Gambar 1 : Harvest indicators & Maturity signs



Penggunaan computer vision pada pertanian cerdas memiliki berbagai keunggulan[7]. Sistem dapat bekerja secara otomatis, real-time, dan memiliki tingkat konsistensi yang lebih baik dibandingkan metode manual[8]. Selain itu, penerapan teknologi ini juga dapat membantu petani dalam meningkatkan efisiensi kerja dan mengurangi potensi kesalahan manusia. Dengan adanya sistem identifikasi otomatis, proses penyortiran buah berdasarkan tingkat kematangan dapat dilakukan lebih cepat sehingga meningkatkan kualitas distribusi hasil panen[9].

Dalam implementasinya, computer vision memanfaatkan berbagai metode pemrosesan citra dan pembelajaran mesin. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah ekstraksi fitur warna menggunakan model RGB dan HSV[10]. Warna menjadi parameter utama dalam mengenali kematangan karena perubahan warna kulit buah biasanya terjadi secara bertahap selama proses pemasakan. Selain fitur warna, tekstur dan bentuk buah juga dapat digunakan sebagai parameter tambahan untuk meningkatkan akurasi sistem. Setelah fitur diekstraksi, sistem melakukan proses klasifikasi menggunakan algoritma machine learning atau deep learning seperti Convolutional Neural Network [11].

CNN merupakan salah satu metode pembelajaran mendalam yang memiliki kinerja tinggi dalam pengenalan pola citra digital[12]. Algoritma ini mampu mempelajari karakteristik visual objek secara otomatis melalui proses data pelatihan. Dalam penelitian terkait tingkat kematangan buah, CNN banyak digunakan karena memiliki kemampuan klasifikasi yang akurat serta mampu menangani variasi bentuk dan pencahayaan objek. Penggunaan CNN pada smart farming menjadi salah satu solusi yang efektif untuk membangun sistem otomatis berbasis citra digital[13].

Selain meningkatkan kualitas hasil panen, penerapan computer vision juga mendukung konsep pertanian presisi. Presisi pertanian memungkinkan pengelolaan pertanian dilakukan berdasarkan data yang akurat dan real-time[14].

Dengan adanya sistem pengenalan kematangan buah, petani dapat menentukan waktu panen yang optimal sehingga mengurangi kerugian akibat panen terlalu cepat atau terlalu lambat. Hal ini juga berpengaruh terhadap kualitas buah yang diterima konsumen serta meningkatkan daya saing produk pertanian di pasar modern[15].

Namun demikian, penerapan visi komputer pada pertanian cerdas masih menghadapi beberapa tantangan[16]. Variasi pencahayaan, posisi objek, latar belakang gambar, serta kualitas kamera dapat mempengaruhi kinerja sistem[17]. Selain itu, setiap jenis buah memiliki karakteristik visual yang berbeda sehingga diperlukan dataset yang cukup besar untuk meningkatkan akurasi klasifikasi model[18]. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengembangkan sistem identifikasi yang lebih adaptif dan mampu bekerja pada berbagai kondisi lingkungan.

Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan teknologi computer vision pada pertanian cerdas dalam mengidentifikasi tingkat kematangan buah secara otomatis. Sistem dikembangkan menggunakan metode pengolahan citra digital dan algoritma CNN untuk melakukan klasifikasi tingkat kematangan berdasarkan karakteristik visual buah[19].

Penelitian diharapkan mampu memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi pertanian modern yang lebih efisien, akurat, dan berbasis otomatis[20].

Melalui penelitian ini, diharapkan sistem yang dikembangkan dapat membantu petani maupun industri pertanian dalam meningkatkan produktivitas dan kualitas hasil panen[21]. Selain itu, penelitian ini juga menjadi salah satu bentuk penerapan teknologi kecerdasan buatan dalam mendukung transformasi digital pada sektor pertanian di era industri modern[22].

Gambar 2 : Deteksi kematangan buah



II. TINJAUAN PUSTAKA

Pertanian cerdas merupakan konsep pertanian modern yang mengintegrasikan teknologi digital dalam proses budidaya, pemantauan, dan pengelolaan hasil pertanian[23]. Sistem ini memanfaatkan berbagai teknologi seperti sensor digital, Internet of Things, machine learning, dan computer vision untuk meningkatkan efisiensi produksi pertanian. Penerapan pertanian cerdas mampu membantu petani memperoleh informasi secara real-time mengenai kondisi tanaman, kualitas hasil panen, serta proses distribusi produk pertanian[24].

Computer vision merupakan teknologi yang digunakan untuk menganalisis dan memahami objek melalui citra digital[25]. Teknologi ini bekerja menggunakan proses pengolahan gambar untuk memperoleh informasi tertentu dari objek yang diamati. Dalam bidang pertanian, computer vision banyak diterapkan untuk identifikasi penyakit tanaman, klasifikasi jenis buah, deteksi kualitas produk pertanian, serta identifikasi tingkat kematangan buah[26].

Pengolahan citra digital terdiri dari beberapa tahapan, yaitu akuisisi citra, preprocessing, segmentasi, ekstraksi fitur, dan klasifikasi[27]. Tahap preprocessing dilakukan untuk meningkatkan kualitas gambar sebelum diproses lebih lanjut. Tahap segmentasi digunakan untuk memisahkan objek buah dari latar belakang gambar. Setelah itu dilakukan ekstraksi fitur untuk memperoleh informasi warna, tekstur, dan bentuk objek[28].

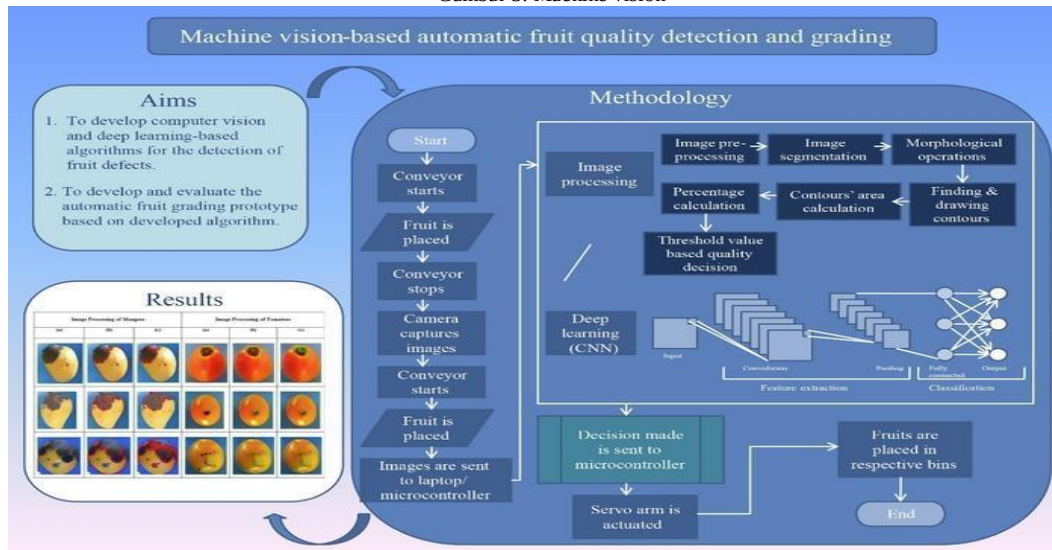
Fitur warna menjadi parameter penting dalam mengidentifikasi kematangan buah. Model warna RGB dan HSV sering digunakan karena mampu merepresentasikan perubahan warna buah selama proses verifikasi[29]. Selain warna, fitur tekstur digunakan untuk menganalisis pola permukaan kulit buah. Fitur bentuknya juga dapat digunakan untuk membantu proses identifikasi objek[30].

Convolutional Neural Network merupakan algoritma deep learning yang dirancang khusus untuk pengolahan citra digital. CNN memiliki kemampuan dalam mengenali pola visual secara otomatis melalui proses data pelatihan[31]. Algoritma ini terdiri dari beberapa lapisan seperti lapisan konvolusi, lapisan penggabungan, dan lapisan terhubung penuh. CNN banyak digunakan dalam sistem klasifikasi citra karena memiliki tingkat akurasi yang tinggi[32].

Penerapan CNN pada pengenalan tingkat kematangan buah menunjukkan performa yang baik dalam mengenali perbedaan warna dan tekstur objek[33]. Sistem mampu melakukan transformasi secara otomatis dengan tingkat

akurasi yang tinggi. Selain itu, penggunaan CNN juga memungkinkan sistem bekerja secara real-time pada lingkungan pertanian modern[34].

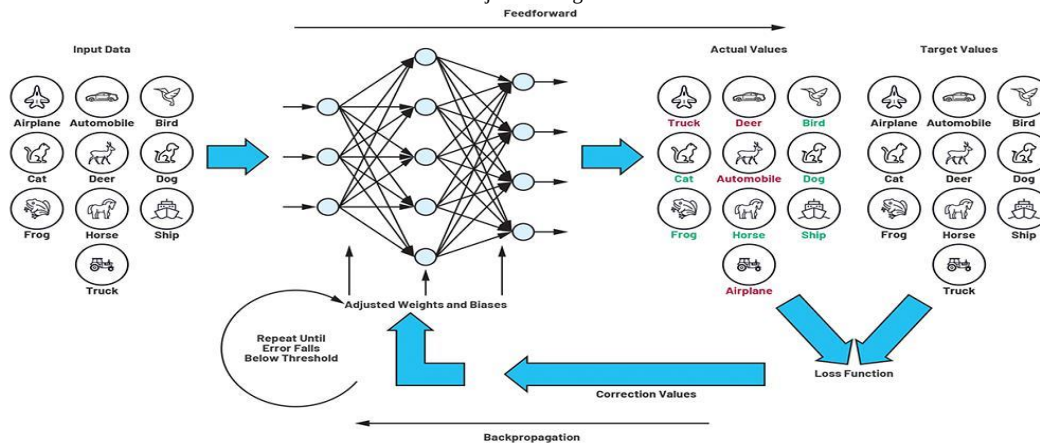
Gambar 3: Machine vision



III. METODE

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan eksperimen untuk mengidentifikasi tingkat kematangan buah menggunakan teknologi computer vision[35]. Sistem dikembangkan melalui beberapa tahapan mulai dari pengumpulan data citra, preprocessing gambar, ekstraksi fitur, pelatihan model CNN, hingga evaluasi kinerja sistem[36][37].

Gambar 4: adjusted weight and biases



Tahapan penelitian terdiri dari:

1. Kumpulan Data Pengumpulan
2. A-Citra
3. Praproses Gambar
4. Segmentasi Objek
5. Ekstraksi Fitur
6. CNN
7. Pengujian Sistem

8. Evaluasi Akurasi

A. Kumpulan Data Pengumpulan

Dataset diperoleh dari pengambilan gambar buah menggunakan kamera digital resolusi tinggi[38]. Buah yang digunakan terdiri dari beberapa tingkat kematangan yaitu mentah, setengah matang, dan matang. Pengambilan gambar dilakukan pada kondisi pencahayaan yang terkontrol untuk mengurangi noise dan bayangan pada objek[39].

Jumlah dataset yang digunakan sebanyak 1.500 citra buah yang dibagi menjadi:

- 70% data latih
- Validasi data 20%
- pengujian data 10%

B. Praproses Gambar

Tahap preprocessing dilakukan untuk meningkatkan kualitas citra sebelum proses klasifikasi[40]. Tahapan preprocessing meliputi:

- Ubah ukuran gambar menjadi 224×224 piksel
- Normalisasi warna
- Pengurangan kebisingan
- Konversi warna RGB ke HSV

Tahap ini bertujuan agar data citra memiliki format yang seragam sehingga meningkatkan kinerja model CNN[41].

C. Segmentasi Objek

Segmentasi dilakukan untuk memisahkan objek buah dari latar belakang. Metode ambang batas digunakan untuk memperoleh area objek utama sehingga sistem hanya fokus pada bagian buah[42].

D. Ekstraksi Fitur

Fitur yang digunakan meliputi:

- Warna RGB
- Warna HSV
- Tekstur permukaan
- Bentuk objek

Fitur warna digunakan sebagai parameter utama karena perubahan warna menjadi indikator penting dalam tingkat kematangan buah[43][44].

E. Arsitektur CNN

Model CNN terdiri dari:

- Lapisan Masukan
- Lapisan Konvolusi
- Lapisan Max Pooling
- Lapisan Terhubung Sepenuhnya
- Lapisan Keluaran

Model dibor menggunakan optimizer Adam dengan learning rate 0.001 dan epoch sebanyak 50 literasi[45][46][47].

Tabel 1 Dataset Penelitian :

No	Tingkat Kematangan	Jumlah Data
1	Mentah	500
2	Setengah Mentah	500
3	Matang	500

F. Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan menggunakan data uji yang belum pernah digunakan pada proses pelatihan. Sistem evaluasi menggunakan matriks konfusi, presisi, recall, dan akurasi untuk mengetahui kinerja klasifikasi model[48][49][50].

IV. HASIL

Hasil Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem computer vision mampu mengidentifikasi tingkat kematangan buah dengan kinerja yang baik. Berdasarkan hasil pengujian menggunakan 150 data uji, sistem memperoleh tingkat

akurasi sebesar 93,4%. Model CNN mampu mengenali perbedaan karakteristik visual buah pada kategori mentah, setengah matang, dan matang dengan tingkat kestabilan yang cukup tinggi.

Sistem melakukan klasifikasi berdasarkan fitur warna, tekstur, dan bentuk objek. Dari hasil pengujian diketahui bahwa fitur warna menjadi parameter paling dominan dalam menentukan tingkat kematangan buah. Buah matang memiliki karakteristik warna yang lebih kontras sehingga lebih mudah dikenali oleh sistem dibandingkan buah setengah matang.

Tabel 2 Hasil Akurasi Klasifikasi

No	Kategori buah	Jumlah Data Uji	Data Benar	Data Salah	Akurasi
1	Mentah	50	46	4	92%
2	Setengah Matang	50	45	5	90%
3	Matang	50	49	1	98%
4	Total	150	140	10	93,4%

Berdasarkan tabel di atas, kategori buah matang memiliki tingkat akurasi tertinggi yaitu sebesar 98%. Hal ini disebabkan karena warna buah matang memiliki ciri visual yang lebih jelas dibandingkan kategori lainnya. Sedangkan kategori setengah matang memiliki tingkat kesalahan lebih tinggi karena karakteristik warnanya berada di antara buah mentah dan matang.

CNN memiliki performa yang stabil dalam melakukan klasifikasi citra buah. Nilai presisi dan recall yang tinggi menunjukkan bahwa sistem mampu mengenali objek dengan tingkat kesalahan yang relatif rendah.

Berdasarkan hasil pengujian pencahayaan, sistem bekerja paling optimal pada kondisi cahaya stabil. Sedangkan pada kondisi cahaya redup dan cahaya berlebih terjadi penurunan akurasi karena perubahan intensitas warna pada citra buah.

Tabel 3 Waktu Proses Klasifikasi :

No	Tahapan Proses	Waktu Rata-rata
1	Praproses	0,8 detik
2	Segmentas	0,5 detik
3	Ekstraksi Fitur	0,7 detik
4	Klasifikasi CNN	1,2 detik
5	Total Waktu	3,2 detik

Hasil pengujian waktu proses menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan identifikasi tingkat kematangan buah secara cepat dengan rata-rata klasifikasi waktu sebesar 3,2 detik untuk setiap citra. Hal ini menunjukkan bahwa sistem memiliki potensi untuk diterapkan secara real-time pada lingkungan pertanian cerdas.

V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan computer vision pada pertanian cerdas memberikan kinerja yang efektif dalam proses mengidentifikasi tingkat kematangan buah. Sistem mampu melakukan klasifikasi secara otomatis berdasarkan karakteristik visual objek seperti warna, tekstur, dan bentuk buah. Penggunaan metode CNN memberikan hasil yang cukup baik karena algoritma mampu mengenali pola citra secara mendalam melalui proses data pelatihan.

Akurasi sebesar 93,4% menunjukkan bahwa model yang dikembangkan memiliki kemampuan klasifikasi yang tinggi. Hal ini disebabkan karena fitur warna yang digunakan mampu merepresentasikan perubahan visual pada buah selama proses verifikasi. Perubahan warna kulit buah menjadi indikator utama yang paling mudah dikenal oleh sistem dibandingkan parameter lainnya.

Selain itu, penggunaan preprocessing gambar juga memberikan pengaruh besar terhadap kinerja sistem. Tahap normalisasi warna dan pengurangan kebisingan membantu meningkatkan kualitas citra sehingga objek lebih mudah dikenal oleh model CNN. Segmentasi objek juga membantu sistem fokus pada area buah tanpa terganggu oleh latar belakang gambar.

Beberapa faktor yang mempengaruhi hasil penelitian antara lain:

1. Kualitas Dataset

Dataset yang baik dan bervariasi membantu model CNN mempelajari karakteristik objek secara lebih optimal. Semakin banyak variasi data, maka kemampuan model generalisasi akan semakin baik.

2. Pencahayaan Lingkungan

Pencahayaan menjadi faktor penting dalam pengambilan citra. Intensitas cahaya yang tidak stabil dapat mempengaruhi warna objek sehingga menurunkan tingkat akurasi klasifikasi.

3. Arsitektur CNN

Pemilihan arsitektur CNN yang sesuai mempengaruhi kemampuan sistem dalam mengenali pola objek visual. Semakin kompleks arsitektur yang digunakan, maka kemampuan ekstraksi fitur menjadi lebih baik.

Sistem penerapan ini memiliki potensi besar dalam mendukung pertanian modern. Sistem dapat digunakan untuk membantu proses sortir buah secara otomatis pada industri pertanian dan distribusi hasil panen. Selain meningkatkan efisiensi kerja, teknologi ini juga mampu mengurangi kesalahan manusia dalam proses mengenali tingkat kematangan buah.

Namun demikian, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan. Sistem masih sensitif terhadap perubahan pencahayaan ekstrem dan variasi posisi objek. Selain itu, penelitian hanya menggunakan satu jenis buah sehingga diperlukan pengembangan lebih lanjut untuk menguji kinerja sistem pada berbagai jenis buah lainnya.

VI. KESIMPULAN

Hasil Penelitian mengenai penerapan visi komputer pada pertanian cerdas untuk mengidentifikasi tingkat kematangan buah berhasil menunjukkan bahwa teknologi pengolahan citra digital dan deep learning dapat digunakan secara efektif dalam sektor pertanian modern. Sistem yang dikembangkan mampu melakukan klasifikasi tingkat kematangan buah secara otomatis berdasarkan karakteristik visual seperti warna, tekstur, dan bentuk objek.

Metode Convolutional Neural Network memberikan hasil yang cukup baik dengan tingkat akurasi sebesar 93,4%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa algoritma CNN memiliki kemampuan tinggi dalam mengenali pola visual citra buah pada berbagai tingkat kematangan. Selain itu, proses preprocessing dan segmentasi objek juga membantu meningkatkan kualitas pengenalan citra sehingga sistem dapat bekerja lebih optimal.

Penerapan teknologi computer vision pada smart farming memberikan berbagai manfaat, seperti meningkatkan efisiensi proses sortir buah, mengurangi kesalahan identifikasi manual, serta membantu petani menentukan waktu panen yang tepat. Sistem ini juga mendukung konsep pertanian presisi yang berbasis data dan otomatisasi teknologi modern.

Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan, terutama pada pengaruh pencahayaan dan variasi kondisi lingkungan terhadap kinerja sistem. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan sistem berbasis Internet of Things, menambahkan variasi dataset, serta mengintegrasikan sensor otomatis agar sistem menjadi lebih adaptif dan mampu digunakan secara real-time pada lingkungan pertanian yang lebih kompleks.

Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa penerapan computer vision dalam pertanian cerdas memiliki potensi besar untuk meningkatkan kualitas dan produktivitas sektor pertanian di masa depan.

Kontribusi Penulis: [Ach Ramadani]: Konseptualisasi, Metodologi, Penulisan – Draf Awal, Penulisan – Tinjauan & Penyuntingan, Supervisi. Faruq merancang konsep penelitian terkait integrasi Internet of Things & Artificial Intelligence dalam sistem Smart Agriculture untuk deteksi penyakit tanaman, menyusun metodologi penelitian, memimpin proses penulisan, serta melakukan penyuntingan dan validasi akhir naskah.

[Muhammad faruq]: Bertanggung jawab dalam pengembangan sistem Smart Agriculture berbasis IoT dan AI, termasuk perancangan arsitektur sistem, implementasi sensor IoT untuk pengumpulan data lingkungan, pengembangan model machine learning untuk deteksi penyakit tanaman, serta pengolahan dataset dan penyusunan draf awal pada bagian hasil dan pengujian sistem.

Semua penulis telah membaca dan menyetujui versi naskah yang telah diterbitkan.

Pendanaan: -

Ucapan Terima Kasih: -

Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan.

Ketersediaan Data: -

Persetujuan Berdasarkan Informasi ORCID: Tidak tersedia.

Penulis Pertama: <https://orcid.org/0000-0001-9146-1000>

Penulis Kedua: <https://orcid.org/0000-0002-1234-5678>

Penulis Ketiga: -

REFERENSI

- [1] F. P. E. Putra, D. E. Arissandi, A. Rofiqi, and M. F. Hidayat, “Pemanfaatan Mikrotik Dalam Manajemen Bandwidth Pada Jaringan Sekolah,” 2025, *researchgate.net*. doi: 10.31294/evolusi.v7i2.5843.
- [2] F. Prasetyo, E. Putra, F. Muslim, N. Hasanah, R. Paradina, and R. Alim, “Jurnal Sistim Informasi dan Teknologi Analisis Komparasi Protokol Websocket dan MQTT Dalam Proses Push Notification,” vol. 5, pp. 63–72, 2024, doi: 10.60083/jsisfotek.v5i4.325.
- [3] M. Lefebvre and D. Bol, “MANTIS: A Mixed-Signal Near-Sensor Convolutional Imager SoC Using Charge-Domain 4b-Weighted 5-to-84-TOPS/W MAC Operations for Feature Extraction and Region-of-Interest Detection,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 60, no. 3, pp. 934–948, 2025, doi: 10.1109/JSSC.2024.3484766.
- [4] N. Shirvanian, M. Shams, A. Masoud Rahmani, J. Lánský, S. Mildeova, and M. Hosseinzadeh, “The Internet of Things in Elderly Healthcare Applications: A Systematic Review and Future Directions,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 71335–71373, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3562147.
- [5] M. G. Guru Brahman and R. Vijay Anand, “VMMISD: An Efficient Load Balancing Model for Virtual Machine Migrations via Fused Metaheuristics With Iterative Security Measures and Deep Learning Optimizations,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 39351–39374, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3373465.
- [6] F. Prasetyo, E. Putra, S. R. Sutarsih, P. Permana, and M. U. Mansyur, “Optimalisasi perancangan aplikasi manajemen data koloman, di desa pulau mandangin sampang – madura berbasis website 1),” vol. 9, no. 2, pp. 285–294, 2024. doi.org/10.36341/rabit.v9i2.4840 .
- [7] A. Khan, M. M. Fouda, D.-T. Do, A. Almaleh, A. M. Alqahtani, and A. U. Ur Rahman, “Underwater Target Detection Using Deep Learning: Methodologies, Challenges, Applications, and Future Evolution,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 12618–12635, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3353688.
- [8] F. P. E. Putra, D. A. M. Putra, A. Firdaus, and ..., “Analisis kecepatan dan kinerja jaringan 5G (generasi ke 5) pada wilayah perkotaan,” ... *J. Informatics*, 2023, doi: 10.51211/itbi.v8i1.2439.
- [9] F. P. E. Putra, A. Muzayyin, and M. U. Mansyur, “ANALISIS KUALITAS LAYANAN ABSENSI BERBASIS FINGER BERDASARKAN Quality of Service,” *J. Inform.*, 2024, doi: https://doi.org/10.30873/ji.v24i1.3949.
- [10] M. K. K. Masood, E. Nava Baro, and P. Otero-Roth, “A Novel Intensity-Corrected Blue Channel Compensation and Edge-Preserving Contrast Enhancement Using Laplace Filter and Sigmoid Function for Sand-Dust Image Enhancement,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 43127–43144, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3548972.
- [11] D. G. González-Cortés, E. Onieva, I. P. Pastor-López, L. Trinchera, and J. Wu, “Autoencoder-Enhanced Clustering: A Dimensionality Reduction Approach to Financial Time Series,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 16999–17009, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3359413.
- [12] Y. Long *et al.*, “Room-temperature, self-powered hydrogel-based flexible chemosensors for nitrogen dioxide detection enabled by zinc-air batteries,” *Biosens. Bioelectron.*, vol. 290, 2025, doi: 10.1016/j.bios.2025.117941.
- [13] C. Jiang and Q. Chen, “Research on IoT data aggregation by fusing fast matching algorithms,” *Appl. Math. Nonlinear Sci.*, vol. 9, no. 1, 2024, doi: 10.2478/amns.2023.2.00305.
- [14] N. Shabbir, L. Kütt, V. Astapov, M. Jawad, A. Allik, and O. Husev, “Battery Size Optimization with Customer

- PV Installations and Domestic Load Profile,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 13012–13025, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3147977.
- [15] F. Prasetyo, E. Putra, I. N. S. Degeng, S. Ulfa, and W. Kamdi, “The Evolution of Quality Education : Impacts and Challenges of Using Open Educational Resources (OER) and Open Educational Practices (OEP) in the Conceive - Design - Implement - Operate (CDIO) Framework,” vol. 13, no. 1, pp. 386–395, 2024, doi: 10.18421/TEM131.
- [16] F. P. E. Putra, R. W. Efendi, A. B. Tamam, and W. A. Pramadi, “Tren dan Praktik Terbaik dalam Pengembangan Web Berbasis API: Kajian Literatur terhadap Framework Laravel dan React,” *Infomatek*, 2025, doi.org/10.23969/infomatek.v27i1.25122 .
- [17] R. R. Mostafa *et al.*, “EMGODV-Hop: an efficient range-free-based WSN node localization using an enhanced mountain gazelle optimizer,” *J. Supercomput.*, vol. 81, no. 1, 2025, doi: 10.1007/s11227-024-06616-6.
- [18] M. Fattoum, Z. Jellali, and L. N. Atallah, “Adaptive Sampling Approach Exploiting Spatio-Temporal Correlation and Residual Energy in Periodic Wireless Sensor Networks,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 7670–7681, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3237024.
- [19] H. Kim, C. Park, J. Kim, S. Jang, and H. K. Lee, “Multimodal Reinforcement Learning for Embedding Networks and Medication Recommendation in Parkinson’s Disease,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 74251–74267, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3405009.
- [20] F. Prasetyo, E. Putra, F. Iqbal, and N. Muhammad, “Twitter sentiment analysis about economic recession in indonesia,” vol. 7, no. 1, pp. 1–7, 2023, doi: 10.31763/businta.v7i1.592.
- [21] F. P. E. Putra, M. Riski, M. S. Yahya, and ..., “Mengenal Teknologi Jaringan Nirkabel Terbaru Teknologi 5G,” *J. Sistim Inf. ...*, 2023, doi: 10.60083/jsisfotek.
- [22] F. P. E. Putra, M. Dafid, and I. Syafi’i, “Firewall Implementation as a Computer Network Security Strategy for Data Protection,” *Brill. Res. Artif. ...*, 2025, doi.org/10.47709/brilliance.v5i1.6162 .
- [23] B. G. Christoff *et al.*, “Response of a novel all-solid-state sodium-based-electrolyte battery to quasi-static and dynamic stimuli,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, vol. 239, no. 9 Special Issue: New advances in manufacturing, modeling, and testing of composite materials, pp. 1784–1795, 2025, doi: 10.1177/14644207241247732.
- [24] J. O. Odeh, X. Yang, C. I. Nwakanma, and S. Dhelim, “Context Privacy Preservation for User Validation by Wireless Sensors in the Industrial Metaverse Access System,” *Algorithms*, vol. 17, no. 6, 2024, doi: 10.3390/a17060225.
- [25] E. Igbokwe, C. Yu, and G. Li, “Multifunctional wood composite with integrated phase change material for energy harvesting, self-healing, flame retardancy, and recycling,” *Dev. Built Environ.*, vol. 23, 2025, doi: 10.1016/j.dibe.2025.100743.
- [26] V. G. Sonone and A. R. Tembhurkar, “Taguchi’s optimization of process parameters for effective degradation of Rhodamine B and energy harvesting through photocatalytic fuel cell with dual photoelectrodes,” *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 36, no. 4, 2025, doi: 10.1007/s10854-025-14284-2.
- [27] A. Pagano, D. Croce, I. Tinnirello, and G. Vitale, “A Survey on LoRa for Smart Agriculture: Current Trends and Future Perspectives,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 4, pp. 3664–3679, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2022.3230505.

- [28] N. Ravi, N. Lourenço, M. Curado, and E. Monteiro, "Deep Reinforcement Learning-Based Multi-Access in Massive Machine-Type Communication," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 178690–178704, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3507577.
- [29] M. B. Bektaş and S. Yılmaz, "A Novel Color Difference-Based Method for Palette Extraction and Evaluation Using Images of Birds," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 52270–52283, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3553252.
- [30] S. Remya, M. J. Pillai, C. Arjun, S. Somula, and Y. Cho, "Enhancing Security in LLNs Using a Hybrid Trust-Based Intrusion Detection System for RPL," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 58836–58850, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3391918.
- [31] Y. Zhou, I.-M. Kim, F. Chan, H.-J. Du, and F. Dilkes, "Robust Spectrum Sensing and Signal Classification: Enhanced Out-of-Distribution Detection Incorporating a Voting Mechanism," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 134510–134520, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3411824.
- [32] X. Zhan, N. Abdi, W. Seymour, and J. Such, "Healthcare Voice AI Assistants: Factors Influencing Trust and Intention to Use," *Proc. ACM Human-Computer Interact.*, vol. 8, no. CSCW1, 2024, doi: 10.1145/3637339.
- [33] S. Tadigotla and J. K. Murthy, "Energy aware multiobjective levy flight artificial rabbits optimization based clustering and routing for mobile wireless sensor networks," *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.*, vol. 15, no. 12, pp. 4023–4041, 2024, doi: 10.1007/s12652-024-04877-w.
- [34] P. Ivanov, M. Shtark, A. Kozhevnikov, M. Golyadkin, D. Botov, and I. Makarov, "SensorDBSCAN: Semi-Supervised Active Learning Powered Method for Anomaly Detection and Diagnosis," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 25186–25197, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3537649.
- [35] K. Daniel *et al.*, "Effect of Bulk Capacitor on Harmonics of Energy-Efficient Devices," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 105302–105316, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3579320.
- [36] S. S. Shah, M. A. Aziz, M. A. Marzooqi, A. Z. Khan, and Z. H. Yamani, "Enhanced light-responsive supercapacitor utilizing BiVO₄ and date leaves-derived carbon: A leap towards sustainable energy harvesting and storage," *J. Power Sources*, vol. 602, 2024, doi: 10.1016/j.jpowsour.2024.234334.
- [37] S. Burok, F. P. E. Putra, and L. Fermadi, "Anti-Klon Pendekatan Ringan untuk Mendeteksi Serangan Kloning RFID," *Infotek J. ...*, 2025, doi: <https://doi.org/10.29408/jit.v8i2.30392>.
- [38] C. Cirillo, M. Iuliano, S. Abrar, E. Navarrete-Astorga, and M. Sarno, "Tribo-Catalytic Degradation of Methyl Orange Dye via Cu/Al₂O₃ Nanoparticles," *Lubricants*, vol. 13, no. 9, 2025, doi: 10.3390/lubricants13090418.
- [39] A. Islam and M. Ghose, "GSAgri: Green and Secure Agriculture through efficient task offloading and scheduling under IoT-enabled energy-harvesting multi-access edge computing framework," *Expert Syst. Appl.*, vol. 284, 2025, doi: 10.1016/j.eswa.2025.127814.
- [40] P. Kumar *et al.*, "Sustainable fabrication of ZnO nanorod/PVDF nanocomposites for ultraviolet photodetection and energy harvesting," *SPE Polym.*, vol. 6, no. 3, 2025, doi: 10.1002/pls2.70014.
- [41] P. Pragnesh and B. R. Mohan, "Channel Pruning of Transfer Learning Models Using Novel Techniques," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 94914–94925, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3416997.
- [42] P. Cong, Y. Xu, T. Li, S. Li, H. Feng, and X. Zhang, "KM-Mask RCNN: A Lightweight Instance Segmentation Algorithm for Strawberries With Multiple Growth Cycles," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 169291–169309, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3485490.

- [43] R. Wielgat *et al.*, “A Concept of Smart Agro-Photovoltaic Tunnels,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 40765–40794, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3376411.
- [44] J. Park and S.-H. Chung, “Enhanced Network Bootstrapping Technique Using Multi-Channel in 6TiSCH Minimal Cells,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 26116–26129, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3539276.
- [45] S. M. S. Bukhari *et al.*, “Secure and privacy-preserving intrusion detection in wireless sensor networks: Federated learning with SCNN-Bi-LSTM for enhanced reliability,” *Ad Hoc Networks*, vol. 155, 2024, doi: 10.1016/j.adhoc.2024.103407.
- [46] H. Zhang, G. Liu, Y. Xu, and T. Jiang, “LoRaAid: Underground Joint Communication and Localization System Based on LoRa Technology,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 23, no. 5, pp. 5248–5260, 2024, doi: 10.1109/TWC.2023.3325330.
- [47] S. Kang, A. Eryilmaz, and N. B. Shroff, “Remote Tracking of Distributed Dynamic Sources Over a Random Access Channel With One-Bit Updates,” *IEEE Trans. Netw. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 4, pp. 1931–1941, 2023, doi: 10.1109/TNSE.2023.3236871.
- [48] L. K. Elkhidir, I. Ahmed, M. Khalid, and F. S. al-Ismael, “Techno-economic optimization of multi-output energy hubs with integrated storage systems and electrolyzers,” *J. Energy Storage*, vol. 136, 2025, doi: 10.1016/j.est.2025.118323.
- [49] L. Peng *et al.*, “Drug Repositioning via Multi-View Representation Learning with Heterogeneous Graph Neural Network,” *IEEE J. Biomed. Heal. Informatics*, vol. 29, no. 3, pp. 1668–1679, 2025, doi: 10.1109/JBHI.2024.3434439.
- [50] M. Tavana, M. Masoudi, and E. Björnson, “Dynamic RF Charging of Zero-Energy Devices via Reconfigurable Intelligent Surfaces,” *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 13, no. 8, pp. 2295–2299, 2024, doi: 10.1109/LWC.2024.3413629.

Publisher’s Note: Publisher stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.