

Analisis Pengaruh Integrasi Fitur Visual dan Sensor Gas terhadap Klasifikasi Grade Mangga Arumanis

¹Syailendra Julian Wicaksono, ²Wahyu Cahyo Utomo, ³Danang Wahyu Widodo

^{1, 2, 3} Teknik Informatika, Universitas Nusantara PGRI Kediri

E-mail: ¹syailendrawicaksono29@gmail.com, ²wahyu.utomo@unpkdr.ac.id,
³danangwahyuwidodo@unpkediri.ac.id

Penulis Korespondens : Syailendra Julian Wicaksono

Abstrak—Proses grading mangga secara manual masih berpotensi menghasilkan penilaian yang subjektif dan kurang konsisten karena bergantung pada pengalaman petugas. Penelitian ini mengusulkan sistem klasifikasi grade mangga Arumanis berbasis pendekatan multimodal yang mengintegrasikan fitur area, hue median, delta gas dari sensor MQ-135, serta fitur visual hasil ekstraksi MobileNetV2 yang direduksi menggunakan Principal Component Analysis (PCA). Seluruh fitur digunakan sebagai masukan model Bayesian Neural Network (BNN) untuk menghasilkan prediksi grade dan nilai *uncertainty*. Dataset terdiri atas 165 citra yang diperoleh dari 55 buah mangga Arumanis dengan tiga sudut pengambilan gambar. Hasil pengujian menunjukkan bahwa model usulan memperoleh akurasi 93,75%, lebih tinggi dibandingkan model MobileNetV2 sebesar 60,72% dan BNN berbasis fitur numerik sebesar 74,54%. Evaluasi menggunakan K-Fold Cross Validation menghasilkan rata-rata akurasi 93,75% dengan standar deviasi 7,81%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi fitur visual dan sensor gas mampu meningkatkan performa klasifikasi grade mangga secara signifikan.

Kata Kunci— Bayesian Neural Network, grading mangga, MobileNetV2, multimodal, MQ-135

Abstract— *A Manual mango grading often produces subjective and inconsistent assessments due to its dependence on human expertise. This study proposes a multimodal classification system for Arumanis mango grading by integrating area, hue median, MQ-135 gas sensor measurements, and visual features extracted using MobileNetV2 and reduced through Principal Component Analysis (PCA). The combined features are used as inputs to a Bayesian Neural Network (BNN) to generate grade predictions and uncertainty estimates. The dataset consists of 165 images obtained from 55 Arumanis mangoes captured from three different viewing angles. Experimental results show that the proposed model achieved an accuracy of 93.75%, outperforming MobileNetV2 with 60.72% accuracy and numerical-feature-based BNN with 74.54% accuracy. K-Fold Cross Validation produced an average accuracy of 93.75% with a standard deviation of 7.81%. The results demonstrate that integrating visual and gas sensor features significantly improves mango grade classification performance.*

Keywords— Bayesian Neural Network, mango grading, MobileNetV2, MQ-135, multimodal

This is an open access article under the CC BY-SA License.



I. PENDAHULUAN

Mangga merupakan salah satu komoditas hortikultura yang memiliki nilai ekonomi tinggi dan banyak diperdagangkan baik untuk pasar domestik maupun ekspor[1]. Dalam proses distribusi dan pemasaran, penentuan grade mangga menjadi tahapan penting karena berpengaruh terhadap

harga jual, kualitas produk, serta kepercayaan konsumen[2]. Proses grading umumnya dilakukan berdasarkan karakteristik fisik buah seperti ukuran, warna, dan kondisi permukaan. Namun, penilaian yang dilakukan secara manual masih sangat bergantung pada pengalaman petugas sehingga berpotensi menghasilkan keputusan yang subjektif dan kurang konsisten.

Perkembangan teknologi kecerdasan buatan telah mendorong penerapan sistem otomatis untuk membantu proses klasifikasi kualitas buah. Berbagai penelitian telah memanfaatkan pengolahan citra digital dan metode pembelajaran mesin untuk mengidentifikasi tingkat kematangan maupun kualitas buah berdasarkan karakteristik visual[3]. Pendekatan tersebut mampu meningkatkan konsistensi penilaian dibandingkan metode manual. Akan tetapi, sebagian besar penelitian masih mengandalkan informasi visual sebagai satu-satunya sumber data sehingga belum mampu merepresentasikan kondisi fisiologis buah secara menyeluruh.

Pada proses pematangan, buah menghasilkan senyawa volatil dan gas yang berkaitan dengan aktivitas biologis di dalam jaringan buah[4]. Informasi tersebut tidak dapat diamati secara langsung melalui citra, namun dapat diukur menggunakan sensor gas. Oleh karena itu, pemanfaatan data sensor gas sebagai sumber informasi tambahan berpotensi meningkatkan kemampuan sistem dalam membedakan karakteristik buah yang memiliki kemiripan visual[2]. Integrasi data citra dan data sensor gas dapat menghasilkan representasi yang lebih komprehensif dibandingkan penggunaan satu jenis data saja.

Selain pemilihan fitur, pemilihan model klasifikasi juga menjadi faktor penting dalam menentukan performa sistem[5]. Sebagian besar penelitian terdahulu menggunakan model klasifikasi konvensional yang hanya menghasilkan prediksi kelas tanpa memberikan informasi mengenai tingkat keyakinan model terhadap hasil prediksi tersebut. Dalam konteks grading buah, informasi tingkat keyakinan penting untuk membantu pengguna dalam mengevaluasi reliabilitas hasil yang diberikan sistem.

Penelitian ini mengusulkan sistem klasifikasi grade mangga berbasis pendekatan multimodal yang mengintegrasikan fitur area, hue median, nilai delta gas dari sensor MQ-135, serta fitur visual hasil ekstraksi *Convolutional Neural Network* (CNN)[6]. Fitur CNN selanjutnya direduksi menggunakan *Principal Component Analysis* (PCA) untuk memperoleh representasi yang lebih ringkas sebelum digabungkan dengan fitur lainnya[7]. Proses klasifikasi dilakukan menggunakan *Bayesian Neural Network* (BNN) yang tidak hanya menghasilkan prediksi grade mangga, tetapi juga menyediakan informasi *uncertainty* sebagai indikator tingkat keyakinan model terhadap hasil prediksi yang diberikan[8]. Berdasarkan hasil evaluasi menggunakan *K-Fold Cross Validation*, model yang dikembangkan mampu mencapai rata-rata akurasi sebesar 93,75% dengan standar deviasi 7,81%, sehingga menunjukkan kemampuan generalisasi yang baik terhadap data yang digunakan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem klasifikasi grade mangga berbasis integrasi fitur visual dan sensor gas menggunakan *Bayesian Neural Network*, serta mengevaluasi performa model melalui *K-Fold Cross Validation*, *Confusion Matrix*, dan analisis *uncertainty* untuk mendukung proses grading yang lebih objektif dan konsisten[9].

II. METODE

A. Dataset

Penelitian ini menggunakan dataset mangga Arumanis yang diperoleh melalui proses akuisisi citra dan pengukuran gas. Dataset terdiri atas 55 buah mangga yang dikelompokkan ke dalam tiga

grade kualitas, yaitu Grade A, Grade B, dan Grade C. Setiap buah difoto dari tiga sisi berbeda sehingga diperoleh total 165 citra.

Distribusi dataset yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Distribusi Dataset

<i>No</i>	<i>Distribusi Dataset</i>	
	<i>Grade</i>	<i>Jumlah data</i>
1	<i>Grade A</i>	57
2	<i>Grade B</i>	66
3	<i>Grade C</i>	42
	<i>Total</i>	165

Selain data citra, penelitian ini juga memanfaatkan data gas yang diperoleh menggunakan sensor MQ-135. Data gas digunakan sebagai informasi tambahan untuk merepresentasikan karakteristik buah yang tidak dapat diamati secara langsung melalui citra.

B. Ekstraksi dan Integrasi Fitur

Penelitian ini menggunakan pendekatan multimodal dengan menggabungkan fitur visual dan fitur sensor gas. Fitur visual diekstraksi menggunakan OpenCV dan MobileNetV2, sedangkan fitur gas diperoleh dari sensor MQ-135.

Luas objek (*area*) dihitung menggunakan marker ArUco sebagai referensi ukuran. Karakteristik warna direpresentasikan menggunakan nilai *hue median* pada ruang warna HSV. Selain itu, MobileNetV2 digunakan sebagai *feature extractor* untuk memperoleh representasi visual dari citra mangga [8].

Hasil ekstraksi MobileNetV2 menghasilkan 32 fitur yang kemudian direduksi menggunakan *Principal Component Analysis* (PCA) menjadi satu fitur representatif. Selanjutnya fitur hasil PCA digabungkan dengan *area*, *hue median*, dan *delta gas* sehingga diperoleh empat fitur utama yang digunakan sebagai masukan model klasifikasi.

Tabel 2. Fitur Masukan Model

<i>No</i>	<i>Fitur Model</i>	
	<i>Fitur</i>	<i>Sumber</i>
1	<i>Area</i>	<i>OpenCV</i>
2	<i>Hue Median</i>	<i>HSV</i>
3	<i>Delta Gas</i>	<i>MQ-135</i>
4	<i>CNN Feature</i>	<i>MobileNetV2 + PCA</i>

Nilai *delta gas* dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$\Delta Gas = Avg_{fruit} - Baseline \quad (1)$$

Dengan:

1. Avg_{fruit} = rata-rata pembacaan sensor setelah buah dimasukkan ke chamber

2. *Baseline*= rata-rata pembacaan sensor pada kondisi chamber kosong

C. Klasifikasi Menggunakan Bayesian Neural Network

Klasifikasi grade mangga dilakukan menggunakan *Bayesian Neural Network* (BNN). Sebelum proses pelatihan, seluruh fitur dinormalisasi menggunakan *scaler* untuk menyamakan rentang nilai antar fitur[10].

Model akhir menggunakan konfigurasi terbaik yang diperoleh melalui proses eksperimen hyperparameter. Konfigurasi yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Konfigurasi Model

No	Konfigurasi	
	Parameter	Nilai
1	Learning Rate	0,01
2	Epoch	200
3	Optimizer	Nadam

D. Evaluasi Model

Evaluasi performa model dilakukan menggunakan *K-Fold Cross Validation* untuk mengukur kemampuan generalisasi model terhadap berbagai pembagian data. Nilai akurasi dari setiap *fold* digunakan untuk memperoleh rata-rata akurasi dan standar deviasi model.

Selain itu, *Confusion Matrix* digunakan untuk menganalisis pola kesalahan klasifikasi pada masing-masing grade mangga. Evaluasi juga dilakukan terhadap nilai *uncertainty* yang dihasilkan oleh Bayesian Neural Network untuk mengetahui hubungan antara tingkat keyakinan model dengan hasil prediksi yang diberikan [9].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Perbandingan Kinerja Model

Untuk mengetahui pengaruh integrasi fitur terhadap performa klasifikasi, dilakukan perbandingan antara tiga pendekatan yang berbeda, yaitu model berbasis citra menggunakan MobileNetV2, model Bayesian Neural Network (BNN) menggunakan fitur numerik, dan model usulan yang menggabungkan fitur visual serta fitur sensor gas.

Model MobileNetV2 menggunakan informasi citra sebagai sumber data utama. Model BNN menggunakan fitur area, hue median, dan delta gas sebagai masukan. Sementara itu, model usulan menggabungkan fitur area, hue median, delta gas, serta fitur visual hasil ekstraksi MobileNetV2 yang telah direduksi menggunakan PCA.

Tabel 4. Perbandingan Kinerja Model

No	Perbandingan	
	Model	Accuracy
1	CNN	60,72 %
2	BNN	74,54 %
3	CNN Feature + BNN	93,75 %

Berdasarkan hasil pengujian, model usulan menghasilkan performa terbaik dibandingkan kedua model pembanding. Peningkatan performa tersebut menunjukkan bahwa integrasi fitur visual dan sensor gas mampu memberikan representasi data yang lebih lengkap dibandingkan penggunaan satu jenis fitur saja.

Fitur visual memberikan informasi mengenai warna, tekstur, dan karakteristik permukaan buah, sedangkan sensor MQ-135 memberikan informasi tambahan mengenai kondisi fisiologis buah yang tidak dapat diamati secara langsung melalui citra [11]. Kombinasi kedua sumber informasi tersebut memungkinkan model menghasilkan keputusan klasifikasi yang lebih akurat.

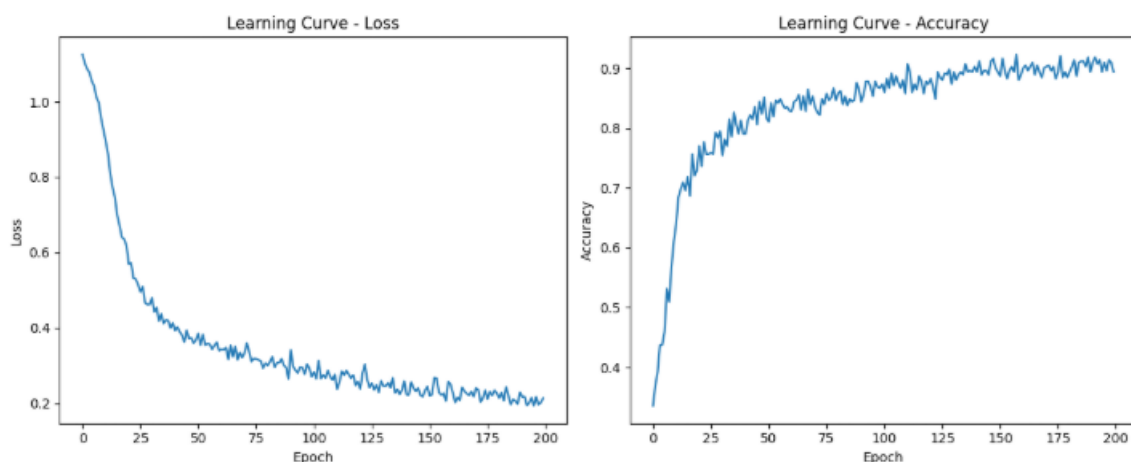
Tabel 5. Hasil Pengujian

<i>No</i>	<i>K-Fold</i>	
	<i>Fold</i>	<i>Accuracy</i>
1	<i>Fold 1</i>	86,95 %
2	<i>Fold 2</i>	81,81 %
3	<i>Fold 3</i>	100,00 %
4	<i>Fold 4</i>	100,00 %
5	<i>Fold 5</i>	100,00 %
6	<i>Rata-rata</i>	93,75%
	<i>STD</i>	7,81

Hasil pengujian menunjukkan bahwa model memperoleh rata-rata akurasi sebesar 93,75% dengan standar deviasi 7,81%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa model memiliki kemampuan generalisasi yang baik dan mampu mempertahankan performa yang relatif konsisten pada berbagai pembagian data.

B. Learning Curve Model

Proses pelatihan model dievaluasi menggunakan grafik learning curve yang terdiri atas kurva loss dan accuracy.



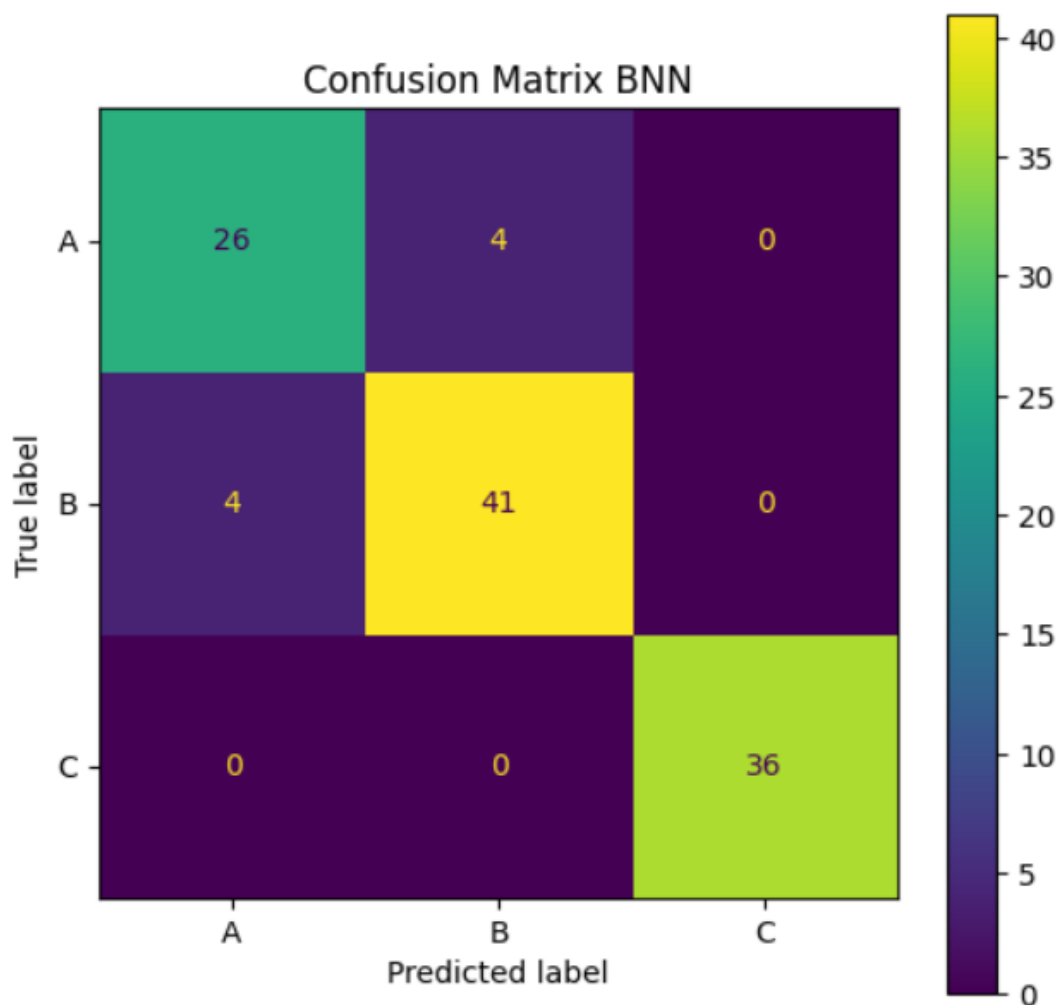
Gambar 1. Learning Curve Model Bayesian Neural Network

Berdasarkan Gambar 1, nilai loss menunjukkan tren penurunan yang konsisten selama proses pelatihan. Pada saat yang sama, nilai accuracy meningkat secara bertahap hingga mencapai lebih dari 90% pada akhir pelatihan.

Pola tersebut menunjukkan bahwa model berhasil mempelajari pola data dengan baik dan mencapai kondisi konvergen. Selain itu, tidak terlihat adanya peningkatan loss yang signifikan pada akhir proses pelatihan sehingga model tidak menunjukkan gejala overfitting yang berlebihan.

C. Analisis Confusion Matrix

Analisis lebih lanjut dilakukan menggunakan confusion matrix untuk mengetahui pola kesalahan klasifikasi pada setiap grade mangga.



Gambar 2. Confusion Matrix Hasil Klasifikasi

Berdasarkan confusion matrix, sebagian besar data berhasil diklasifikasikan dengan benar oleh model. Kesalahan klasifikasi terutama terjadi antara Grade A dan Grade B, sedangkan seluruh data Grade C berhasil dikenali dengan baik.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa karakteristik Grade C memiliki perbedaan yang lebih jelas dibandingkan dua grade lainnya. Sebaliknya, Grade A dan Grade B memiliki karakteristik yang relatif berdekatan sehingga pada beberapa kondisi model masih mengalami kesulitan dalam membedakan kedua kelas tersebut.

Meskipun demikian, jumlah kesalahan klasifikasi yang terjadi relatif kecil dibandingkan jumlah data yang berhasil diklasifikasikan dengan benar sehingga model tetap menunjukkan performa klasifikasi yang baik.

D. Analisis Uncertainty

Salah satu keunggulan Bayesian Neural Network dibandingkan jaringan saraf konvensional adalah kemampuannya dalam menghasilkan informasi uncertainty pada setiap prediksi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa model menghasilkan rata-rata uncertainty sebesar 0,0877. Selain itu, nilai uncertainty pada prediksi yang salah cenderung lebih tinggi dibandingkan prediksi yang benar.

Temuan tersebut menunjukkan bahwa model mampu mengenali kondisi ketika tingkat keyakinannya terhadap suatu prediksi menurun. Dengan demikian, informasi uncertainty dapat digunakan sebagai indikator tambahan untuk membantu pengguna dalam mengevaluasi reliabilitas hasil klasifikasi yang diberikan oleh sistem.

Kemampuan tersebut memberikan nilai tambah pada sistem grading mangga karena pengguna tidak hanya memperoleh hasil prediksi grade, tetapi juga memperoleh informasi mengenai tingkat keyakinan model terhadap keputusan yang dihasilkan.

E. Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan multimodal yang menggabungkan fitur area, hue median, delta gas, dan fitur visual hasil MobileNetV2 mampu menghasilkan performa yang lebih baik dibandingkan penggunaan fitur visual maupun fitur numerik secara terpisah.

Keunggulan tersebut diperoleh karena setiap fitur memberikan informasi yang saling melengkapi. Area merepresentasikan ukuran fisik buah, hue median menggambarkan karakteristik warna, delta gas memberikan informasi fisiologis buah, sedangkan MobileNetV2 mampu mengekstraksi pola visual yang lebih kompleks. Integrasi berbagai sumber informasi tersebut memungkinkan model menghasilkan klasifikasi grade mangga Arumanis secara lebih akurat dan konsisten.

Selain menghasilkan akurasi yang tinggi, penggunaan Bayesian Neural Network juga memberikan kemampuan tambahan berupa estimasi uncertainty yang dapat digunakan sebagai indikator tingkat kepercayaan prediksi. Oleh karena itu, pendekatan yang diusulkan berpotensi untuk mendukung proses grading mangga secara lebih objektif dibandingkan metode penilaian manual.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem klasifikasi grade mangga Arumanis berbasis pendekatan multimodal yang mengintegrasikan fitur area, hue median, delta gas dari sensor MQ-135, serta fitur visual hasil ekstraksi MobileNetV2 yang direduksi menggunakan Principal Component Analysis (PCA). Hasil pengujian menunjukkan bahwa integrasi fitur visual dan sensor gas mampu meningkatkan kemampuan model dalam membedakan grade kualitas mangga dibandingkan penggunaan satu jenis fitur secara terpisah.

Model Bayesian Neural Network yang digunakan tidak hanya menghasilkan performa klasifikasi yang baik dengan rata-rata akurasi sebesar 93,75% pada pengujian K-Fold Cross Validation, tetapi juga mampu menyediakan informasi uncertainty sebagai indikator tingkat keyakinan prediksi. Kemampuan tersebut memberikan nilai tambah karena pengguna dapat memperoleh informasi mengenai reliabilitas hasil klasifikasi yang diberikan sistem.

Berdasarkan hasil penelitian, pendekatan multimodal berbasis Bayesian Neural Network berpotensi digunakan sebagai alternatif dalam proses grading mangga yang lebih objektif, konsisten, dan terstandarisasi. Pengembangan selanjutnya dapat dilakukan dengan menambah jumlah dataset, memperluas variasi kondisi pengambilan data, serta mengevaluasi penerapan metode pada varietas mangga lainnya untuk meningkatkan kemampuan generalisasi sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Fulgoni and V. L. Fulgoni, "Mango Consumption Was Associated with Higher Nutrient Intake and Diet Quality in Women of Childbearing Age and Older Adults," *Nutrients*, vol. 16, no. 2, Jan. 2024, doi: 10.3390/NU16020303.
- [2] W. Nong *et al.*, "Effects of Harvest Maturity on Microbial Community Composition, Enzyme Activities, and Phenolic Acids in Upper Tobacco Leaves After Curing," 2025.
- [3] A. Martínez, A. Hernández, P. Arroyo, J. Lozano, M. de G. Córdoba, and A. Martín, "Early Detection of *Monilinia laxa* in Yellow-Fleshed Peach Using a Non-Destructive E-Nose Approach," *Foods*, vol. 14, no. 18, p. 3155, Sep. 2025, doi: 10.3390/foods14183155.
- [4] Y. H. Roh *et al.*, "Physiological Responses and Determination of Harvest Maturity in 'Daehong' Peach According to Days After Full Bloom," *Horticulturae*, vol. 11, no. 9, p. 1013, Aug. 2025, doi: 10.3390/horticulturae11091013.
- [5] R. Nithya, B. Santhi, R. Manikandan, M. Rahimi, and A. H. Gandomi, "Computer Vision System for Mango Fruit Defect Detection Using Deep Convolutional Neural Network," *Foods*, vol. 11, no. 21, p. 3483, Nov. 2022, doi: 10.3390/foods11213483.
- [6] W. Zaman, M. F. Siddique, S. U. Khan, and J.-M. Kim, "A New Dual-Input CNN for Multimodal Fault Classification Using Acoustic Emission and Vibration Signals," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 179, p. 109787, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.engfailanal.2025.109787.
- [7] L. Colaco and P. Kamat, "Artificial Intelligence Advances for Cashew Fruit Maturity and Quality Detection: A Systematic Review on Models, Sensors, and Farming Applications," *J. Big Data*, vol. 12, no. 1, p. 250, Nov. 2025, doi: 10.1186/s40537-025-01296-2.
- [8] Y. M. Hirimutugoda, T. P. Silva, and N. M. Wagarachchi, "Handling the predictive uncertainty of convolutional neural network in medical image analysis: a review," *J. Med. Artif. Intell.*, vol. 6, no. 0, Oct. 2023, doi: 10.21037/JMAI-23-40/COIF.
- [9] A. Luque, M. Mazzoleni, A. Carrasco, and A. Ferramosca, "Visualizing Classification Results: Confusion Star and Confusion Gear," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 1659–1677, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3137630.
- [10] L. Zhao and D. Um, "Precision Agriculture Based on Bayesian Neural Network".
- [11] F. J. Diaz Blasco *et al.*, "Employment of MQ gas sensors for the classification of *Cistus ladanifer* essential oils," *Microchemical Journal*, vol. 206, p. 111585, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.microc.2024.111585.