

SKRIPSI

**PENGEMBANGAN SISTEM DETEKSI TINGKAT KEMATANGAN
BUAH BELIMBING DENGAN MENGGUNAKAN ESP32-CAM
DAN SENSOR BERAT BERBASIS IoT**

DISUSUN OLEH

Muhammad Havis Hidayat

2109020180



UMSU

Unggul | Cerdas | Terpercaya

**PROGRAM STUDI TEKNOLOGI INFORMASI
FAKULTAS ILMU KOMPUTER DAN TEKNOLOGI INFORMASI
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA**

MEDAN

2025

**PENGEMBANGAN SISTEM DETEKSI TINGKAT KEMATANGAN
BUAH BELIMBING DENGAN MENGGUNAKAN ESP32-CAM
DAN SENSOR BERAT BERBASIS IoT**

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana
Komputer (S.Kom) dalam Program Studi Teknologi Informasi Pada
Fakultas Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi, Universitas
Muhammadiyah Sumatera Utara**

**Muhammad Havis Hidayat
NPM. 2109020180**

**PROGRAM STUDI TEKNOLOGI INFORMASI FAKULTAS ILMU
KOMPUTER DAN TEKNOLOGI INFORMASI UNIVERSITAS
MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2025**

LEMBAR PENGESAHAN

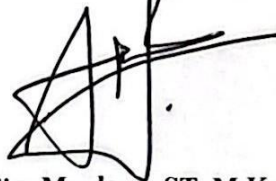
Judul Skripsi : PENGEMBANGAN SISTEM DETEKSI TINGKAT
KEMATANGAN BUAH BELIMBING
MENGUNAKAN ESP32-CAM DAN SENSOR
BERAT BERBASIS IoT

Nama Mahasiswa : Muhammad Havis Hidayat

NPM : 2109020180

Program Studi : TEKNOLOGI INFORMASI

Menyetujui
Komisi Pembimbing



(Halim Maulana, ST., M.Kom)
NIDN. 0121119102

Ketua Program Studi



(Fatma Sari Hutagalung, S.Kom, M.Kom)
NIDN. 0117019301

Dekan



(Dr. Adhikharizmi, S.Kom., M.Kom.)
NIDN. 0127099201

PERNYATAAN ORISINALITAS

PENGEMBANGAN SISTEM DETEKSI TINGKAT KEMATANGAN BUAH BELIMBING MENGGUNAKAN ESP32-CAM DAN SENSOR BERAT BERBASIS IOT

SKRIPSI

Saya menyatakan bahwa karya tulis ini adalah hasil karya sendiri, kecuali beberapa kutipan dan ringkasan yang masing-masing disebutkan sumbernya.

Medan, September 2025

Yang membuat pernyataan



Muhammad Havis Hidayat

NPM. 2109020180

**PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN
AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademika Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, saya bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Muhammad Havis Hidayat
NPM : 2109020180
Program Studi : Teknologi Informasi
Karya Ilmiah : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara Hak Bebas Royalti Non-Eksekutif (*Non-Exclusive Royalty free Right*) atas penelitian skripsi saya yang berjudul:

**PENGEMBANGAN SISTEM DETEKSI TINGKAT KEMATANGAN
BUAH BELIMBING MENGGUNAKAN ESP32-CAM
DAN SENSOR BERAT BERBASIS IoT**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non-Eksekutif ini, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara berhak menyimpan, mengalih media, memformat, mengelola dalam bentuk database, merawat dan mempublikasikan Skripsi saya ini tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis dan sebagai pemegang dan atau sebagai pemilik hak cipta.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan sebenarnya.

Medan, September 2025

Yang membuat pernyataan



Muhammad Havis Hidayat

NPM. 2109020180

RIWAYAT HIDUP

DATA PRIBADI

Nama Lengkap : Muhammad Havis Hidayat
Tempat dan Tanggal Lahir : Bagan Batu, 27 Februari 2000
Alamat Rumah : Jl. KLY. Sudarso No.123 Lk II Medan Deli
Telepon/Faks/HP : 081373781380
E-mail : muhammadhaviis20@gmail.com
Instansi Tempat Kerja : -
Alamat Kantor : -

DATA PENDIDIKAN

SD	: SD NEGERI 005 GELORA	TAMAT: 2012
SMP	: SMP NEGERI 2 BAGAN SINEMBAH	TAMAT: 2015
SMA	: SMA NEGERI 2 MEDAN	TAMAT: 2018

KATA PENGANTAR



Segala puji bagi Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi berjudul “PENGEMBANGAN SISTEM DETEKSI TINGKAT KEMATANGAN BUAH BELIMBING MENGGUNAKAN ESP32-CAM DAN SENSOR BERAT BERBASIS IoT”. Penulisan skripsi ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Komputer (S.Kom) di Program Studi Teknologi Informasi, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Rasa terima kasih yang tulus penulis sampaikan kepada orang tua tercinta, Bapak **Susanto Hidayat Purba** dan Ibu **Nur Aisiah**, atas doa, dukungan moril, materil, serta semangat yang tak pernah putus. Penyelesaian skripsi ini juga tidak terlepas dari bimbingan dan dukungan berbagai pihak. Untuk itu, penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

- 1) Bapak Prof. Dr. Agussani, MAP, selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
- 2) Bapak Prof. Dr. Muhammad Arifin, S.H., M.Hum, Bapak Prof. Dr. Akrim, M.Pd, dan Bapak Assoc. Prof. Dr. Rudianto, S.Sos., M.Si, selaku Wakil Rektor I, II, dan III.
- 3) Bapak Dr. Al-Khowarizmi, S.Kom., M.Kom., selaku Dekan FIKTI.

- 4) Bapak Halim Maulana, S.T., M.Kom., selaku Wakil Dekan I sekaligus Dosen Pembimbing.
- 5) Bapak Dr. Lutfi Basit, S.Sos., M.I.Kom., selaku Wakil Dekan III FIKTI.
- 6) Ibu Fatma Sari Hutagalung, S.Kom., M.Kom., selaku Ketua Program Studi Teknologi Informasi.
- 7) Bapak Mhd Basri, S.Si, M.Kom., selaku Sekretaris Program Studi Teknologi Informasi.
- 8) Seluruh civitas akademika Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
- 9) Teman-teman seperjuangan di Program Studi Teknologi Informasi yang telah berbagi ilmu dan semangat.

Penulis menyadari skripsi ini masih jauh dari sempurna dan sangat terbuka terhadap kritik serta saran yang membangun. Semoga karya ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang teknologi informasi.

Medan, 09 September 2025

Penulis

Muhammad Havis Hidayat

ABSTRAK

Buah belimbing (*Averrhoa carambola* L.) merupakan salah satu komoditas hortikultura unggulan yang memiliki potensi ekspor tinggi, namun proses sortasi pascapanen masih banyak dilakukan secara manual sehingga rawan kesalahan dan tidak konsisten. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem otomatis deteksi tingkat kematangan dan ukuran buah belimbing berbasis kamera ESP32-CAM, sensor berat (load cell + HX711), serta algoritma Convolutional Neural Network (CNN) yang diintegrasikan dengan Internet of Things (IoT). Sistem bekerja dengan menimbang buah menggunakan load cell untuk menentukan kategori ukuran sesuai SNI 4491:2009, kemudian citra buah ditangkap oleh ESP32-CAM dan diproses dengan CNN untuk klasifikasi tingkat kematangan (mentah, setengah matang, matang sempurna). Hasil klasifikasi selanjutnya dikirim secara real-time melalui aplikasi Telegram. Pengujian menggunakan 30 sampel buah belimbing menunjukkan akurasi CNN sebesar 86,6% dalam klasifikasi kematangan, sedangkan sensor load cell memiliki error pengukuran rata-rata $\pm 1-2\%$. Sistem ini terbukti mampu melakukan proses sortir otomatis dengan tingkat akurasi yang baik, efisien, serta mudah dipantau dari jarak jauh. Penelitian ini diharapkan dapat mendukung petani maupun pelaku usaha kecil dalam meningkatkan mutu hasil panen agar sesuai standar pasar lokal dan ekspor.

Kata Kunci : Belimbing, ESP32-CAM, Convolutional Neural Network (CNN), Load Cell, IoT, Sortasi Otomatis, SNI 4491:2009

ABSTRACT

Starfruit (*Averrhoa carambola* L.) is one of Indonesia's leading horticultural commodities with high export potential. However, the post-harvest sorting process is still predominantly conducted manually, leading to inconsistency and misclassification. This research aims to develop an automatic detection system for starfruit maturity and size based on the ESP32-CAM module, load cell (HX711), and Convolutional Neural Network (CNN) algorithm integrated with the Internet of Things (IoT). The system operates by weighing the fruit with a load cell to determine its size category according to the Indonesian National Standard (SNI 4491:2009), while the ESP32-CAM captures fruit images which are then processed by the CNN to classify maturity levels (unripe, half-ripe, fully ripe). The classification results are transmitted in real-time via the Telegram application. Experiments with 30 fruit samples achieved an average CNN accuracy of 86.6% in maturity classification, while the load cell showed a measurement error of only $\pm 1-2\%$. The prototype system successfully performed automatic sorting with high accuracy, efficiency, and remote monitoring capability. This study is expected to provide practical solutions for farmers and small-scale producers in improving the quality consistency of starfruit in line with local and export standards.

Keywords : Starfruit, ESP32-CAM, Convolutional Neural Network (CNN), Load Cell, IoT, Automatic Sorting, SNI 4491:2009

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1.Latar Belakang	1
1.2.Rumusan Masalah	4
1.3.Batasan Masalah.....	4
1.4.Tujuan Penelitian.....	5
1.5.Manfaat Penelitian.....	6
BAB II LANDASAN TEORI	7
2.1.Karakteristik Buah Belimbing	7
2.2.Tingkat Kematangan Buah Belimbing.....	8
2.3.Sensor Kamera ESP32-CAM	10
2.4.Sensor Berat Load Cell + Modul HX711	11
2.5.Mikrokontroler ESP32 Dev Module	13
2.6.Conveyor dan Aktuator Sortir Otomatis	14
2.7.Convolution Neural Network (CNN).....	15
2.8.Internet of Things (IoT) dalam Sistem Sortasi	17
2.9.Penelitian Terdahulu	18
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	22
3.1.Jenis dan pendekatan penelitian	22
3.2.Waktu dan Tempat Penelitian.....	23
3.3.Alat dan Bahan Penelitian.....	23
3.3.1.Komponen Perangkat Keras	24
3.3.2.Perangkat Lunak	25
3.3.3.Bahan Uji.....	26
3.4.Perancangan Diagram Blok Sistem.....	27
3.5.Perancangan Flowchart Sistem	27
3.6.Metode Pengumpulan Data	29
3.7.Prosedur Penelitian.....	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	35
4.1.Desain dan Implementasi Sistem.....	35
4.2.Data Pengujian Sensor.....	36
4.3.Implementasi Perangkat Lunak	36
4.4. Realisasi Sistem Keseluruhan.....	39

4.5.Hasil Uji Coba Sistem	39
4.5.1.Uji Akurasi Kematangan dengan CNN	39
4.5.2.Uji Ketelitian Berat dengan Load Cell.....	40
4.5.3.Uji Integrasi Sistem	40
4.6Pembahasan	41
BAB V PENUTUP	44
5.1.Kesimpulan.	44
5.2.Saran.....	45
DAFTAR PUSTAKA.....	47

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kode Ukuran SNI Buah Belimbing	10
Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu	20
Tabel 4.1 Nilai Akurasi CNN	39
Tabel 4.2 Nilai Akurasi Load Cell	40
Tabel 4.3 Uji Integritas Sistem	41

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Diagram Blok Sistem	27
Gambar 3.2 Flowchart Sistem.....	29
Gambar 3.3 Alur Prosedur Penelitian.....	34
Gambar 4.1 Bentuk Fisik Conveyor.....	35
Gambar 4.2 ESP-32 Dev Module.....	36
Gambar 4.3 Tampilan Pengumpulan Dataset Menggunakan ESP-32 CAM.....	37
Gambar 4.4 Tampilan Hasil Klasifikasi Pada Serial Monitor Arduino IDE	37
Gambar 4.5 Coding ESP-32 CAM pada Arduino IDE	38
Gambar 4.6 Tampilan Notifikasi Hasil Klasifikasi melalui Telegram.....	38

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Buah belimbing (*Averrhoa carambola* L.) merupakan salah satu buah tropis unggulan yang memiliki kandungan vitamin C, vitamin A, serta senyawa antioksidan yang tinggi, sehingga sangat bermanfaat bagi kesehatan tubuh (Laili et al., 2023). Selain dikonsumsi secara langsung, buah ini juga banyak diolah menjadi berbagai produk pangan seperti jus dan manisan. Belimbing memiliki bentuk unik seperti bintang dan cita rasa manis segar yang khas, menjadikannya populer di kalangan konsumen internasional (Fan et al., 2020). Selain itu, belimbing termasuk dalam kelompok buah non-klimakterik, yaitu buah yang tidak mengalami pematangan lanjutan setelah dipanen, sehingga proses panen dan distribusinya perlu dilakukan pada tingkat kematangan yang tepat agar mutu tetap terjaga. Menurut (Sundari et al., 2023), klasifikasi tingkat kematangan pada buah belimbing sangat penting untuk mempertahankan kualitas visual dan cita rasa buah hingga ke tangan konsumen, terutama dalam proses pascapanen.

Proses panen dan penyortiran buah belimbing umumnya masih dilakukan secara manual, yaitu dengan mengandalkan pengamatan visual dan pengalaman subjektif. Proses ini memiliki banyak kelemahan terutama dalam hal akurasi dan konsistensi, karena penilaian terhadap warna dan ukuran buah sering kali berbeda antara satu pekerja dengan yang lain. Dalam praktiknya, kegiatan sortir manual yang dilakukan dalam jumlah besar dan dalam waktu lama berpotensi menyebabkan kelelahan, yang akhirnya berdampak pada tingkat kesalahan dalam

klasifikasi buah (Ibnutama et al., 2023). Selain itu, (Hafidz Imaduddin et al., 2017) juga menyatakan bahwa proses sortasi tradisional menyulitkan petani untuk menjaga keseragaman mutu dan ukuran buah, sehingga dapat menurunkan kualitas produk saat didistribusikan ke konsumen atau pedagang besar. Lebih lanjut, hasil sortir panen secara manual sering kali tidak sesuai dengan standar mutu yang ditetapkan dalam sistem ekspor, salah satunya SNI 4491:2009. Standar ini mengatur persyaratan mutu buah belimbing berdasarkan beberapa parameter, seperti tingkat kematangan, keseragaman warna, kebersihan, serta pengelompokan ukuran berdasarkan berat buah, sehingga produk yang diekspor dapat memenuhi kriteria pasar internasional.

Belimbing memiliki potensi ekspor yang tinggi, namun tren produksinya menunjukkan penurunan dalam beberapa tahun terakhir. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS), total produksi belimbing nasional pada tahun 2023 hanya mencapai 119.758 ton, turun sekitar 6,9% dibandingkan tahun sebelumnya. Penurunan ini diduga dipengaruhi oleh berbagai faktor, mulai dari perubahan iklim, serangan hama dan penyakit, penurunan luas lahan, hingga minimnya penerapan teknologi modern di tingkat petani. Kondisi ini tentu berdampak pada kualitas buah yang dihasilkan. Lebih lanjut, meskipun volume ekspor buah-buahan Indonesia meningkat pada tahun yang sama, nilai ekspornya justru turun hingga 16,67%, yang mengindikasikan adanya penurunan mutu atau daya saing buah di pasar internasional.

Sejumlah penelitian telah dilakukan menggunakan teknologi pengolahan citra digital. Misalnya, (Sundari et al., 2023) menggunakan transformasi warna HSI untuk mengklasifikasi tiga tingkat kematangan belimbing, (Ibnutama et al.,

2023) menggunakan ruang warna CMYK, dan (Setiawan et al., 2020) menggunakan fitur tekstur melalui metode Grey Level Co-occurrence Matrix (GLCM). Meskipun pendekatan tersebut terbukti akurat dalam kondisi laboratorium, gap utama dari penelitian-penelitian tersebut adalah ketergantungannya pada kamera resolusi tinggi, pencahayaan stabil, dan perangkat komputer khusus untuk pengolahan citra, sehingga tidak praktis dan sulit diadopsi oleh kelompok tani kecil.

Untuk mengatasi keterbatasan metode sortir manual dan meningkatkan akurasi, penelitian ini mengusulkan sistem otomatis berbasis kamera dan kecerdasan buatan. Cara kerja sistem dimulai dengan buah belimbing diletakkan pada timbangan Load Cell untuk memperoleh data berat. Setelah hasil penimbangan diperoleh, lengan servo akan menggerakkan buah menuju conveyor yang mengarahkan buah ke titik pembacaan kamera ESP32-CAM. Kamera ini akan menangkap citra permukaan buah, kemudian citra tersebut diproses menggunakan algoritma Convolutional Neural Network (CNN). CNN berfungsi untuk mengklasifikasikan tingkat kematangan buah (Mentah, Setengah Matang, atau Matang Sempurna) berdasarkan pola warna dan tekstur pada citra yang telah dipelajari dari dataset pelatihan. Setelah data berat dan klasifikasi kematangan diketahui, lengan servo akan kembali bekerja untuk mengarahkan buah ke tempat penampungan yang sesuai. Dengan demikian, setiap buah tidak hanya diklasifikasikan berdasarkan tingkat kematangannya, tetapi juga memiliki informasi ukuran sesuai standar SNI 4491:2009. Seluruh hasil klasifikasi berat dan kematangan dapat dipantau secara real-time melalui platform Telegram, sehingga

petani atau operator dapat langsung menerima notifikasi di perangkat seluler tanpa perlu campur tangan manual dalam proses sortir.

Dengan menggabungkan sensor kamera, algoritma CNN, sensor berat, serta integrasi Telegram, sistem klasifikasi ini diharapkan menjadi solusi praktis bagi petani dalam menyortir buah belimbing sesuai standar ekspor. Sistem ini meningkatkan konsistensi mutu hasil panen dan mempermudah pengambilan keputusan distribusi, baik untuk pasar lokal maupun ekspor. Pendekatan ini memungkinkan kelompok tani kecil mengakses teknologi sortir otomatis yang sebelumnya hanya dimiliki industri besar, tanpa biaya tinggi atau keahlian khusus. Secara keseluruhan, penelitian ini berkontribusi dalam meningkatkan daya saing hortikultura nasional di pasar global.

1.2. Rumusan Masalah

Adapun Rumusan masalah dari penelitian ini, yaitu:

- 1) Bagaimana merancang dan mengimplementasikan sistem klasifikasi tingkat kematangan buah belimbing secara otomatis berdasarkan citra yang ditangkap kamera ESP32-CAM dan diproses menggunakan algoritma Convolutional Neural Network (CNN), mengintegrasikan hasilnya dengan standar kode ukuran SNI 4491:2009 berdasarkan data berat, serta menghubungkannya ke platform IoT untuk pemantauan hasil sortir secara real-time melalui perangkat seluler?

1.3. Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah yang ditetapkan, diantaranya adalah:

- 1) Penelitian ini hanya difokuskan pada klasifikasi tingkat kematangan buah belimbing (*Averrhoa carambola* L.) berdasarkan citra warna permukaan

yang ditangkap kamera ESP32-CAM serta berat buah, tanpa mempertimbangkan bentuk, ukuran dimensi, atau kondisi kulit (cacat, busuk, dll

- 2) Klasifikasi tingkat kematangan dilakukan menggunakan algoritma Convolutional Neural Network (CNN) yang dilatih dengan dataset citra buah belimbing pada berbagai tingkat kematangan.
- 3) Klasifikasi ukuran buah mengacu pada kode ukuran SNI 4491:2009 berdasarkan berat buah.
- 4) Klasifikasi buah dibatasi pada tiga kategori kematangan: mentah, setengah matang, dan matang sempurna, serta empat kategori berat ukuran SNI (Kode 1, 2, 3, 4).
- 5) Perancangan dan pengujian alat dilakukan secara mandiri di lingkungan rumah, dengan menggunakan sampel buah belimbing yang diperoleh dari pasar buah atau supermarket, sehingga hasil uji tidak merepresentasikan kondisi lapangan secara industri atau skala ekspor sesungguhnya.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini sebagai berikut:

- 1) Merancang dan membangun sistem klasifikasi tingkat kematangan buah belimbing berdasarkan citra yang ditangkap kamera ESP32-CAM menggunakan algoritma Convolutional Neural Network (CNN).
- 2) Mengimplementasikan klasifikasi ukuran buah belimbing berdasarkan kode ukuran SNI 4491:2009 menggunakan data berat yang terukur.

- 3) Mengintegrasikan sistem dengan platform *Internet of Things* (IoT) menggunakan Telegram, sehingga hasil klasifikasi dapat dipantau secara real-time melalui perangkat seluler.

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

- 1) Memberikan solusi yang lebih canggih dan adaptif bagi petani atau pelaku usaha kecil dalam melakukan klasifikasi tingkat kematangan dan ukuran buah belimbing secara otomatis menggunakan kamera ESP32-CAM dan algoritma Convolutional Neural Network (CNN), sehingga dapat meningkatkan konsistensi mutu hasil panen dan memenuhi standar mutu ekspor.
- 2) Menjadi referensi bagi pengembangan sistem klasifikasi berbasis pengolahan citra dan sensor berat dengan pendekatan machine learning, serta sebagai kontribusi dalam penerapan teknologi Internet of Things (IoT) di bidang pertanian dan pascapanen.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Karakteristik Buah Belimbing

Buah belimbing (*Averrhoa carambola* L.) adalah salah satu buah tropis yang berasal dari kawasan Asia Tenggara dan banyak dibudidayakan di Indonesia karena memiliki nilai ekonomi tinggi dan potensi ekspor yang menjanjikan. Buah ini memiliki morfologi khas menyerupai bintang ketika dipotong melintang, dengan lima sisi menyudut yang membentuk segmen-segmen unik (Fan et al., 2020).

Secara botani, belimbing termasuk dalam famili Oxalidaceae. Tanaman ini tumbuh sebagai pohon kecil hingga sedang dengan tinggi 6–9 meter, dan memiliki daun majemuk yang tersusun berselang-seling. Buahnya tumbuh menggantung dan mengalami perubahan warna selama pematangan, dari hijau muda saat mentah menjadi kuning keemasan saat matang (Benkeblia, 2018).

Secara morfologis, permukaan kulit buah ini licin, mengilap, dan tipis tanpa lapisan lilin pelindung. Daging buah mengandung kadar air tinggi dan cita rasa bervariasi dari asam hingga manis tergantung varietas dan tingkat kematangan (Hafidz Imaduddin et al., 2017). Kandungan nutrisinya meliputi vitamin C, vitamin A, serat, dan antioksidan, menjadikan buah ini bernilai fungsional sebagai pangan sehat (Laili et al., 2023).

Secara fisiologis, belimbing termasuk buah non-klimakterik, yaitu tidak mengalami proses pematangan lanjutan setelah dipetik dari pohon. Oleh karena itu, kualitas panen harus ditentukan secara tepat saat buah masih tergantung di pohon,

karena tidak terjadi peningkatan rasa atau warna yang signifikan pasca panen (Sundari et al., 2023)

Dalam konteks perdagangan dan ekspor, parameter mutu utama meliputi warna kulit, berat buah, simetri bentuk, dan kebersihan permukaan. Standar SNI 4491:2009 menetapkan bahwa berat dan warna menjadi indikator kunci untuk klasifikasi mutu. Hal ini sangat penting dalam sistem klasifikasi otomatis berbasis sensor yang dikembangkan dalam penelitian ini, karena akurasi dalam mendeteksi karakteristik tersebut berpengaruh langsung pada kualitas dan daya saing produk hortikultura Indonesia (Maliki & Irawan, 2024).

2.2. Tingkat Kematangan Buah Belimbing

Tingkat kematangan merupakan salah satu indikator penting dalam menentukan mutu buah belimbing sebelum didistribusikan. Pemilihan buah pada tahap kematangan yang sesuai sangat penting untuk menjaga kualitas selama proses penyimpanan dan transportasi. Buah yang terlalu mentah berisiko tidak matang sempurna saat sampai ke konsumen, sementara buah yang terlalu matang cenderung cepat mengalami kerusakan (Sundari et al., 2023). Hal ini menjadi krusial terutama untuk buah non-klimakterik seperti belimbing yang tidak mengalami pematangan lanjutan setelah dipetik, sehingga proses panen dan sortasi harus dilakukan dengan ketelitian tinggi.

Dalam standar nasional dan internasional, seperti SNI 4491:2009, klasifikasi mutu buah belimbing umumnya didasarkan pada parameter warna kulit dan berat minimum. Kriteria mutu tersebut meliputi kulit buah yang seragam, bentuk yang utuh dan simetris, serta berat minimal 100 gram untuk pasar nasional.

Di tingkat klasifikasi lokal, mutu buah dibagi dalam tiga kelas utama:

- Kelas Ekspor: Digunakan untuk distribusi ekspor, dengan berat minimal 200 gram, warna kulit seragam (kuning), bentuk buah utuh dan simetris, serta bebas dari cacat seperti bercak busuk atau warna kusam.
- Kelas I: Diperuntukkan bagi pasar lokal premium. Warna kulit harus cukup seragam, dengan toleransi sedikit variasi. Bentuk buah baik dan hanya memperbolehkan cacat ringan.
- Kelas II: Digunakan untuk pasar lokal biasa. Buah dalam kelas ini diperbolehkan memiliki bentuk kurang sempurna dan warna tidak seragam, selama masih layak dikonsumsi.

Dalam sistem otomatisasi yang diusulkan, klasifikasi tingkat kematangan buah belimbing dilakukan berdasarkan citra permukaan buah yang ditangkap kamera ESP32-CAM. Citra ini kemudian diproses menggunakan algoritma Convolutional Neural Network (CNN), yang telah dilatih dengan dataset berisi citra buah pada berbagai tahap kematangan. CNN berfungsi untuk mengenali pola visual pada buah, seperti warna dominan, tekstur kulit, serta transisi warna dari hijau ke kuning. Dengan pendekatan ini, sistem dapat mengklasifikasikan belimbing ke dalam tiga kategori: mentah, setengah matang, dan matang sempurna. Pendekatan berbasis CNN lebih adaptif dibanding metode konvensional karena mampu menangkap variasi warna dan tekstur yang kompleks, sehingga akurasi klasifikasi dapat ditingkatkan.

Proses pematangan belimbing juga dapat dikenali melalui perubahan biokimia. (Sharma et al., 2013) melaporkan bahwa selama pematangan, pH buah meningkat dari 2,40 ke 3,44, disertai penurunan kadar asam dan peningkatan kandungan gula reduksi serta kalsium. Sementara itu, studi (Mampeu Carine ZAH

et al., 2024) menunjukkan bahwa kandungan vitamin C dan fenolik pada buah belimbing juga dipengaruhi oleh musim dan tingkat kematangan, dengan konsentrasi tertinggi pada musim kemarau.

Selain klasifikasi berdasarkan citra untuk menentukan tingkat kematangan, dalam praktik sortir hortikultura berat buah belimbing juga dikelompokkan dalam kode ukuran standar sebagaimana diatur dalam SNI 4491:2009. Berikut ini adalah pembagian kode ukuran tersebut:

Tabel 2.1 Kode Ukuran SNI Buah Belimbing

Kode Ukuran	Rentang Berat (gram)
1	>250
2	201-250
3	151-200
4	100-150

Dengan merumuskan tingkat kematangan secara kuantitatif menggunakan dua parameter ini, sistem otomatisasi dapat mengklasifikasikan buah secara konsisten dan efisien, sehingga meningkatkan keakuratan sortasi sesuai standar mutu pasar.

2.3. Sensor Kamera ESP32-CAM

ESP32-CAM merupakan modul mikrokontroler yang dilengkapi dengan kamera digital OV2640 dan mendukung konektivitas Wi-Fi serta Bluetooth. Modul ini mampu menangkap citra dengan resolusi hingga 2 megapiksel, yang selanjutnya dapat digunakan untuk berbagai aplikasi berbasis pengolahan citra, termasuk sistem klasifikasi berbasis kecerdasan buatan (AI).

ESP32-CAM menggunakan prosesor ESP32-S dengan dual-core 32-bit yang memiliki performa cukup tinggi untuk menjalankan algoritma ringan maupun

model machine learning sederhana. Kamera OV2640 yang terintegrasi pada modul ini mampu menghasilkan citra berformat JPEG dengan ukuran bervariasi, mulai dari QQVGA (160×120 piksel) hingga UXGA (1600×1200 piksel). Dengan fitur ini, ESP32-CAM dapat langsung digunakan untuk akuisisi dataset maupun inferensi model machine learning yang telah ditanamkan dalam bentuk TensorFlow Lite Micro.

Dalam sistem ini, ESP32-CAM digunakan untuk menangkap citra permukaan buah belimbing secara otomatis ketika buah berhenti pada titik baca di atas conveyor. Citra yang dihasilkan kemudian diproses menggunakan algoritma Convolutional Neural Network (CNN) untuk menentukan kategori tingkat kematangan, yaitu mentah, setengah matang, atau matang sempurna. Untuk menjaga konsistensi hasil pembacaan, kamera ditempatkan di dalam ruang tertutup agar pencahayaan eksternal tidak memengaruhi kualitas citra.

Keunggulan utama ESP32-CAM adalah kemampuannya mengintegrasikan fungsi kamera dan mikrokontroler dalam satu modul kecil dengan biaya rendah. Selain itu, modul ini mendukung koneksi nirkabel, sehingga memudahkan integrasi dengan sistem Internet of Things (IoT). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa ESP32-CAM dapat digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti deteksi objek, sistem keamanan, hingga klasifikasi berbasis citra dengan tingkat akurasi yang baik. Hal ini menjadikan ESP32-CAM sebagai pilihan tepat untuk diaplikasikan dalam sistem sortasi otomatis buah belimbing berbasis CNN.

2.4. Sensor Berat Load Cell + Modul HX711

Sensor berat berbasis load cell digunakan untuk mendeteksi massa buah sebagai parameter klasifikasi ukuran. Load cell bekerja berdasarkan prinsip

perubahan resistansi pada strain gauge saat menerima tekanan dari objek di atasnya. Perubahan ini diubah menjadi sinyal listrik yang sangat kecil dan perlu diperkuat agar dapat dibaca oleh mikrokontroler. Di sinilah peran modul HX711 sebagai penguat sinyal dan konverter analog-ke-digital (ADC).

HX711 merupakan modul ADC 24-bit yang dirancang khusus untuk aplikasi pengukuran berat berbasis load cell. Modul ini memiliki resolusi tinggi dan noise rendah, serta mendukung kecepatan sampling 10 Hz atau 80 Hz. HX711 terhubung langsung ke mikrokontroler seperti ESP32 melalui dua pin utama: DT (Data) dan SCK (Clock). Modul ini banyak digunakan dalam sistem penimbangan digital karena kemudahannya dalam integrasi dan tingkat akurasi yang memadai (Sani & Maha, 2017).

Dalam sistem deteksi tingkat kematangan dan ukuran buah belimbing ini, load cell diletakkan di bagian bawah setiap tempat penampungan buah setelah proses penyortiran berdasarkan kematangan. Ketika buah masuk ke tempat penampungan, load cell akan mengukur berat buah secara independen. Mikrokontroler ESP32 kemudian akan memproses data berat ini untuk menentukan kode ukuran buah berdasarkan standar SNI 4491:2009.

Keunggulan penggunaan HX711 dan load cell dalam sistem ini adalah kestabilan data, konsumsi daya rendah, dan kemampuan pengukuran presisi tinggi tanpa komponen tambahan yang kompleks. Modul ini juga mendukung kalibrasi awal untuk menyesuaikan rentang pembacaan dengan kebutuhan aktual di lapangan.

2.5. Mikrokontroler ESP32 Dev Module

ESP32 merupakan mikrokontroler 32-bit berbasis chip Tensilica Xtensa LX6 dual-core yang memiliki kecepatan hingga 240 MHz dan dilengkapi dengan konektivitas WiFi dan Bluetooth terintegrasi. Mikrokontroler ini mendukung hingga 34 pin GPIO, ADC 12-bit, DAC, PWM, I2C, SPI, dan UART, menjadikannya sangat fleksibel untuk berbagai aplikasi Internet of Things (IoT) dan sistem tertanam.

Dalam penelitian ini, ESP32 digunakan sebagai unit kendali utama yang terintegrasi dengan modul ESP32-CAM untuk menangkap citra buah belimbing. Citra yang diperoleh kemudian diproses menggunakan algoritma Convolutional Neural Network (CNN) yang telah ditanamkan pada mikrokontroler dalam bentuk model ringan (TensorFlow Lite Micro). Hasil klasifikasi CNN menentukan tingkat kematangan buah menjadi tiga kategori, yaitu mentah, setengah matang, dan matang sempurna.

Selain itu, ESP32 menerima data dari sensor berat berbasis load cell dengan modul HX711 untuk menentukan kategori ukuran buah sesuai standar SNI 4491:2009. Hasil klasifikasi tingkat kematangan dan ukuran buah kemudian dikirimkan secara real-time ke platform IoT melalui koneksi WiFi dengan aplikasi Telegram, sehingga pengguna dapat memantau proses sortir dari perangkat seluler. ESP32 juga mengendalikan aktuator seperti motor servo, yang berfungsi mengarahkan buah ke tempat penampungan sesuai kategori, serta motor DC yang menggerakkan conveyor. Dengan demikian, ESP32 berperan sebagai pusat kendali yang mengintegrasikan kamera, sensor, dan aktuator dalam sistem klasifikasi otomatis buah belimbing.

Keunggulan ESP32 dibandingkan mikrokontroler konvensional seperti Arduino Uno adalah pada kecepatan prosesor yang lebih tinggi, jumlah pin yang lebih banyak, serta dukungan komunikasi nirkabel yang sudah terintegrasi. Selain itu, harga ESP32 relatif terjangkau dan memiliki komunitas pengguna luas, yang membuatnya ideal untuk pengembangan sistem pintar berbasis IoT.

Dengan seluruh fitur tersebut, ESP32 menjadi pilihan tepat untuk sistem klasifikasi otomatis buah berbasis kamera, algoritma CNN, dan IoT yang membutuhkan pengolahan data real-time serta konektivitas jarak jauh.

2.6. Conveyor dan Aktuator Sortir Otomatis

Sistem conveyor tetap berperan penting dalam proses sortasi otomatis buah, namun alur kerjanya diawali dengan proses penimbangan. Buah belimbing pertama kali diletakkan di atas timbangan load cell untuk memperoleh data berat. Setelah hasil penimbangan terekam oleh mikrokontroler ESP32, sebuah lengan servo akan menggerakkan buah dari timbangan menuju conveyor. Conveyor yang digerakkan oleh motor DC melalui driver motor berfungsi mengangkut buah secara teratur menuju area pembacaan citra.

Saat buah bergerak di atas conveyor, sensor infrared akan mendeteksi keberadaan buah dan menghentikan pergerakan conveyor di dalam box tertutup. Pada titik ini, kamera ESP32-CAM mengambil citra permukaan buah untuk kemudian diproses menggunakan algoritma Convolutional Neural Network (CNN). CNN berfungsi menentukan tingkat kematangan buah (Mentah, Setengah Matang, atau Matang Sempurna) berdasarkan pola warna dan tekstur kulit yang terekam pada citra.

Setelah nilai berat dan tingkat kematangan diketahui, lengan servo kembali berfungsi untuk mengarahkan buah ke jalur sortir atau tempat penampungan yang sesuai dengan hasil klasifikasi. Dengan demikian, setiap buah tidak hanya disortir berdasarkan tingkat kematangan, tetapi juga sudah memiliki informasi ukuran berdasarkan standar SNI 4491:2009 dari hasil penimbangan awal. Integrasi kamera, sensor, mikrokontroler, conveyor, dan aktuator ini menjadikan proses sortasi berlangsung otomatis dan presisi tanpa intervensi manual.

Penelitian oleh (Hetharua et al., 2021) menunjukkan bahwa sistem penyortiran buah tomat menggunakan kamera, mikrokontroler, dan aktuator servo dapat meningkatkan efisiensi serta akurasi proses sortasi. Sistem tersebut berhasil mengklasifikasikan buah berdasarkan tingkat kematangan dengan tingkat keberhasilan yang tinggi, serta memungkinkan monitoring hasil sortasi secara real-time melalui antarmuka pengguna.

Dengan penerapan sistem conveyor dan aktuator sortir otomatis ini, proses klasifikasi buah dapat dilakukan dengan lebih cepat, efisien, dan konsisten, sekaligus mengurangi potensi kesalahan manusia dalam proses seleksi manual.

2.7. Convolution Neural Network (CNN)

Convolutional Neural Network (CNN) merupakan salah satu algoritma deep learning yang sangat populer dalam bidang pengolahan citra digital (image processing). CNN bekerja dengan cara mengekstraksi fitur-fitur penting dari citra, seperti warna, tekstur, bentuk, maupun pola visual lainnya, kemudian menggunakan fitur tersebut untuk mengklasifikasikan objek ke dalam kategori tertentu .

Secara umum, arsitektur CNN terdiri dari beberapa lapisan utama:

- 1) Convolution Layer – berfungsi mengekstraksi fitur dari citra masukan melalui filter (kernel) yang mendeteksi tepi, tekstur, dan pola warna.
- 2) Pooling Layer – melakukan reduksi dimensi (downsampling) sehingga ukuran data lebih kecil, mempercepat komputasi, dan mencegah overfitting.
- 3) Fully Connected Layer – mengubah hasil ekstraksi fitur menjadi representasi vektor yang digunakan untuk klasifikasi.
- 4) Activation Function – seperti ReLU atau Softmax, yang menambahkan sifat non-linear dan memberikan nilai probabilitas untuk setiap kategori.

Dalam penelitian ini, CNN digunakan untuk klasifikasi tingkat kematangan buah belimbing berdasarkan citra permukaan buah yang ditangkap kamera ESP32-CAM. Dataset citra belimbing dikumpulkan terlebih dahulu dan diberi label sesuai kategori kematangan: mentah, setengah matang, dan matang sempurna. Dataset ini digunakan untuk melatih model CNN di komputer menggunakan framework TensorFlow/Keras.

Setelah model CNN selesai dilatih dan memiliki akurasi yang memadai, model dikonversi ke format TensorFlow Lite Micro agar dapat dijalankan langsung di perangkat ESP32-CAM. Proses inferensi dilakukan secara real-time: setiap citra yang ditangkap kamera diproses oleh CNN untuk menentukan kategori kematangan.

Hasil klasifikasi CNN kemudian digabungkan dengan data berat dari sensor load cell untuk menentukan kategori ukuran sesuai standar SNI 4491:2009. Informasi tingkat kematangan dan ukuran buah dikirimkan secara real-time ke aplikasi Telegram melalui koneksi Wi-Fi, sehingga pengguna dapat langsung memantau hasil sortir pada perangkat seluler.

Keunggulan penggunaan CNN dibandingkan metode konvensional adalah kemampuannya mengenali pola visual yang kompleks dan lebih adaptif terhadap variasi kondisi pencahayaan maupun tekstur permukaan buah. Dengan demikian, sistem klasifikasi belimbing berbasis ESP32-CAM + CNN diharapkan mampu memberikan hasil yang lebih akurat, konsisten, dan efisien dalam proses sortasi otomatis.

2.8. Internet of Things (IoT) dalam Sistem Sortasi

Internet of Things (IoT) merupakan konsep yang menghubungkan berbagai perangkat fisik yang dilengkapi sensor, aktuator, dan modul komunikasi agar dapat bertukar data secara otomatis melalui jaringan internet. Dalam bidang pertanian modern, IoT telah banyak digunakan untuk meningkatkan efisiensi dan presisi dalam kegiatan monitoring, kontrol, serta pengambilan keputusan berbasis data secara real-time (Seetaram et al., 2024).

Pada penelitian ini, teknologi IoT diimplementasikan untuk mendukung proses klasifikasi otomatis buah belimbing agar hasilnya dapat dipantau dari jarak jauh melalui aplikasi Telegram. Sistem dibangun dengan pembagian fungsi perangkat sebagai berikut:

- 1) ESP32-CAM berperan sebagai unit akuisisi dan pengolah citra. Modul ini menangkap gambar buah belimbing dan memprosesnya menggunakan algoritma Convolutional Neural Network (CNN) untuk menentukan tingkat kematangan (mentah, setengah matang, matang). Dengan demikian, ESP32-CAM berfokus pada aspek kecerdasan buatan.
- 2) ESP32 Dev Module bertindak sebagai unit integrasi dan pengendali utama. Modul ini menerima hasil klasifikasi kematangan dari ESP32-CAM,

membaca data berat buah melalui sensor load cell dengan modul HX711, kemudian menggabungkan kedua informasi tersebut. Setelah itu, ESP32 Dev Module mengirimkan data akhir berupa tingkat kematangan dan kode ukuran sesuai standar SNI 4491:2009 ke akun Telegram pengguna melalui koneksi WiFi. Selain itu, modul ini juga mengendalikan aktuator seperti servo dan motor conveyor untuk mengatur jalur sortir buah sesuai hasil klasifikasi.

Penelitian oleh Satria et al. (2024) menegaskan bahwa ESP32 merupakan platform yang ideal untuk sistem IoT di sektor pertanian karena efisiensi konsumsi daya, kecepatan pemrosesan data, serta kestabilan koneksi nirkabel di lapangan. Dengan menggabungkan kemampuan pengolahan citra berbasis CNN dari ESP32-CAM dan fungsi kontrol serta komunikasi IoT pada ESP32 Dev Module, sistem ini tidak hanya mampu menyortir buah secara otomatis, tetapi juga memberikan akses monitoring hasil sortasi secara real-time kepada pengguna.

Melalui penerapan IoT, proses klasifikasi buah belimbing menjadi lebih modern, adaptif, dan terintegrasi. Informasi yang dikirim secara otomatis ke Telegram memungkinkan petani atau operator untuk memantau mutu hasil panen tanpa harus selalu berada di lokasi, sehingga meningkatkan kecepatan, ketepatan, dan konsistensi dalam pengelolaan hasil pertanian.

2.9. Penelitian Terdahulu

Penelitian terkait klasifikasi buah dan sistem sortasi otomatis telah banyak dilakukan dengan berbagai pendekatan. Beberapa studi sebelumnya berfokus pada penggunaan teknologi pengolahan citra digital untuk mendeteksi tingkat kematangan buah. Misalnya, (Sundari et al., 2023) menggunakan transformasi

warna HSI untuk mengklasifikasi tiga tingkat kematangan belimbing, sementara (Ibnutama et al., 2023) memanfaatkan ruang warna CMYK. Selain itu, (Setiawan et al., 2020) mengaplikasikan fitur tekstur melalui metode Grey Level Co-occurrence Matrix (GLCM) untuk klasifikasi mutu buah belimbing. Meskipun pendekatan berbasis citra digital ini menunjukkan akurasi tinggi dalam kondisi laboratorium, ketergantungannya pada kamera resolusi tinggi, pencahayaan stabil, dan perangkat komputasi khusus seringkali menjadi kendala dalam implementasi di tingkat petani kecil karena kurang praktis dan biaya yang tinggi.

Beberapa penelitian lain mengusulkan penggunaan sensor non-visual, seperti sensor warna TCS3200, untuk mendeteksi tingkat kematangan buah dengan metode threshold sederhana. Pendekatan ini lebih ringan secara komputasi, namun memiliki keterbatasan karena hanya bergantung pada nilai RGB, sehingga kurang adaptif terhadap variasi pencahayaan dan tekstur permukaan buah.

Studi-studi terdahulu tersebut memberikan landasan penting bagi penelitian ini, terutama dalam hal kebutuhan sistem klasifikasi yang lebih akurat, efisien, dan aplikatif. Gap yang diatasi dalam penelitian ini adalah dengan menggunakan modul ESP32-CAM yang dilengkapi kamera bawaan untuk menangkap citra buah, serta menerapkan algoritma Convolutional Neural Network (CNN) dalam klasifikasi tingkat kematangan. CNN dipilih karena mampu mengekstraksi fitur citra yang kompleks (warna, tekstur, pola visual) dan lebih adaptif terhadap variasi kondisi lingkungan dibandingkan metode threshold.

Selain klasifikasi kematangan berbasis citra, penelitian ini juga mengintegrasikan sensor berat (load cell + HX711) untuk menentukan kategori ukuran buah sesuai standar SNI 4491:2009. Hasil klasifikasi tingkat kematangan

dan ukuran buah kemudian dikirimkan secara real-time melalui platform Telegram dengan dukungan mikrokontroler ESP32 Dev Module, sehingga sistem ini tidak hanya otomatis, tetapi juga dapat dipantau jarak jauh.

Dengan pendekatan ini, penelitian ini menawarkan sistem klasifikasi buah belimbing yang lebih praktis, terjangkau, dan adaptif untuk diterapkan di tingkat petani kecil, sekaligus mendukung peningkatan konsistensi mutu hasil panen agar sesuai standar pasar lokal maupun ekspor.

Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu

No	Peneliti	Judul	Hasil Penelitian
1	Siti Sundari, Indah Natalia Siburian, dan Nur Wulan (2023)	Mendeteksi Tingkat Kematangan Belimbing Berdasarkan Fitur Warna Menggunakan Transformasi Ruang Warna HSI	Penelitian berhasil membangun sistem deteksi tingkat kematangan belimbing menggunakan transformasi warna HSI. Sampel citra belimbing diproses dalam Matlab untuk mengekstrak nilai RGB dan dikonversi ke HSI. Sistem mampu membedakan tiga tingkat kematangan (mentah, setengah matang, matang) dengan akurasi mencapai 85%.
2	Khairi Ibnutama, Mhd Gilang Suryanata, Rika Oktia Putri, dan Afdal Al Hafiz (2023)	Seleksi Tingkat Kematangan Citra Buah Belimbing Menggunakan Ruang Warna CMYK	Sistem deteksi kematangan dibuat dengan mengonversi citra RGB ke ruang warna CMYK, menggunakan referensi nilai min dan max dari 4 komponen warna. Dari 40 gambar buah belimbing yang digunakan, sistem mampu mengklasifikasikan kematangan menjadi 4 tingkat (mentah, setengah matang, matang, terlalu matang) dengan akurasi sebesar 86,66%.
3	M. Debby Candra Setiawan,	Klasifikasi Mutu Buah Belimbing (Averrhoa	Penelitian ini mengklasifikasikan mutu buah belimbing ke dalam 3 kelas (Grade A, B, C)

	Intan Nur Farida, Ratih Kumalasari Niswatin (2020)	carambola L.) menggunakan metode GLCM (Gray Level Co-occurrence Matrix)	menggunakan metode GLCM sebagai ekstraksi ciri dan LVQ sebagai metode pelatihan. Mutu buah belimbing ditentukan dengan menganalisis fitur warna dan tekstur dari citra digital belimbing. Hasil klasifikasi untuk Grade B menunjukkan prediksi salah yang paling dominan.
4	S. Mardiyah (2025)	Analisis Berat dan Ukuran Buah Nanas sebagai Indikator Tingkat Kematangan	Penelitian ini meneliti hubungan antara berat, ukuran (Geometric Mean Diameter/GMD), dan tingkat kematangan buah nanas. Hasilnya menunjukkan bahwa berat buah meningkat seiring dengan bertambahnya tingkat kematangan, yaitu dari rata-rata 883 gram pada buah mentah hingga mencapai 975 gram pada buah sangat matang. Ukuran (GMD) juga meningkat dari 12,44 cm ³ menjadi 13,48 cm ³ . Penelitian ini menyimpulkan bahwa berat merupakan indikator non-destruktif yang relevan dalam penentuan tingkat kematangan buah, meskipun tidak selalu cukup sensitif dibanding parameter lain seperti tekstur dan kandungan padatan terlarut. Temuan ini memperkuat bahwa pengukuran berat dapat dipadukan dengan parameter visual untuk menghasilkan klasifikasi kematangan yang lebih akurat.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Jenis dan pendekatan penelitian

Penelitian ini termasuk dalam kategori penelitian kuantitatif dengan pendekatan eksperimen (experimental research). Penelitian kuantitatif dipilih karena data yang diperoleh berupa angka, seperti nilai berat buah dalam gram, hasil klasifikasi tingkat kematangan, serta persentase akurasi sistem. Sementara itu, pendekatan eksperimen digunakan karena penelitian ini melibatkan proses perancangan, pembuatan, dan pengujian prototipe sistem klasifikasi otomatis buah belimbing.

Sistem yang dikembangkan memanfaatkan ESP32-CAM untuk menangkap citra permukaan buah belimbing yang kemudian diproses menggunakan algoritma Convolutional Neural Network (CNN) guna menentukan tingkat kematangan. Selain itu, digunakan sensor berat (load cell dengan modul HX711) untuk mengukur berat buah sebagai dasar klasifikasi ukuran sesuai standar SNI 4491:2009.

Hasil klasifikasi kematangan dan ukuran buah diproses secara otomatis oleh mikrokontroler ESP32 Dev Module, kemudian buah diarahkan ke tempat penampungan dengan bantuan conveyor dan motor servo. Seluruh hasil klasifikasi dikirimkan secara real-time melalui aplikasi Telegram sebagai bagian dari integrasi Internet of Things (IoT).

Dengan pendekatan kuantitatif-eksperimen ini, penelitian diharapkan dapat menghasilkan sistem klasifikasi buah belimbing yang akurat, efisien, serta mudah

diimplementasikan untuk mendukung peningkatan mutu hasil panen sesuai standar pasar lokal maupun ekspor.

3.2. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini direncanakan dilaksanakan selama kurang lebih 2 bulan, terhitung sejak awal Juni hingga awal agustus 2025. Dalam rentang waktu tersebut, peneliti akan melakukan serangkaian tahapan mulai dari perancangan dan perakitan perangkat keras, penulisan dan pengujian program mikrokontroler, pengumpulan data sampel buah untuk penentuan dan pengujian nilai threshold, hingga pengujian dan evaluasi kinerja sistem klasifikasi secara keseluruhan.

Adapun lokasi pelaksanaan penelitian dilakukan di dua tempat utama. Perakitan alat, pemrograman mikrokontroler ESP32, dan pengujian awal sistem dilakukan di rumah peneliti yang beralamat di Jl. K.L. Yos Sudarso No.123, Medan Deli, Kota Medan. Lokasi ini dipilih karena mendukung ketersediaan ruang dan fasilitas dasar yang memadai untuk melakukan eksperimen berbasis mikrokontroler dan sensor. Sementara itu, pengambilan sampel buah belimbing dilakukan di beberapa pasar buah dan supermarket di Kota Medan, guna memperoleh variasi tingkat kematangan buah dari kondisi nyata di lapangan yang akan digunakan untuk menentukan dan memvalidasi nilai ambang threshold pada klasifikasi sistem.

3.3. Alat dan Bahan Penelitian

Penelitian ini memerlukan beberapa alat dan bahan utama, yang dikelompokkan menjadi komponen perangkat keras, perangkat lunak, dan bahan uji.

3.3.1. Komponen Perangkat Keras

- 1) **ESP32 Dev Module:** Berfungsi sebagai unit pengendali utama. Modul ini menerima hasil klasifikasi tingkat kematangan dari ESP32-CAM, membaca input dari sensor berat, mengendalikan aktuator (servo dan motor DC), serta mengirimkan hasil klasifikasi akhir (tingkat kematangan dan kode ukuran) ke platform IoT melalui aplikasi Telegram.
- 2) **ESP32-CAM (dengan kamera OV2640):** Digunakan untuk menangkap citra permukaan kulit buah belimbing. Citra tersebut diproses menggunakan algoritma Convolutional Neural Network (CNN) untuk menentukan tingkat kematangan buah secara otomatis (mentah, setengah matang, atau matang sempurna).
- 3) **Sensor Berat (Load Cell + Modul HX711):** Kombinasi load cell sebagai transduser massa dan modul HX711 sebagai penguat sinyal serta konverter analog-ke-digital (ADC) 24-bit. Dalam sistem ini, load cell digunakan untuk mengukur massa buah dalam satuan gram dengan ketelitian tinggi. Data berat ini menjadi dasar klasifikasi ukuran buah sesuai standar SNI 4491:2009.
- 4) **Sensor Infrared (IR Obstacle Sensor):** Sensor proximity yang digunakan untuk mendeteksi keberadaan buah di atas conveyor. Saat buah terdeteksi, conveyor akan berhenti sejenak sehingga ESP32-CAM dapat mengambil citra buah untuk proses klasifikasi.
- 5) **Motor Servo SG90:** Aktuator yang digunakan untuk mengarahkan buah ke jalur sortir sesuai hasil klasifikasi sistem. Motor servo akan bergerak pada

sudut tertentu untuk memisahkan buah ke wadah atau tempat penampungan yang telah ditentukan.

- 6) **Motor DC + Driver Motor (misalnya L298N):** Motor DC digunakan untuk menggerakkan conveyor, sedangkan driver motor berfungsi untuk mengendalikan kecepatan dan arah putaran motor sesuai instruksi dari ESP32 Dev Module.
- 7) **Mini Conveyor:** Platform mekanis yang berfungsi sebagai alat pemindah buah secara otomatis dari titik input menuju titik pembacaan citra, kemudian ke jalur sortir sesuai hasil klasifikasi.
- 8) **Breadboard dan Kabel Jumper:** Digunakan sebagai media penghubung sementara antar komponen elektronik selama tahap perakitan, pengujian, dan debugging sistem.
- 9) **Power Supply:** Sumber daya listrik yang stabil untuk mengoperasikan seluruh komponen elektronik sistem (misalnya adaptor DC 5V atau *power bank*).
- 10) **Smartphone:** Perangkat seluler yang digunakan untuk memantau hasil klasifikasi buah (kematangan dan ukuran SNI) secara *real-time* melalui aplikasi Telegram.

3.3.2. Perangkat Lunak

- 1) **Arduino IDE:** Digunakan untuk menulis, mengompilasi, dan mengunggah program ke modul ESP32 (ESP32-CAM dan ESP32 Dev Module). Arduino IDE juga dipakai untuk debugging dan monitoring komunikasi serial antar sensor, aktuator, dan mikrokontroler.

- 2) **Edge Impulse Studio:** Merupakan platform *machine learning* berbasis cloud yang digunakan untuk membangun model klasifikasi tingkat kematangan buah. Pada penelitian ini, Edge Impulse digunakan untuk:
 - 1) Mengumpulkan dan mengelola dataset citra buah belimbing.
 - 2) Melatih model Convolutional Neural Network (CNN) berbasis citra.
 - 3) Melakukan validasi model untuk mengukur akurasi klasifikasi.
 - 4) Mengekspor model dalam format Edge Impulse firmware yang kompatibel dengan ESP32-CAM.
- 3) **Library Edge Impulse for ESP32-CAM:** Library resmi dari Edge Impulse yang di-deploy melalui Arduino IDE. Library ini memungkinkan ESP32-CAM menjalankan model CNN hasil pelatihan untuk melakukan klasifikasi citra buah secara real-time.
- 4) **Telegram App:** Aplikasi pesan instan yang digunakan sebagai platform notifikasi otomatis. Berfungsi untuk mengirimkan hasil klasifikasi tingkat kematangan dan ukuran buah (kode SNI) secara real-time dari ESP32 ke pengguna dalam bentuk pesan teks melalui bot Telegram.
- 5) **Microsoft Excel / Spreadsheet:** Digunakan untuk merekap data hasil pengujian, serta melakukan analisis statistik dasar terhadap performa sistem.

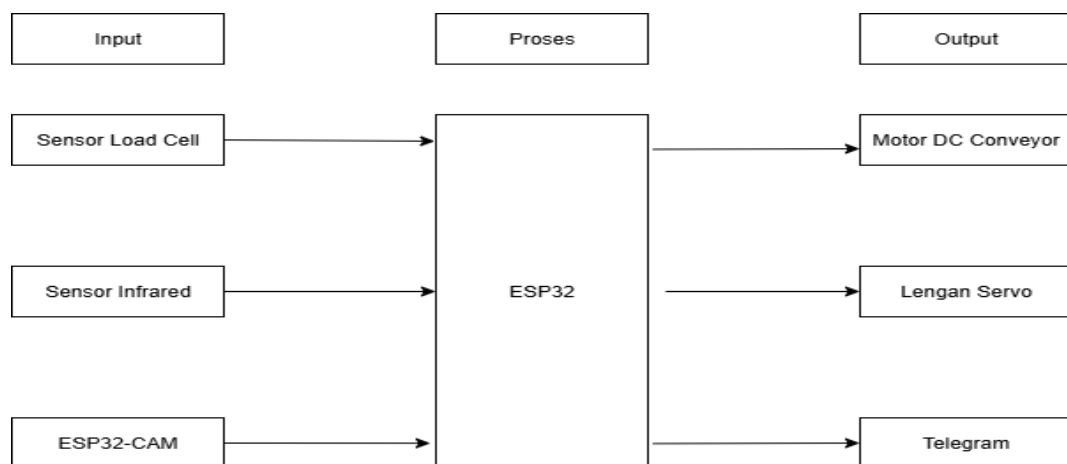
3.3.3. Bahan Uji

- 1) **Buah Belimbing Manis (*Averrhoa carambola*):** Sampel buah belimbing manis akan diperoleh dari pasar tradisional dan supermarket di Kota Medan. Jumlah sampel yang digunakan adalah sekitar 20–30 buah dengan variasi tingkat kematangan (mentah, setengah matang, matang sempurna)

3.4. Perancangan Diagram Blok Sistem

Diagram blok sistem merupakan representasi visual dari hubungan antar komponen utama yang digunakan dalam sistem deteksi tingkat kematangan dan ukuran buah belimbing. Diagram ini bertujuan untuk memudahkan pemahaman alur kerja sistem secara menyeluruh, mulai dari proses pendeteksian buah hingga klasifikasi, sortir, dan pengukuran berat akhir.

Sistem ini terdiri dari beberapa komponen utama: Sensor berat Load Cell + HX711, Sensor Infrared (IR), ESP32-CAM, Mikrokontroler ESP32, Motor DC Conveyor, Motor Servo, dan Platform Telegram. Setiap komponen saling terhubung dan berfungsi sesuai tugasnya masing-masing. Bisa dilihat pada gambar 3.1 dibawah ini:



Gambar 3.1 Diagram Blok Sistem

3.5. Perancangan Flowchart Sistem

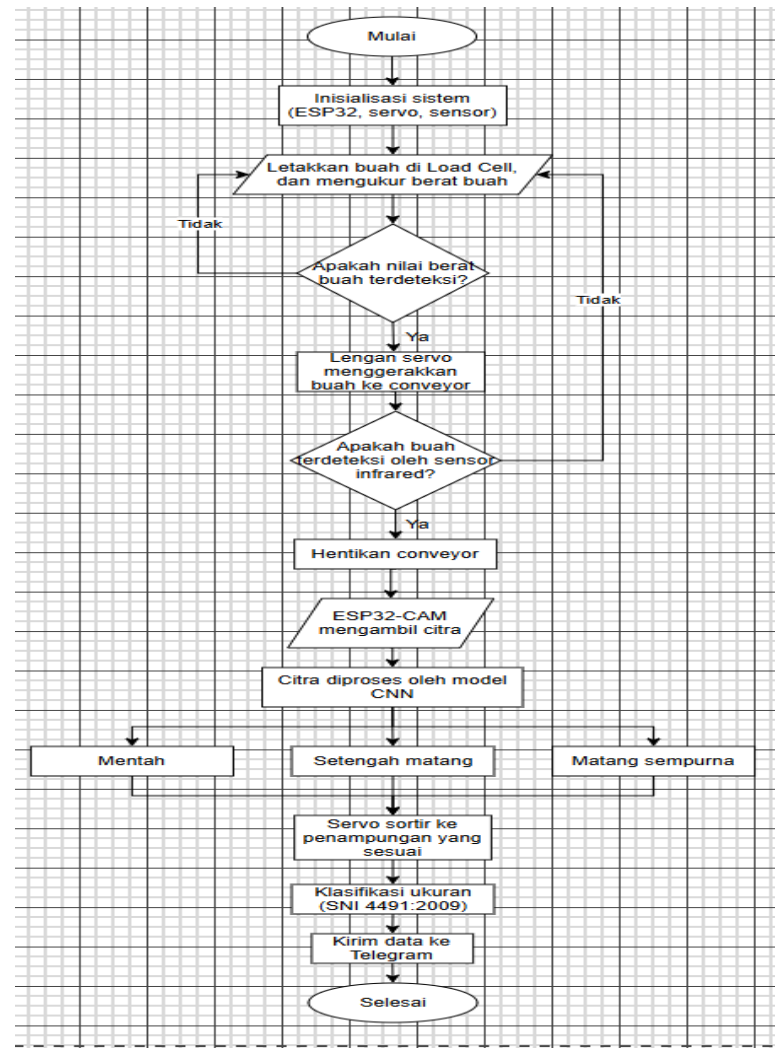
Flowchart sistem pada penelitian ini menggambarkan alur kerja menyeluruh dari proses klasifikasi otomatis tingkat kematangan dan ukuran buah belimbing menggunakan modul ESP32-CAM dan sensor berat berbasis mikrokontroler ESP32. Proses diawali dengan buah belimbing diletakkan pada timbangan load

cell, sehingga diperoleh data berat. Data berat ini diproses untuk menentukan kode ukuran buah berdasarkan standar SNI 4491:2009.

Setelah penimbangan selesai, sebuah lengan servo menggerakkan buah dari timbangan menuju conveyor. Buah yang bergerak di atas conveyor kemudian dideteksi oleh sensor infrared, yang berfungsi menghentikan pergerakan conveyor agar proses pengambilan citra dapat dilakukan dengan akurat. Modul ESP32-CAM mengambil citra permukaan buah belimbing, kemudian citra tersebut diproses menggunakan algoritma Convolutional Neural Network (CNN) yang telah dilatih melalui Edge Impulse untuk menentukan kategori kematangan: Mentah, Setengah Matang, atau Matang Sempurna.

Hasil klasifikasi kematangan dari ESP32-CAM kemudian dikirim ke ESP32 Dev Module. Modul ini menggabungkan data kematangan dengan hasil pengukuran berat, lalu menentukan kategori akhir berupa tingkat kematangan dan kode ukuran. Berdasarkan kombinasi hasil tersebut, servo sortir akan mengarahkan buah ke tempat penampungan yang sesuai.

Seluruh hasil klasifikasi, baik tingkat kematangan maupun ukuran buah, dikirim secara real-time melalui koneksi WiFi ke aplikasi Telegram, sehingga pengguna dapat memantau proses sortir langsung melalui perangkat seluler. Dengan alur ini, sistem mampu menyortir buah secara otomatis, efisien, dan konsisten tanpa memerlukan intervensi manual. Bisa dilihat pada gambar 3.2



Gambar 3.2 Flowchart Sistem

3.6. Metode Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data dalam penelitian ini berfokus pada pendekatan eksperimen, yaitu dengan melakukan uji langsung terhadap sampel buah belimbing. Tujuan utama dari proses ini adalah untuk mengumpulkan data citra dan data berat sebagai dasar pelatihan model Convolutional Neural Network (CNN), serta untuk menguji akurasi keseluruhan sistem dalam mendeteksi, mengklasifikasikan, dan mengukur buah. Pengumpulan data dilaksanakan melalui beberapa tahapan sebagai berikut:

- 1) **Pengambilan Sampel Buah Belimbing:** Buah belimbing manis diambil secara acak dari berbagai lokasi, seperti pasar buah dan supermarket di Kota Medan. Pemilihan sampel mempertimbangkan variasi visual tingkat kematangan (mulai dari mentah, setengah matang, hingga matang sempurna) untuk merepresentasikan kondisi buah yang beragam di lapangan. Setiap buah yang diambil akan diberi label manual berdasarkan tingkat kematangannya; label ini berfungsi sebagai *ground truth* atau data kebenaran.
- 2) **Pengambilan Citra dengan ESP32-CAM (Dataset Training CNN):** Sampel buah difoto menggunakan modul ESP32-CAM dari berbagai sudut dan kondisi pencahayaan yang dikendalikan agar konsisten. Citra yang diperoleh digunakan sebagai dataset pelatihan model CNN melalui platform Edge Impulse. Dataset ini terdiri dari tiga kelas utama: mentah, setengah matang, dan matang sempurna. Proses ini bertujuan agar CNN dapat belajar mengenali pola warna, tekstur, dan bentuk buah yang berbeda pada setiap tingkat kematangan.
- 3) **Pengukuran Berat dan Klasifikasi Ukuran (SNI 4491:2009):** Setelah pengambilan citra, buah diletakkan pada timbangan load cell + HX711 untuk mengukur beratnya. Nilai berat tersebut direkam dan dikategorikan ke dalam kelas ukuran standar sesuai SNI 4491:2009 (Kode 1, 2, 3, atau 4). Data berat ini menjadi salah satu parameter pendukung klasifikasi otomatis.
- 4) **Klasifikasi Otomatis Kematangan dan Sortir:** Model CNN yang sudah dilatih kemudian di-deploy ke modul ESP32-CAM untuk melakukan klasifikasi citra buah secara real-time. ESP32-CAM mengirim hasil

klasifikasi kematangan ke ESP32 Dev Module, yang juga menerima input berat dari load cell. Berdasarkan kombinasi kedua informasi ini (tingkat kematangan + kode ukuran), sistem mengendalikan motor servo untuk mengarahkan buah ke tempat penampungan yang sesuai.

- 5) **Verifikasi Visual Manual:** Setiap hasil klasifikasi otomatis yang dihasilkan oleh sistem diverifikasi secara manual oleh peneliti. Verifikasi ini didasarkan pada observasi visual terhadap warna kulit, tekstur, dan ukuran buah, serta pengukuran berat manual bila diperlukan. Tahap ini penting untuk membandingkan akurasi sistem dengan penilaian manusia sebagai *ground truth*, sehingga kinerja sistem dapat dievaluasi secara objektif..

3.7. Prosedur Penelitian

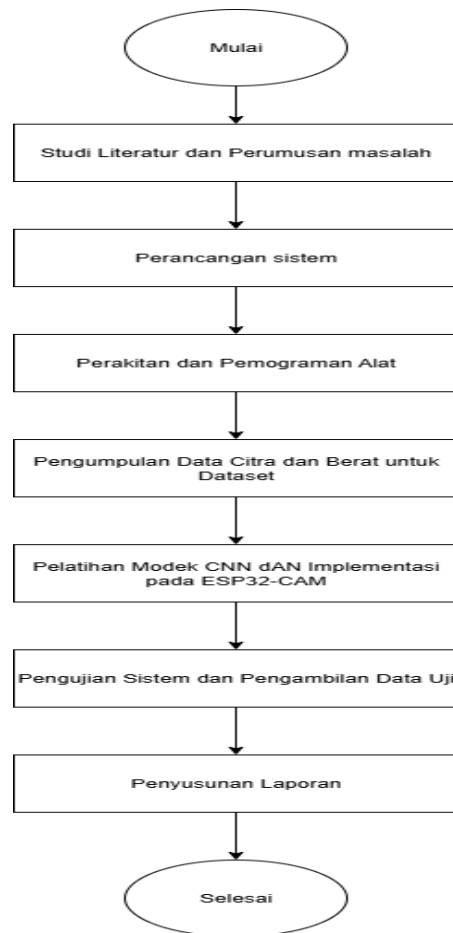
Prosedur penelitian ini dirancang secara sistematis untuk memastikan setiap tahapan pelaksanaan berjalan terarah dan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan. Prosesnya mencakup desain perangkat keras dan lunak, perakitan sistem, pengumpulan dan persiapan data citra untuk pelatihan model CNN, implementasi klasifikasi otomatis, hingga analisis hasil. Tahapan-tahapan penelitian dijabarkan sebagai berikut:

- 1) **Studi Literatur dan Perumusan Masalah:** Tahap ini melibatkan pencarian dan kajian mendalam terhadap berbagai sumber literatur, seperti jurnal, artikel ilmiah, serta standar mutu SNI. Fokus literatur meliputi karakteristik buah belimbing, metode klasifikasi berbasis pengolahan citra, penerapan algoritma Convolutional Neural Network (CNN) dalam deteksi kematangan buah, serta integrasi sistem Internet of Things (IoT) untuk aplikasi pertanian. Hasil studi ini krusial untuk memperkuat landasan teori,

merumuskan masalah penelitian secara spesifik, dan menentukan pendekatan metodologi yang paling tepat.

- 2) **Perancangan Sistem:** Proses ini mencakup perancangan detail arsitektur sistem klasifikasi kematangan dan ukuran buah belimbing secara terintegrasi. Perancangan meliputi sirkuit elektronik untuk menghubungkan ESP32-CAM, sensor load cell + HX711, ESP32 Dev Module, motor servo, dan motor DC conveyor. Selain itu, dilakukan perancangan mekanik untuk sistem conveyor dan aktuator sortir, serta perancangan integrasi IoT untuk pengiriman data hasil klasifikasi ke aplikasi Telegram.
- 3) **Perakitan dan Pemrograman Alat:** Tahap ini dimulai dengan perakitan fisik komponen elektronik pada breadboard atau PCB sesuai rancangan yang telah dibuat. Selanjutnya, dilakukan pemrograman pada ESP32-CAM untuk menjalankan model CNN hasil pelatihan dari Edge Impulse, serta pemrograman ESP32 Dev Module untuk menggabungkan data hasil klasifikasi kematangan dengan data berat buah, mengendalikan aktuator (servo dan motor DC), dan mengirimkan hasil klasifikasi ke Telegram.
- 4) **Pengumpulan Data Citra dan Berat untuk Dataset:** Mengumpulkan sampel buah belimbing (sekitar 20–30 buah) dengan variasi tingkat kematangan (mentah, setengah matang, matang sempurna). Buah difoto menggunakan ESP32-CAM untuk menghasilkan dataset citra yang digunakan dalam pelatihan model CNN di Edge Impulse. Selain itu, setiap buah juga diukur beratnya menggunakan load cell untuk diklasifikasikan ke dalam kode ukuran SNI 4491:2009. Seluruh data diberi label manual sebagai *ground truth*.

- 5) **Pelatihan Model CNN dan Implementasi pada ESP32-CAM:** Dataset citra yang sudah terkumpul digunakan untuk melatih model CNN melalui Edge Impulse. Setelah model mencapai akurasi yang memadai, model diekspor dan di-*deploy* pada ESP32-CAM. Dengan demikian, ESP32-CAM dapat secara langsung mengklasifikasikan tingkat kematangan buah belimbing dalam kondisi real-time.
- 6) **Pengujian Sistem dan Pengambilan Data Uji:** Pengujian dilakukan dengan menggunakan sampel buah belimbing baru yang berbeda dari data pelatihan. Sistem bekerja secara otomatis mulai dari mendeteksi keberadaan buah dengan sensor IR, menghentikan conveyor, mengambil citra dengan ESP32-CAM, mengklasifikasikan kematangan dengan CNN, membaca berat buah menggunakan load cell, hingga menggabungkan hasil klasifikasi. Berdasarkan kombinasi data tersebut, motor servo menyortir buah ke tempat penampungan sesuai kategori. Seluruh hasil klasifikasi (kematangan + ukuran) dikirim secara real-time ke aplikasi Telegram dan dibandingkan dengan data manual (*ground truth*) untuk mengevaluasi akurasi sistem.
- 7) **Penyusunan Laporan:** Seluruh tahapan penelitian, mulai dari perancangan, implementasi, pengujian, hingga analisis dan evaluasi, akan didokumentasikan secara sistematis ke dalam laporan skripsi. Laporan ini akan memuat penyajian data, pembahasan hasil, kesimpulan yang diperoleh, serta saran-saran untuk pengembangan penelitian lebih lanjut.



Gambar 3.3 Alur Prosedur Penelitian

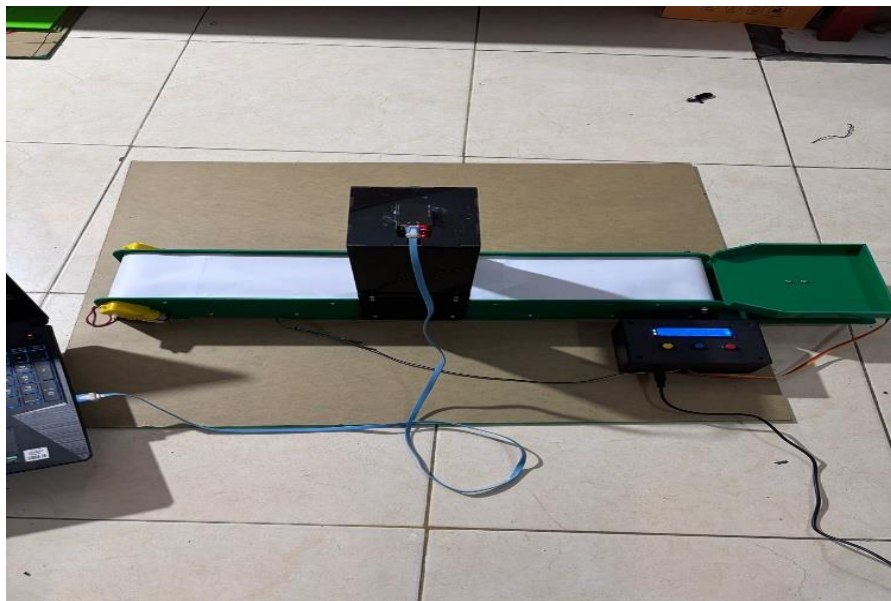
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Desain dan Implementasi Sistem

Sistem klasifikasi buah belimbing yang dikembangkan dalam penelitian ini berhasil diwujudkan dalam bentuk prototipe berbasis ESP32-CAM untuk klasifikasi citra, load cell + HX711 untuk pengukuran berat, serta ESP32 Dev Module sebagai pusat kendali sistem. Alat ini mampu bekerja secara otomatis mulai dari penimbangan, pengambilan citra, klasifikasi tingkat kematangan menggunakan Convolutional Neural Network (CNN), hingga penyortiran buah dengan motor servo dan conveyor.

Selain itu, hasil klasifikasi dapat dikirimkan ke aplikasi Telegram melalui koneksi WiFi sehingga pengguna dapat memantau proses secara real-time. Dengan demikian, sistem ini bukan hanya membantu proses sortir, tetapi juga meningkatkan akurasi dan konsistensi mutu buah sesuai standar SNI 4491:2009.

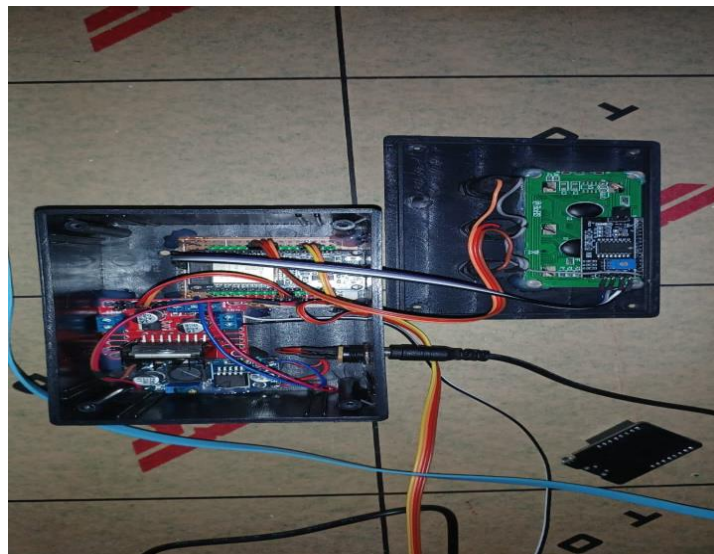


Gambar 4.1 Bentuk Fisik Conveyor

4.2. Data Pengujian Sensor

Perangkat keras disusun di atas papan akrilik sederhana agar lebih rapi dan mudah dipindahkan. Bagian penimbangan buah menggunakan load cell + HX711, yang diletakkan di awal alur sistem. Setelah ditimbang, buah diarahkan ke conveyor miniatur yang digerakkan oleh motor DC.

Sensor infrared (IR) dipasang di sisi conveyor untuk mendeteksi keberadaan buah. Saat sensor aktif, conveyor berhenti agar ESP32-CAM dapat menangkap citra buah dengan sudut yang konsisten. Pada ujung conveyor, motor servo sortir berfungsi mengarahkan buah ke wadah penampungan sesuai hasil klasifikasi. Semua sensor dan aktuator terhubung ke ESP32 Dev Module yang bertindak sebagai pengendali utama.



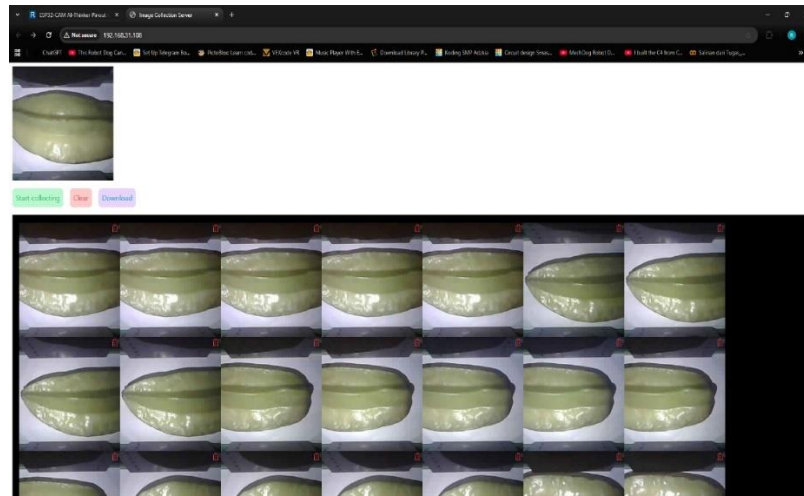
Gambar 4.2 ESP-32 Dev Module

4.3. Implementasi Perangkat Lunak

Perangkat lunak terdiri dari pemrograman ESP32-CAM dan ESP32 Dev Module, serta integrasi model CNN yang dilatih menggunakan Edge Impulse.

1. **Pelatihan Model CNN** = Dataset citra buah belimbing dikumpulkan dengan variasi mentah, setengah matang, dan matang sempurna. Model CNN dilatih

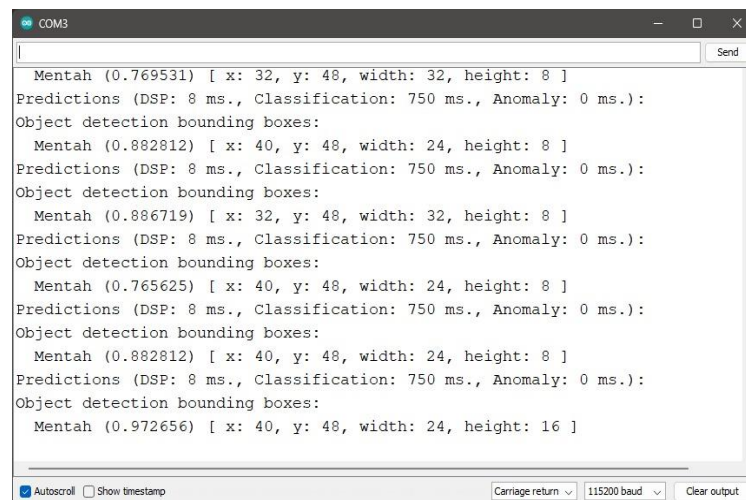
di Edge Impulse dengan hasil akurasi $\pm 87\%$. Model kemudian di-deploy ke ESP32-CAM agar klasifikasi citra bisa dilakukan langsung di perangkat.



Gambar 4.3 Tampilan Pengumpulan Dataset Menggunakan ESP-32 CAM

2. Pemrograman ESP32-CAM

ESP32-CAM diprogram menggunakan Arduino IDE untuk menangkap citra setiap kali sensor IR mendeteksi buah, menjalankan model CNN, dan mengirim hasil klasifikasi ke ESP32 Dev.

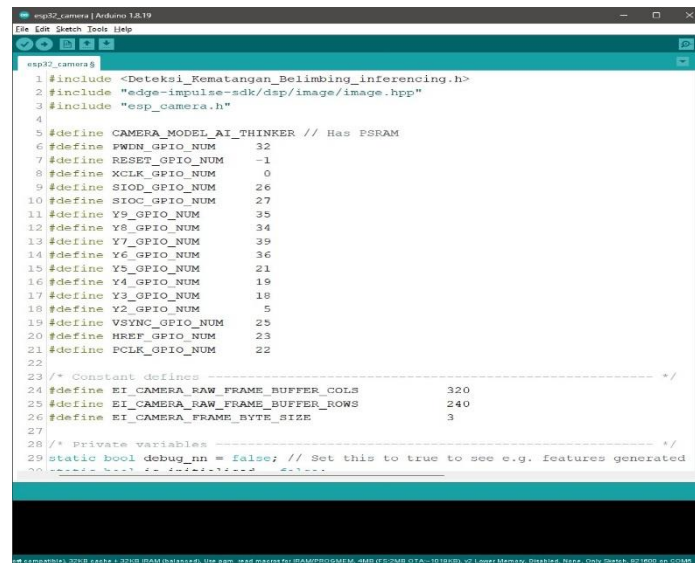


Gambar 4.4 Tampilan Hasil Klasifikasi Pada Serial Monitor Arduino IDE

3. Pemrograman Arduino IDE

ESP32 Dev diprogram untuk membaca data berat dari load cell, menerima

hasil klasifikasi dari ESP32-CAM, mengendalikan motor DC conveyor dan servo sortir, serta mengirimkan data akhir ke Telegram.



```

1 #include <Deteksi_Kematangan_Belimbing_inferencing.h>
2 #include "edge-impulse-sdk/dsp/image/image.hpp"
3 #include "esp_camera.h"
4
5 #define CAMERA_MODEL_AI_THINKER // Has PSRAM
6 #define PWDN_GPIO_NUM    32
7 #define RESET_GPIO_NUM   -1
8 #define XCLK_GPIO_NUM     0
9 #define SIOD_GPIO_NUM    26
10 #define SIOC_GPIO_NUM    27
11 #define Y9_GPIO_NUM       35
12 #define Y8_GPIO_NUM       34
13 #define Y7_GPIO_NUM       39
14 #define Y6_GPIO_NUM       36
15 #define Y5_GPIO_NUM       21
16 #define Y4_GPIO_NUM       19
17 #define Y3_GPIO_NUM       18
18 #define Y2_GPIO_NUM        5
19 #define VSYNC_GPIO_NUM    25
20 #define HREF_GPIO_NUM     23
21 #define PCLK_GPIO_NUM     22
22
23 /* Constant defines */
24 #define EI_CAMERA_RAW_FRAME_BUFFER_COLS    320
25 #define EI_CAMERA_RAW_FRAME_BUFFER_ROWS    240
26 #define EI_CAMERA_FRAME_BYTE_SIZE         3
27
28 /* Private variables */
29 static bool debug_nn = false; // Set this to true to see e.g. features generated
30
31 #include "esp32_camera.h"

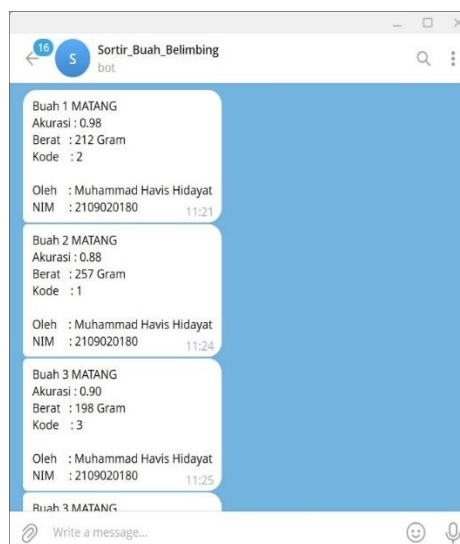
```

Gambar 4.5 Coding ESP-32 CAM pada Arduino IDE

4. Integrasi IoT Telegram

ESP32 Dev Module dihubungkan dengan bot Telegram melalui WiFi.

Hasil klasifikasi dikirim sebagai pesan notifikasi yang memuat kategori kematangan, berat buah, kode ukuran buah, dan waktu deteksi.



Gambar 4.6 Tampilan Notifikasi Hasil Klasifikasi melalui Telegram

4.4. Realisasi Sistem Keseluruhan

Setelah perangkat keras dan perangkat lunak diintegrasikan, sistem dapat beroperasi penuh. Proses kerja nyata sistem adalah sebagai berikut:

- 1) Buah belimbing ditimbang dengan load cell.
- 2) Buah bergerak di atas conveyor hingga sensor IR mendeteksinya.
- 3) Conveyor berhenti, ESP32-CAM menangkap citra, dan CNN menentukan kategori kematangan.
- 4) ESP32 Dev menggabungkan hasil kematangan dengan berat buah.
- 5) Motor servo mengarahkan buah ke wadah penampungan sesuai kategori.
- 6) Data klasifikasi akhir dikirim ke Telegram.

4.5. Hasil Uji Coba Sistem

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem klasifikasi buah belimbing berdasarkan tingkat kematangan menggunakan CNN dan berat buah menggunakan sensor load cell. Sampel yang diuji sebanyak 30 buah belimbing dengan variasi tingkat kematangan dan ukuran berbeda.

4.5.1 Uji Akurasi Kematangan dengan CNN

Model CNN pada ESP32-CAM diuji dengan membandingkan hasil klasifikasi terhadap label manual (*ground truth*).

Tabel 4.1 Nilai Akurasi CNN

Kategori Kematangan	Jumlah Sampel	Benar Klasifikasi	Salah Klasifikasi	Akurasi (%)
Mentah	10	9	1	90%
Setengah Matang	10	8	2	80%
Matang Sempurna	10	9	1	90%
Total	30	26	4	86,6%

Analisis:

Akurasi rata-rata yang dicapai sistem sebesar 86,6%. Kesalahan terbanyak terdapat pada kategori *setengah matang*, karena warna kulitnya cenderung mirip dengan kategori lain sehingga model CNN lebih sulit membedakannya.

4.5.2 Uji Ketelitian Berat dengan Load Cell

Pengukuran berat dibandingkan dengan timbangan digital sebagai referensi.

Tabel 4.2 Nilai Akurasi Load Cell

Sampel	Berat Manual (g)	Berat Sensor (g)	Selisih (g)	Error (%)
1	120	122	2	1,6%
2	200	197	3	1,5%
3	240	238	2	0,8%
4	260	264	4	1,5%
5	180	183	3	1,7%

Analisis:

Rata-rata error pengukuran berat adalah $\pm 1-2\%$, yang cukup akurat untuk klasifikasi ukuran buah sesuai standar SNI 4491:2009.

4.5.3 Uji Integrasi Sistem

Uji integrasi dilakukan untuk memastikan seluruh komponen bekerja secara sinkron. Hasil klasifikasi kematangan dari CNN dan pengukuran berat dari load cell diproses oleh ESP32 Dev Module, kemudian digunakan untuk mengendalikan conveyor, motor servo, serta mengirimkan notifikasi ke Telegram. Bisa dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4.3 Uji Integritas Sistem

Sampel	Ground Truth	Hasil CNN	Berat (g)	Kode Ukuran	Hasil Sortir	Notifikasi Telegram	Status
1	Mentah	Mentah	120	Kode 4	Sesuai	Terkirim	Benar
2	Matang	Matang	245	Kode 2	Sesuai	Terkirim	Benar
3	Setengah	Mentah	180	Kode 3	Salah	Terkirim	Salah
4	Matang	Matang	270	Kode 1	Sesuai	Terkirim	Benar

Analisis:

Dari 30 sampel yang diuji, 26 berhasil diproses dengan benar (akurasi keseluruhan 86,6%) dan 4 mengalami kesalahan. Kesalahan utamanya disebabkan oleh pencahayaan yang kurang stabil serta posisi buah yang tidak sejajar saat citra diambil.

4.6 Pembahasan

Hasil pengujian sistem klasifikasi buah belimbing menunjukkan bahwa prototipe yang dikembangkan mampu bekerja sesuai dengan rancangan. Sistem berhasil melakukan penimbangan, klasifikasi tingkat kematangan, sortir otomatis, dan pengiriman hasil ke Telegram secara terintegrasi. Tingkat akurasi yang diperoleh dari pengujian CNN sebesar 86,6%, sedangkan sensor load cell menunjukkan tingkat ketelitian dengan rata-rata error hanya sekitar $\pm 1-2\%$. Nilai ini tergolong baik untuk sebuah prototipe berbasis mikrokontroler dengan keterbatasan sumber daya komputasi.

Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, misalnya Sundari et al. (2023) yang menggunakan transformasi warna HSI dengan akurasi 85% dan

Ibnutama et al. (2023) dengan ruang warna CMYK yang mencapai 86,66%, sistem ini memiliki performa yang setara bahkan cenderung lebih adaptif karena menggunakan Convolutional Neural Network (CNN). Keunggulan CNN terletak pada kemampuannya melakukan ekstraksi fitur secara otomatis tanpa harus menentukan parameter warna tertentu, sehingga lebih fleksibel menghadapi variasi citra.

Meskipun demikian, masih ditemukan beberapa keterbatasan. Kesalahan klasifikasi paling banyak terjadi pada kategori setengah matang. Hal ini dapat dijelaskan karena warna kulit buah setengah matang sering kali memiliki gradasi yang dekat dengan kategori mentah maupun matang, sehingga model sulit membedakan. Faktor lain yang memengaruhi adalah kondisi pencahayaan dan posisi buah pada conveyor. Pencahayaan yang terlalu terang atau redup membuat citra kurang konsisten, sedangkan posisi buah yang miring dapat mengubah area dominan warna yang tertangkap kamera.

Pada aspek pengukuran berat, load cell menunjukkan kinerja yang stabil dengan deviasi kecil. Hasil ini membuktikan bahwa sensor cukup handal untuk digunakan dalam klasifikasi ukuran buah sesuai standar SNI 4491:2009. Dengan kombinasi klasifikasi berat dan kematangan, sistem mampu menyajikan informasi yang lebih lengkap dibandingkan metode manual yang hanya mengandalkan visual pekerja.

Integrasi sistem dengan aplikasi Telegram juga menjadi nilai tambah, karena memudahkan pengguna memantau hasil sortir secara real-time tanpa harus berada di dekat alat. Hal ini relevan dengan kebutuhan industri pertanian modern yang menuntut efisiensi, akurasi, serta monitoring jarak jauh.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini membuktikan bahwa penggunaan ESP32-CAM dengan CNN dan sensor load cell dapat menjadi solusi efektif untuk proses sortasi buah belimbing. Meskipun akurasinya belum mencapai 100%, sistem ini sudah menunjukkan kinerja yang konsisten dan berpotensi dikembangkan lebih lanjut, misalnya dengan menambah jumlah dataset citra, memperbaiki pencahayaan, serta menyempurnakan desain mekanik conveyor agar posisi buah lebih stabil.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pengujian sistem klasifikasi otomatis buah belimbing menggunakan ESP32-CAM, CNN, dan sensor load cell, dapat disimpulkan bahwa:

- 1) Sistem berhasil diimplementasikan dalam bentuk prototipe yang mampu melakukan penimbangan, klasifikasi tingkat kematangan, sortir otomatis, serta pengiriman hasil klasifikasi melalui aplikasi Telegram.
- 2) Model Convolutional Neural Network (CNN) yang dilatih pada dataset citra buah belimbing mampu mencapai akurasi rata-rata 86,6% dalam mengklasifikasikan tiga tingkat kematangan (mentah, setengah matang, matang sempurna).
- 3) Sensor load cell + HX711 mampu mengukur berat buah dengan ketelitian tinggi, dengan rata-rata error hanya sekitar $\pm 1-2\%$, sehingga sesuai digunakan untuk klasifikasi ukuran berdasarkan standar SNI 4491:2009.
- 4) Integrasi perangkat keras dan perangkat lunak berjalan baik, sistem mampu bekerja secara otomatis dan sinkron mulai dari pengambilan data hingga proses sortir akhir.
- 5) Penerapan IoT melalui Telegram berhasil memberikan notifikasi real-time kepada pengguna, sehingga meningkatkan kemudahan pemantauan hasil sortir tanpa harus berada di lokasi alat.

5.2 Saran

Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, beberapa hal yang dapat dipertimbangkan antara lain:

- 1) Perluasan Dataset Citra

Jumlah dan variasi dataset citra perlu ditambah, terutama untuk kategori setengah matang, agar akurasi model CNN dapat ditingkatkan dan lebih robust terhadap kondisi nyata di lapangan.

- 2) Perbaikan Pencahayaan dan Mekanik

Sistem pencahayaan pada area pengambilan citra sebaiknya ditingkatkan agar lebih stabil. Selain itu, desain conveyor dan penempatan buah perlu disempurnakan agar posisi buah tetap konsisten saat ditangkap kamera.

- 3) Pengembangan Antarmuka

Selain Telegram, sistem dapat dikembangkan dengan dashboard berbasis web atau aplikasi mobile khusus yang menampilkan grafik hasil klasifikasi dan statistik performa alat.

- 4) Skala Uji Lebih Besar

Penelitian berikutnya sebaiknya dilakukan dengan jumlah sampel lebih banyak serta variasi kondisi lapangan yang lebih beragam, sehingga performa sistem lebih teruji untuk aplikasi nyata di tingkat petani maupun industri.

- 5) Optimalisasi Model

Model CNN dapat dikembangkan lebih lanjut dengan teknik optimasi, seperti transfer learning atau data augmentation, sehingga performa

meningkat meskipun dijalankan pada perangkat dengan keterbatasan komputasi seperti ESP32-CAM.

DAFTAR PUSTAKA

- Benkeblia, N. (2018). *Unlocking the full potential of carambola (averrhoa carambola) as a food source: Botany, growing, physiology and postharvest technology*.
<https://www.researchgate.net/publication/325951982>
- Fan, Y., Sahu, S. K., Yang, T., Mu, W., Wei, J., Cheng, L., Yang, J., Mu, R., Liu, J., Zhao, J., Zhao, Y., Xu, X., Liu, X., & Liu, H. (2020). Dissecting the genome of star fruit (*Averrhoa carambola* L.). *Horticulture Research*, 7(1).
<https://doi.org/10.1038/s41438-020-0306-4>
- Hafidz Imaduddin, A., Susanto, W. H., & Wijayanti, N. (2017). PENGARUH TINGKAT KEMATANGAN BUAH BELIMBING (*Averrhoa carambola* L.) DAN PROPORSI PENAMBAHAN GULA TERHADAP KARAKTERISTIK FISIKOKIMIA DAN ORGANOLEPTIK LEMPOK BELIMBING The Influence of Ripeness Level Of Starfruit (*Averrhoa Carambola* L.) and Addition of Sugar Proportion On Physicochemistry and Organoleptic Properties of Starfruit Lempok. *Jurnal Pangan dan Agroindustri*, 5(2), 45–57. <https://repository.ub.ac.id/id/eprint/151451/>
- Hetharua, A. D., Sumarno, S., Gunawan, I., Hartama, D., & Kirana, I. O. (2021). Alat Penyortir Buah Tomat Berdasarkan Warna Berbasis Mikrokontroller Arduino. *Jurnal Penelitian Inovatif*, 1(2), 119–130. <https://doi.org/10.54082/jupin.18>
- Ibnutama, K., Gilang Suryanata, M., Putri, R. O., & Al Hafiz, A. (2023). Seleksi Tingkat Kematangan Citra Buah Belimbing Menggunakan Ruang Warna CMYK. *SAINTIKOM (Jurnal Sains Manajemen Informatika dan Komputer)*, 22, 302–310. <https://ojs.trigunadharma.ac.id/index.php/jis/index>
- Laili, N., Supriyanto, S., & Saraswati, M. (2023). Uji Aktivitas Ekstrak Daun Belimbing Manis (*Averrhoa Carambola* L.) terhadap Penyembuhan Luka Sayat pada Kelinci New Zealand Activity Test of Sweet Starfruit Leaf Extract (*Averrhoa Carambola* L.) on Wound Healing in New Zealand Rabbits. *Jurnal Sains dan Kesehatan (J. Sains Kes.)* 2023, 5(5), 731–739. <https://doi.org/10.25026/jsk.v5i5.xxx>
- Maliki, M. S. A., & Irawan, D. (2024). Penyortiran Kematangan Buah Dengan Indikator Warna Menggunakan Metode Backpropagation Berbasis IOT. *Smart Comp: Jurnalnya Orang Pintar Komputer*, 13(2), 341–348. <https://doi.org/10.30591/smartcomp.v13i2.6415>
- Mampeu Carine ZAH, Adouko Edith AGBO, Jean-claude Desfontis, & Doudjo SORO. (2024). Impact of season and maturity stage on biochemical parameters of *Averrhoa carambola* fruits. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 24(1), 1862–1870. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.24.1.3153>
- Sani, R. A., & Maha, A. I. (2017). KONSTRUKSI TIMBANGAN DIGITAL MENGGUNAKAN LOAD CELL BERBASIS ARDUINO UNO DENGAN TAMPILAN LCD (Liquid Crystal Display). *JURNAL EINSTEIN Jurnal Hasil Penelitian Bidang Fisika*, 16–19.
<http://jurnal.unimed.ac.id/2012/index.php/infapfie-issn:2407-747x,p-issn2338-1981>
- Setiawan, M. D. C., Farida, I. N., & Niswatin, R. K. (2020). Klasifikasi Mutu Buah Belimbing (*Averrhoa Carambola* L.) Menggunakan metode GLCM (Gray Co-occurrence Matrix). *Seminar Nasional Inovasi Teknologi*, 93–100.
- Sharma, B. B., Shantaram, M., & Bhasker, B. (2013). Morphological and biochemical characteristics of *Averrhoa* fruits IJPCBS 2013, 3(3), 924-928 INTERNATIONAL JOURNAL OF PHARMACEUTICAL, CHEMICAL AND BIOLOGICAL SCIENCES MORPHOLOGICAL AND BIOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF AVERRHOA FRUITS. *INTERNATIONAL JOURNAL OF*

PHARMACEUTICAL, CHEMICAL AND BIOLOGICAL SCIENCES, 3(3), 924–928.
www.ijpcbs.com

Sundari, S., Siburian, I. N., & Wulan, N. (2023). Mendeteksi Tingkat Kematangan Belimbing Berdasarkan Fitur Warna Menggunakan Transformasi Ruang Warna HSI. *ALGORITMA: Jurnal Ilmu Komputer dan Informatika*, 7, 1.
https://scholar.google.co.id/scholar?hl=id&as_sdt=0%2C5&q=Mendeteksi+Tingkat+Kematangan+Belimbing+Berdasarkan+Fitur+Warna+Menggunakan+Transformasi+Ruang+Warna+HSI&btnG=