

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Kajian pustaka terhadap penelitian terdahulu dapat dijadikan sebagai salah satu referensi dalam penyusunan dan pelaksanaan Tugas Akhir ini. Tinjauan pustaka disusun untuk memperkuat penggunaan teoritis serta memahami posisi dan urgensi penelitian yang dilakukan. Selain itu, pembahasan ini juga memberikan gambaran mengenai teknologi yang telah digunakan dalam penelitian sebelumnya serta potensi inovasi dan pengembangan yang dapat diterapkan pada alat yang dirancang. Berikut ini merupakan beberapa kajian penelitian terdahulu yang relevan dengan topik alat deteksi kematangan buah alpukat otomatis.

1. Penelitian yang dilakukan oleh Putro dan Rasyid (2024) yang berjudul "Rancang Bangun Detektor Kematangan Buah Kelapa Sawit Menggunakan Sensor TCS3200 dan Modul Wifi ESP32-CAM dengan Notifikasi via Telegram". Dalam penelitian tersebut, sensor warna TCS3200 digunakan untuk mendeteksi nilai RGB pada permukaan kulit buah, kemudian data tersebut diproses oleh modul ESP32-CAM sebagai unit pengolah sekaligus pengirim notifikasi ke aplikasi telegram. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tingkat keberhasilan deteksi tertinggi diperoleh pada kondisi buah yang belum matang dengan persentase 100% sedangkan pada kondisi buah matang diperoleh persentase keberhasilan sebesar 86,6%. Penelitian ini membuktikan bahwa kombinasi sensor warna TCS3200 dengan mikrokontroler berbasis Wi-Fi seperti ESP32 mampu membedakan kondisi kematangan buah berdasarkan pembacaan nilai RGB secara *real-time* sekaligus mengirimkan hasilnya kepada pengguna melalui platform pemantauan jarak jauh. Prinsip kerja inilah yang menjadi salah satu rujukan utama dalam perancangan sistem pemantauan kematangan buah alpukat mentega pada penelitian ini khususnya dalam pemanfaatan sensor TCS3200 sebagai pendeteksi warna kulit buah dan ESP32 sebagai unit pemroses data yang terhubung ke jaringan internet untuk keperluan monitoring [10].

2. Penelitian oleh Hamzah, Susanti, dan Lestari (2024) yang berjudul "Klasifikasi Kematangan Buah Alpukat Mentega Berdasarkan Fitur Warna Menggunakan Support Vector Machine". Penelitian ini secara khusus mengangkat objek buah alpukat mentega, yang sejalan dengan objek penelitian pada tugas akhir ini. Dalam penelitian tersebut, tingkat kematangan buah alpukat mentega diklasifikasikan ke dalam tiga kategori, yaitu Unripe (mentah), Ripe (matang), dan Rotten (busuk) dengan memanfaatkan fitur warna kulit buah yang diekstraksi menggunakan metode *Support Vector Machine* (SVM). Penelitian ini juga menegaskan bahwa klasifikasi kematangan buah secara manual memiliki banyak keterbatasan karena sangat dipengaruhi oleh subjektivitas manusia sehingga penerapan pengolahan citra digital atau sistem sensor otomatis menjadi solusi yang lebih objektif. Temuan ini memperkuat urgensi pengembangan alat deteksi kematangan buah alpukat mentega yang otomatis dan objektif, sebagaimana yang menjadi tujuan dari perancangan alat pada tugas akhir ini dengan menambahkan parameter gas menggunakan sensor MQ135 sebagai indikator pendukung selain warna, mengingat proses pematangan buah klimakterik seperti alpukat turut disertai pelepasan senyawa gas volatil (seperti etilen dan senyawa organik lainnya) yang dapat dideteksi oleh sensor gas [3].

Berdasarkan tinjauan terhadap penelitian-penelitian terdahulu dapat dikatakan bahwa pendekatan berbasis sensor warna TCS3200 telah terbukti efektif digunakan sebagai metode non-destruktif untuk mendeteksi kematangan berbagai jenis buah, termasuk kelapa sawit dan alpukat mentega dengan tingkat akurasi yang cukup baik. Namun, kedua penelitian tersebut masih memiliki keterbatasan: penelitian Putro dan Rasyid (2024) hanya mengandalkan parameter warna tanpa mempertimbangkan indikator gas hasil metabolisme buah sementara penelitian Hamzah dkk. (2024) berfokus pada klasifikasi berbasis citra dan algoritma SVM tanpa implementasi perangkat keras (*hardware*) berbasis mikrokontroler secara *real-time* maupun sistem monitoring jarak jauh.

Oleh karena itu, penelitian ini berupaya melengkapi kekurangan tersebut dengan merancang sebuah alat deteksi kematangan buah alpukat mentega otomatis

berbasis ESP32 yang mengintegrasikan dua jenis sensor sekaligus, yaitu sensor TCS3200 untuk mendeteksi perubahan warna kulit buah dan sensor MQ135 untuk mendeteksi kadar gas yang dihasilkan selama proses pematangan, serta dilengkapi dengan sistem monitoring berbasis Google Spreadsheet agar data hasil pembacaan sensor dapat dipantau secara *real-time* dan tersimpan secara terpusat untuk keperluan analisis lebih lanjut.

2.2 Dasar Teori

Dasar teori ini memuat uraian teori-teori yang berkaitan dan mendukung topik Tugas Akhir yang dibahas.

2.2.1 Alpukat Mentega (*Persea americana*)



Gambar 2. 1 Alpukat Mentega [11]

Alpukat mentega (*Persea americana* Mill.) merupakan salah satu komoditas hortikultura yang memiliki nilai ekonomi tinggi dan banyak dibudidayakan di Indonesia. Varietas ini dikenal memiliki ukuran buah yang relatif besar, daging buah berwarna kuning cerah menyerupai mentega, tekstur lembut, serta kandungan air yang lebih rendah dibandingkan beberapa varietas alpukat lainnya sehingga memiliki cita rasa yang lebih gurih. Peningkatan konsumsi alpukat di Indonesia juga diikuti dengan meningkatnya produksi nasional sebagai bentuk pemenuhan kebutuhan pasar domestik maupun industri pengolahan pangan. Berdasarkan analisis produksi alpukat di Indonesia, komoditas alpukat

menunjukkan tren produksi yang terus meningkat dari tahun ke tahun sehingga menjadi salah satu buah unggulan yang memiliki prospek pengembangan cukup baik. Kondisi tersebut mendorong perlunya penerapan teknologi untuk menjaga kualitas hasil panen, termasuk teknologi deteksi tingkat kematangan buah secara otomatis agar kualitas produk yang dipasarkan tetap terjaga [1].

Buah alpukat termasuk buah klimakterik (*climacteric fruit*), yaitu buah yang masih mengalami proses pematangan setelah dipanen. Selama proses pematangan terjadi peningkatan laju respirasi dan produksi gas etilen yang menyebabkan berbagai perubahan fisiologis, seperti perubahan warna kulit, penurunan tingkat kekerasan daging buah, meningkatnya aroma khas, serta perubahan kandungan kimia di dalam buah [11].

2.2.2 Klasifikasi Tingkat Kematangan Buah

2.2.2.1 Tingkat Kematangan Buah Alpukat Mentega

Buah alpukat mentega (*Persea americana* Mill.) termasuk buah klimakterik yang tetap mengalami proses respirasi dan pematangan setelah dipanen. Selama proses tersebut terjadi perubahan karakteristik fisik dan fisiologis, antara lain warna kulit, kekerasan tekstur, susut bobot, serta produksi senyawa volatil. Perubahan tersebut dapat digunakan sebagai indikator untuk membedakan kondisi buah berdasarkan tingkat kematangannya [12], [13]. Dalam penelitian klasifikasi, kondisi alpukat dapat dikelompokkan menjadi mentah, setengah matang atau mengkal, matang, serta busuk [3], [13], [14].

Alpukat mentah merupakan kondisi ketika buah belum mengalami proses pematangan secara optimal sehingga karakteristik fisiknya masih relatif keras. Alpukat mentega pada tingkat kematangan awal sekitar 75–80% memiliki kulit berwarna hijau, tekstur keras, serta belum menunjukkan kerusakan fisik seperti memar maupun kerusakan mekanis [14]. Kondisi buah dengan tingkat kematangan yang lebih rendah juga mempunyai tekstur yang lebih keras dibandingkan buah dengan tingkat kematangan lebih tinggi. Dengan demikian, alpukat mentah dapat dicirikan sebagai buah yang teksturnya masih keras dan perubahan fisiologis akibat pematangan belum berlangsung secara maksimal [12], [14].

Alpukat mengkal merupakan kondisi transisi antara buah mentah dan buah matang. Dalam penelitian klasifikasi alpukat, kondisi ini lebih umum disebut sebagai *setengah matang*. Tiga kategori tingkat kematangan, yaitu mentah, setengah matang, dan matang serta menunjukkan bahwa perbedaan warna antara alpukat setengah matang dan matang relatif kecil sehingga kedua kategori tersebut lebih sulit dibedakan hanya berdasarkan warna kulit [13]. Oleh karena itu, kondisi mengkal dapat dipahami sebagai fase peralihan ketika buah mulai melunak dan mengalami perubahan warna maupun karakteristik fisiologis tetapi belum mencapai tingkat kematangan optimal [12], [13].

Alpukat matang merupakan kondisi ketika proses pematangan telah berkembang lebih lanjut sehingga tekstur buah menjadi lebih lunak dan buah telah mendekati atau mencapai kondisi yang sesuai untuk dikonsumsi. Alpukat dengan tingkat kematangan lebih tinggi mempunyai kekerasan yang lebih rendah dan susut bobot yang lebih besar. Pelunakan terjadi akibat perubahan struktur dinding sel, termasuk perombakan komponen selulosa, hemiselulosa, dan pektin selama berlangsungnya pematangan [12].

Selain perubahan tekstur, proses pematangan alpukat berkaitan dengan aktivitas respirasi dan produksi etilen karena alpukat merupakan buah klimakterik. Etilen berperan dalam mempercepat berbagai perubahan fisiologis dan biokimia selama proses pemasakan buah [4]. Dengan demikian, alpukat matang dapat dicirikan oleh tekstur yang lebih lunak dibandingkan kondisi mentah dan mengkal serta aktivitas metabolisme yang lebih tinggi. Pada penelitian klasifikasi berbasis citra, kategori matang juga dapat dibedakan berdasarkan perubahan karakteristik warna kulit meskipun perubahan warnanya tidak selalu kontras pada setiap buah alpukat [3], [13].

Alpukat busuk merupakan kondisi ketika buah telah mengalami penurunan mutu lebih lanjut setelah proses pematangan sehingga mulai terjadi kerusakan fisik maupun mikrobiologis. Oleh karena itu, kategori busuk lebih tepat dipandang sebagai tahap kerusakan setelah buah mencapai atau melewati kematangan optimal, bukan sebagai tahapan kematangan fisiologis. Kategori mentah, matang, dan busuk dalam klasifikasi alpukat mentega berdasarkan fitur warna yang menunjukkan

bahwa kondisi busuk dapat dibedakan sebagai kelas tersendiri dalam sistem klasifikasi kualitas buah [3].

Kerusakan buah alpukat mentega selama penyimpanan ditandai oleh pelunakan tekstur yang berlebihan, pertumbuhan mikroorganisme, perubahan kondisi daging buah, dan munculnya aroma yang tidak normal. Alpukat mentega tanpa perlakuan setelah penyimpanan selama 10 hari menunjukkan jamur pada bagian buah, terbentuknya cairan, serta menghasilkan bau busuk [14]. Kerusakan mikrobiologis dan aktivitas metabolisme selama penyimpanan dapat mempercepat penurunan mutu buah. Oleh karena itu, alpukat busuk dapat didefinisikan sebagai buah yang telah melewati kondisi matang optimal dan menunjukkan kerusakan nyata berupa tekstur yang terlalu lunak, perubahan warna yang tidak normal, munculnya jamur atau cairan, serta aroma tidak sedap sehingga tidak lagi layak dikategorikan sebagai buah segar [3], [14].

Berdasarkan karakteristik tersebut, pembagian kondisi alpukat mentega menjadi mentah, mengkal, matang, dan busuk dapat digunakan sebagai dasar dalam sistem klasifikasi tingkat kematangan. Namun, karena perubahan warna pada alpukat tidak selalu menunjukkan perbedaan yang tegas antara setiap kategori, penggunaan parameter warna sebaiknya dikombinasikan dengan parameter lain yang berkaitan dengan perubahan fisiologis buah, seperti tekstur ataupun senyawa volatil [13].

2.2.2.2 Parameter Warna

Klasifikasi tingkat kematangan buah alpukat merupakan proses pengelompokan kondisi buah ke dalam kategori tertentu, seperti mentah, setengah matang, matang, dan busuk berdasarkan karakteristik fisik yang mengalami perubahan selama proses pematangan. Salah satu parameter yang paling banyak digunakan dalam metode non-destruktif adalah perubahan warna kulit buah karena dapat diamati tanpa merusak struktur maupun kualitas buah. Pada buah alpukat mentega, proses pematangan menyebabkan degradasi klorofil dan meningkatnya dominasi pigmen lain sehingga warna kulit berubah secara bertahap dari hijau tua menjadi hijau kekuningan atau hijau kecokelatan. Perubahan warna tersebut

memiliki hubungan yang erat dengan perubahan karakteristik internal buah sehingga dapat dijadikan indikator untuk menentukan tingkat kematangan buah secara objektif. Pendekatan berbasis warna dinilai lebih konsisten dibandingkan penilaian visual oleh manusia yang dipengaruhi oleh pengalaman, pencahayaan, dan subjektivitas pengamat [2], [3], [11].

Metode klasifikasi kematangan buah berdasarkan warna telah banyak diterapkan pada berbagai penelitian menggunakan ekstraksi fitur warna maupun algoritma klasifikasi. Klasifikasi kematangan buah alpukat mentega juga dapat menggunakan metode *K-Nearest Neighbor* (K-NN) berdasarkan nilai warna kulit buah dan memperoleh hasil bahwa karakteristik warna mampu membedakan setiap tingkat kematangan dengan tingkat akurasi yang baik [2]. Pemanfaatan fitur warna sebagai parameter masukan pada algoritma *Support Vector Machine* (SVM) dan menunjukkan bahwa perubahan komposisi warna kulit buah merupakan parameter yang efektif dalam proses identifikasi tingkat kematangan alpukat mentega [3]. Selain itu, penggunaan transformasi ruang warna HSI (*Hue, Saturation, Intensity*) untuk meningkatkan representasi warna sehingga proses klasifikasi menjadi lebih stabil terhadap perubahan intensitas pencahayaan [4]. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa parameter warna merupakan salah satu indikator utama dalam sistem klasifikasi kematangan buah berbasis pengolahan citra maupun sensor warna.

Dalam penerapannya pada sistem klasifikasi berbasis sensor warna, nilai atau rentang warna untuk setiap kategori kematangan tidak selalu dapat ditentukan secara langsung hanya berdasarkan teori karena karakteristik warna buah dapat berbeda antar sampel akibat variasi kondisi kulit, ukuran buah, tingkat kematangan awal serta kondisi lingkungan saat pengukuran. Oleh karena itu, penentuan nilai warna pada penelitian ini dilakukan melalui uji pendahuluan dengan pendekatan *trial and error* terhadap beberapa sampel buah alpukat mentega yang mewakili kondisi mentah, mengkal, matang, dan busuk. Setiap sampel diukur menggunakan sensor warna untuk memperoleh nilai pembacaan warna kemudian hasil pengukuran dibandingkan dengan kondisi aktual buah. Data dari beberapa sampel tersebut digunakan untuk mengamati pola dan rentang nilai warna yang muncul

pada masing-masing tingkat kematangan. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, ditentukan nilai ambang (*threshold*) yang paling mampu memisahkan setiap kategori kematangan untuk selanjutnya digunakan sebagai dasar aturan klasifikasi pada sistem. Pendekatan ini memungkinkan nilai ambang yang digunakan lebih sesuai dengan karakteristik sampel dan kondisi pengukuran aktual pada alat yang dikembangkan.

2.2.2.3 Parameter Gas

Selama proses pematangan, buah alpukat mengalami perubahan fisiologis dan biokimia yang ditandai dengan meningkatnya aktivitas respirasi serta produksi berbagai senyawa volatil di sekitar permukaan buah. Alpukat termasuk kelompok buah klimakterik (*climacteric fruit*), yaitu buah yang tetap mengalami proses pematangan setelah dipanen. Peningkatan aktivitas metabolisme selama proses tersebut menyebabkan terjadinya perubahan komposisi gas di sekitar buah, termasuk peningkatan karbon dioksida (CO_2), senyawa organik volatil (*volatile organic compounds/VOCs*), serta gas lain yang berkaitan dengan proses respirasi dan pematangan. Perubahan karakteristik gas tersebut dapat dimanfaatkan sebagai salah satu indikator non-destruktif untuk mengidentifikasi tingkat kematangan buah tanpa merusak kondisi fisiknya. Pendekatan berbasis gas dapat digunakan sebagai parameter pendukung untuk melengkapi penilaian berdasarkan karakteristik visual maupun tekstur buah [11], [15].

Metode klasifikasi tingkat kematangan buah berdasarkan parameter gas dapat digunakan sebagai pelengkap metode berbasis warna. Perubahan warna kulit tidak selalu menunjukkan kondisi fisiologis buah secara keseluruhan karena karakteristik warna dapat dipengaruhi oleh varietas, kondisi permukaan kulit, intensitas pencahayaan, serta lingkungan pengukuran. Sebaliknya, perubahan respons gas di sekitar buah berkaitan dengan aktivitas metabolisme selama proses respirasi dan pematangan. Oleh karena itu, penggunaan parameter gas dapat memberikan informasi tambahan mengenai kondisi buah yang tidak seluruhnya diperoleh hanya dari parameter warna. Integrasi antara karakteristik warna dan

respons gas dapat digunakan dalam pendekatan multimodal untuk meningkatkan kemampuan sistem dalam membedakan beberapa tingkat kematangan buah [16].

Sensor MQ135 merupakan sensor gas berbasis material semikonduktor timah dioksida (SnO_2) yang memiliki sensitivitas terhadap beberapa jenis gas di lingkungan. Prinsip kerjanya didasarkan pada perubahan resistansi lapisan sensitif ketika permukaan sensor berinteraksi dengan gas di sekitarnya. Perubahan resistansi tersebut menghasilkan perubahan tegangan keluaran analog yang selanjutnya dapat dibaca oleh mikrokontroler melalui *Analog to Digital Converter* (ADC). Dengan karakteristik tersebut, MQ135 dapat digunakan untuk mendeteksi perubahan respons gas secara umum di sekitar buah selama proses pematangan. Namun, karena MQ135 tidak bersifat selektif terhadap satu jenis gas tertentu, nilai yang diperoleh pada penelitian ini digunakan sebagai parameter respons sensor terhadap perubahan komposisi gas di sekitar buah, bukan sebagai pengukuran spesifik terhadap satu jenis senyawa volatil tertentu [8].

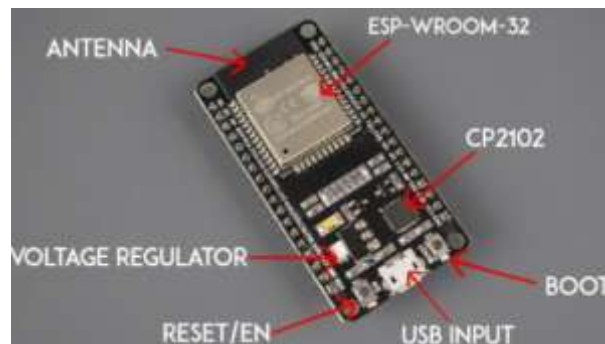
Dalam penerapannya pada sistem klasifikasi tingkat kematangan buah, rentang nilai respons gas untuk setiap kategori tidak dapat ditentukan secara langsung hanya berdasarkan karakteristik teoritis sensor MQ135. Nilai pembacaan sensor dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti kondisi lingkungan, suhu, kelembapan, sirkulasi udara, jarak sensor terhadap buah, waktu pengukuran, serta variasi karakteristik fisiologis antar sampel. Oleh karena itu, penentuan rentang nilai gas pada penelitian ini dilakukan melalui uji pendahuluan dengan pendekatan *trial and error* terhadap beberapa sampel buah alpukat mentega yang mewakili kondisi mentah, mengkal, matang, dan busuk. Setiap sampel diuji menggunakan sensor MQ135 dalam kondisi pengukuran yang dibuat seragam untuk memperoleh nilai respons sensor yang kemudian dibandingkan dengan kondisi aktual kematangan buah.

Hasil pengukuran dari beberapa sampel selanjutnya digunakan untuk mengidentifikasi pola perubahan nilai sensor pada masing-masing tingkat kematangan. Nilai-nilai yang menunjukkan pola relatif konsisten pada setiap kategori kemudian digunakan sebagai dasar dalam menentukan rentang dan nilai ambang (*threshold*). Nilai ambang tersebut selanjutnya diterapkan sebagai salah

satu parameter pada *rule-based system* untuk membedakan kondisi buah mentah, mengkal, matang, dan busuk. Dengan demikian, nilai gas yang digunakan dalam proses klasifikasi tidak ditentukan secara arbitrer tetapi diperoleh secara empiris berdasarkan hasil pengujian sampel pada kondisi aktual alat.

2.2.3 Mikrokontroler ESP32 DEVKIT V1

Mikrokontroler merupakan sistem komputer dalam satu chip (*System on Chip/SoC*) yang mengintegrasikan unit pemroses, memori, serta antarmuka input/output sehingga mampu mengendalikan berbagai perangkat elektronik secara terprogram. Pada penelitian ini digunakan ESP32 DevKit V1 sebagai pusat kendali sistem deteksi kematangan buah alpukat mentega karena memiliki kemampuan pemrosesan yang tinggi, jumlah pin I/O yang banyak, serta telah dilengkapi dengan modul komunikasi Wi-Fi dan Bluetooth secara terintegrasi. Kemampuan tersebut memungkinkan ESP32 tidak hanya melakukan akuisisi data dari sensor tetapi juga mengolah hasil pembacaan sensor dan mengirimkan data secara langsung ke media penyimpanan berbasis internet, seperti Google Spreadsheet tanpa memerlukan modul komunikasi tambahan [8].



Gambar 2. 2 ESP32 DEVKIT V1 [17]

ESP32 DevKit V1 dikembangkan oleh Espressif Systems dengan arsitektur Xtensa LX6 dual-core 32-bit yang memiliki frekuensi kerja hingga 240 MHz. Board ini menyediakan memori SRAM sebesar 520 kB dan memori flash hingga 4 MB sehingga mampu menjalankan beberapa proses secara bersamaan dengan performa yang lebih baik dibandingkan mikrokontroler generasi sebelumnya. Selain itu, ESP32 mendukung berbagai antarmuka komunikasi seperti UART, SPI,

PC, PWM, ADC, DAC, serta GPIO dalam jumlah yang cukup banyak sehingga memudahkan integrasi dengan berbagai sensor maupun perangkat keluaran. Ketersediaan fitur tersebut menjadikan ESP32 banyak digunakan pada sistem otomasi, monitoring, maupun Internet of Things (IoT) karena fleksibel dan memiliki konsumsi daya yang relatif rendah [8].

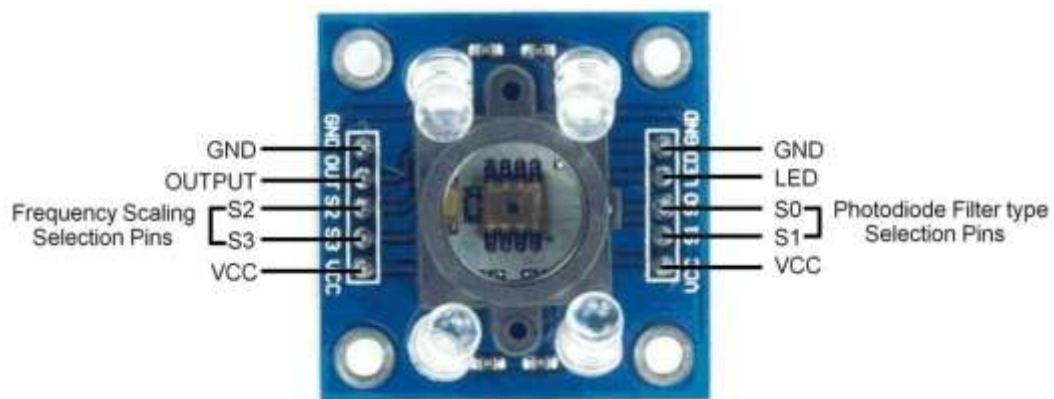
Tabel 2. 1 Spesifikasi ESP32 DEVKIT V1 [17]

Fitur	Spesifikasi
Jumlah inti	2 (dual core)
Wi-Fi	2.4 GHz hingga 150 Mbit/s
Bluetooth	BLE (<i>Bluetooth Low Energy</i>) dan Bluetooth legacy
Arsitektur	32 bit
Frekuensi clock	Hingga 240 MHz
RAM	512 KB
Pin	30, 36, atau 38 (tergantung model)
Perifer	Sentuh kapasitif, ADC (konverter analog-ke-digital), DAC (konverter digital-ke-analog), I2C (<i>Inter-Integrated Circuit</i>), UART (<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>), CAN 2.0 (<i>Controller Area Network</i>), SPI (<i>Serial Peripheral Interface</i>), I2S (<i>Integrated Inter-IC Sound</i>), RMII (<i>Reduced Media-Independent Interface</i>), PWM (<i>Pulse Width Modulation</i>), dan lainnya.
Tombol bawaan	Tombol <i>RESET</i> dan <i>BOOT</i>
LED bawaan	LED biru bawaan yang terhubung ke GPIO2; LED merah bawaan yang menunjukkan papan sedang diberi daya
Jembatan USB ke UART	CP2102

ESP32 DevKit V1 berfungsi sebagai pengendali utama seluruh proses sistem. Data warna kulit buah yang diperoleh dari sensor TCS3200 serta data konsentrasi gas hasil pembacaan MQ135 diproses oleh ESP32 untuk menentukan tingkat

kematangan buah berdasarkan parameter yang telah ditentukan. Selanjutnya, hasil pengukuran dan klasifikasi dikirimkan melalui koneksi Wi-Fi menuju Google Spreadsheet sebagai media pencatatan dan monitoring data secara otomatis. Penggunaan ESP32 pada penelitian ini dipilih karena mampu mengintegrasikan proses akuisisi data sensor, pengolahan data, komunikasi nirkabel, dan penyimpanan data berbasis *cloud* dalam satu platform mikrokontroler sehingga menghasilkan sistem yang lebih sederhana, efisien, dan mudah dikembangkan [8], [9], [10].

2.2.4 Sensor TCS3200



Gambar 2. 3 Sensor TCS3200 [18]

Sensor TCS3200 merupakan sensor warna yang banyak digunakan pada sistem otomasi untuk mengidentifikasi objek berdasarkan karakteristik warna permukaan. Sensor ini bekerja dengan mengubah intensitas cahaya yang dipantulkan oleh suatu objek menjadi sinyal frekuensi yang selanjutnya diproses oleh mikrokontroler. Kemampuan sensor dalam membedakan komponen warna merah (*Red*), hijau (*Green*), dan biru (*Blue*) menjadikan TCS3200 sesuai digunakan pada sistem klasifikasi kematangan buah karena perubahan tingkat kematangan umumnya diikuti oleh perubahan warna kulit buah. Dibandingkan dengan metode pengolahan citra yang memerlukan kamera dan komputasi lebih tinggi, TCS3200 menawarkan implementasi yang lebih sederhana, biaya rendah, serta mampu

memberikan hasil pengukuran secara *real-time* pada sistem *embedded* berbasis mikrokontroler [5], [6].

Tabel 2. 2 Pin Pemilihan Penskalaan Frekuensi [18]

S0	S1	Penskalaan Frekuensi Keluaran (f0)	Min o/p Frequency	Typ o/p Frequency
0	0	Mode Daya Mati	-	-
0	1	Frekuensi keluaran adalah 2% dari keluaran konverter arus-ke-frekuensi.	10KHz	12KHz
1	0	Frekuensi keluaran adalah 20% dari keluaran konverter arus-ke-frekuensi.	100 K	120 K
1	1	Frekuensi keluaran adalah 100% dari keluaran konverter arus-ke-frekuensi.	500 K	600 K

Tabel 2. 3 Pemilihan Jenis Fotodioda [18]

S2	S3	Photodiode Type with their respective Filter
0	0	<i>Red</i>
0	1	<i>Blue</i>
1	0	<i>Clear</i>
1	1	<i>Green</i>

Secara konstruksi, TCS3200 terdiri atas matriks fotodioda berukuran 8×8 yang berjumlah 64 buah. Fotodioda tersebut dibagi menjadi empat kelompok, yaitu 16 fotodioda dengan filter merah (*red*), 16 fotodioda dengan filter hijau (*green*), 16 fotodioda dengan filter biru (*blue*), dan 16 fotodioda tanpa filter (*clear*). Pemilihan kelompok fotodioda dilakukan melalui kombinasi logika pada pin S2 dan S3 sedangkan skala frekuensi keluaran diatur menggunakan pin S0 dan S1. Intensitas cahaya yang diterima masing-masing fotodioda akan dikonversi oleh rangkaian *current-to-frequency converter* menjadi sinyal gelombang persegi (*square wave*) dengan frekuensi yang sebanding terhadap intensitas warna yang terdeteksi. Sinyal frekuensi tersebut kemudian dibaca oleh mikrokontroler untuk memperoleh nilai RGB sebagai dasar proses klasifikasi warna [6], [10].

Prinsip kerja sensor TCS3200 diawali dengan penyinaran objek menggunakan LED putih yang terdapat pada modul sensor. Cahaya yang dipantulkan oleh permukaan objek diterima oleh fotodioda sesuai filter warna yang sedang dipilih. Pada saat pin S2 dan S3 dikonfigurasi untuk memilih filter merah, hijau, maupun biru, sensor akan menghasilkan frekuensi keluaran yang berbeda sesuai intensitas masing-masing komponen warna. Semakin tinggi intensitas cahaya yang diterima oleh fotodioda maka frekuensi *output* yang dihasilkan juga semakin besar. ESP32 kemudian menghitung frekuensi tersebut menggunakan fungsi pencacah pulsa (*pulse counter*) atau *pulseIn()* sehingga diperoleh nilai intensitas RGB yang selanjutnya digunakan sebagai parameter penentuan tingkat kematangan buah alpukat mentega [5], [6].

2.2.5 Sensor MQ135



Gambar 2. 4 Sensor MQ135 [19]

Sensor MQ135 merupakan sensor gas berbasis *Metal Oxide Semiconductor* (MOS) yang banyak digunakan untuk mendeteksi perubahan kualitas udara akibat keberadaan berbagai jenis gas seperti amonia (NH_3), karbon dioksida (CO_2), karbon monoksida (CO), benzena, alkohol, asap, dan senyawa volatil lainnya (VOC). Prinsip kerja sensor ini didasarkan pada perubahan nilai resistansi lapisan semikonduktor berbahan timah dioksida (SnO_2) ketika berinteraksi dengan molekul gas di udara. Perubahan resistansi tersebut kemudian diubah menjadi sinyal analog yang dapat dibaca oleh mikrokontroler untuk menentukan tingkat konsentrasi gas di lingkungan. Sensor MQ135 dipilih karena memiliki sensitivitas yang tinggi, harga yang relatif ekonomis, serta mudah diintegrasikan dengan berbagai platform mikrokontroler sehingga banyak dimanfaatkan pada sistem monitoring kualitas udara maupun aplikasi deteksi gas [8].

Tabel 2. 4 *Pinouts* MQ135 [19]

PIN	Description
DOUT	Digital data output
AOUT	Analog data output
GND	Ground
VCC	Power input (2.5V~5.0V)

Secara konstruksi, sensor MQ135 terdiri atas elemen pemanas (*heater*), lapisan sensitif SnO_2 , elektroda, dan ruang pelindung berbentuk jaring logam. Ketika sensor diberi catu daya, elemen *heater* akan memanaskan lapisan SnO_2 hingga mencapai suhu kerja tertentu sehingga molekul oksigen dapat teradsorpsi pada permukaan sensor. Saat gas target berada di sekitar sensor, terjadi reaksi kimia antara molekul gas dengan oksigen yang teradsorpsi sehingga mengubah jumlah elektron bebas pada permukaan material semikonduktor. Perubahan tersebut menyebabkan nilai resistansi sensor berubah sesuai dengan konsentrasi gas yang terdeteksi. Nilai resistansi kemudian dikonversi menjadi tegangan analog yang selanjutnya dibaca melalui Analog-to-Digital Converter (ADC) pada ESP32 untuk diproses menjadi informasi yang dapat digunakan oleh sistem. Mekanisme ini menjadikan MQ135 mampu memberikan respons yang relatif cepat terhadap perubahan konsentrasi gas di lingkungan [8].

Pada proses pematangan buah, terjadi peningkatan aktivitas respirasi dan metabolisme yang menghasilkan berbagai senyawa gas, terutama etilen (C_2H_4), karbon dioksida (CO_2), serta senyawa organik volatil (*Volatile Organic Compounds/VOC*). Meskipun MQ135 bukan sensor yang secara khusus dirancang untuk mendeteksi etilen, sensor ini memiliki sensitivitas terhadap perubahan kualitas udara akibat keberadaan CO_2 dan berbagai VOC yang meningkat selama proses pematangan buah. Oleh karena itu, perubahan nilai keluaran sensor MQ135 dapat digunakan sebagai parameter pendukung untuk mengidentifikasi tingkat kematangan buah apabila dikombinasikan dengan parameter warna yang diperoleh dari sensor TCS3200. Pendekatan multi-sensor tersebut diharapkan mampu

meningkatkan keandalan sistem dibandingkan apabila hanya menggunakan satu parameter pengukuran [5], [8].

Dalam implementasinya, sensor MQ135 menghasilkan keluaran berupa sinyal analog yang dipengaruhi oleh konsentrasi gas di lingkungan. Nilai analog tersebut selanjutnya dibaca oleh pin ADC pada ESP32 dan diproses menggunakan program untuk memperoleh nilai yang mewakili kondisi udara di sekitar objek pengukuran. Sebelum digunakan, sensor memerlukan waktu pemanasan (*pre-heating*) agar elemen sensitif mencapai kondisi kerja yang stabil sehingga hasil pembacaan menjadi lebih konsisten. Selain itu, karakteristik pembacaan MQ135 juga dipengaruhi oleh suhu, kelembapan, serta proses kalibrasi awal sehingga faktor-faktor tersebut perlu diperhatikan untuk memperoleh hasil pengukuran yang lebih akurat. Pada sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini, data dari MQ135 selanjutnya dikirimkan oleh ESP32 ke Google Spreadsheet sebagai media penyimpanan dan monitoring sehingga hasil deteksi dapat diamati secara *real-time* dan terdokumentasi secara otomatis [8], [9].

2.2.6 Power Supply Switching 5V 2A

Power supply merupakan komponen yang berfungsi sebagai penyedia energi listrik bagi seluruh rangkaian elektronik sehingga setiap modul dapat bekerja sesuai spesifikasi tegangannya. Pada sistem ini, catu daya berperan dalam menyuplai tegangan DC sebesar 5V secara stabil kepada mikrokontroler ESP32, sensor TCS3200, sensor MQ-135, modul LCD, serta perangkat pendukung lainnya. Kestabilan tegangan menjadi faktor penting karena fluktuasi catu daya dapat memengaruhi proses pembacaan sensor, komunikasi data, maupun kinerja keseluruhan sistem monitoring. Oleh karena itu, penggunaan catu daya dengan kemampuan arus yang mencukupi diperlukan agar seluruh komponen dapat beroperasi secara bersamaan tanpa mengalami penurunan tegangan (*voltage drop*) pada saat beban meningkat [20], [21].

Switching Mode Power Supply (SMPS) merupakan jenis catu daya yang bekerja menggunakan metode pensaklaran (*switching*) berfrekuensi tinggi melalui komponen semikonduktor seperti MOSFET kemudian energi ditransfer melalui

transformator ferrite sebelum disearahkan dan difilter menjadi tegangan DC yang stabil. Berbeda dengan power supply linier yang mengatur tegangan menggunakan disipasi daya pada transistor, SMPS memiliki efisiensi yang lebih tinggi karena komponen switching hanya bekerja pada kondisi ON atau OFF sehingga rugi-rugi daya menjadi lebih kecil. Selain itu, penggunaan transformator frekuensi tinggi menyebabkan ukuran perangkat menjadi lebih ringkas, bobot lebih ringan, dan menghasilkan efisiensi yang lebih baik dibandingkan catu daya linier sehingga banyak digunakan pada sistem elektronika modern dan perangkat berbasis mikrokontroler [20], [21].



Gambar 2. 5 Power Supply Switching 5V 2A [22]

Pada penelitian ini digunakan adaptor switching 5V 2A sebagai sumber catu daya utama. Tegangan keluaran sebesar 5V dipilih karena sesuai dengan kebutuhan suplai ESP32 melalui pin VIN maupun modul pendukung lainnya sedangkan kemampuan arus maksimum sebesar 2A memberikan cadangan arus (*current headroom*) yang cukup ketika seluruh komponen bekerja secara bersamaan. Dengan kapasitas tersebut, sistem dapat mempertahankan kestabilan tegangan keluaran meskipun terjadi perubahan beban akibat proses pembacaan sensor, komunikasi Wi-Fi menuju Google Spreadsheet, maupun pengoperasian LCD. Penggunaan adaptor switching juga lebih sesuai untuk sistem instrumentasi karena memiliki efisiensi tinggi, dimensi yang relatif kecil, serta mampu menghasilkan tegangan keluaran yang stabil sehingga meningkatkan keandalan pengukuran sensor dan operasi sistem secara keseluruhan [20], [21].

2.2.7 Modul LCD I2C 16x2



Gambar 2. 6 Modul LCD I2C [23]

Modul Liquid Crystal Display (LCD) I2C merupakan perangkat keluaran (*output*) yang digunakan untuk menampilkan informasi dalam bentuk karakter, angka, maupun simbol sehingga memudahkan pengguna dalam memantau kondisi sistem secara langsung. Modul ini merupakan pengembangan dari LCD karakter konvensional yang telah dilengkapi dengan antarmuka *Inter-Integrated Circuit* (I2C) sehingga komunikasi dengan mikrokontroler hanya memerlukan dua jalur data, yaitu Serial Data (SDA) dan Serial Clock (SCL). Penggunaan antarmuka I2C mampu mengurangi jumlah pin input/output yang digunakan pada mikrokontroler dibandingkan metode komunikasi paralel sehingga rancangan sistem menjadi lebih sederhana, efisien, dan mudah diimplementasikan pada sistem berbasis mikrokontroler seperti ESP32. Pada penelitian ini, LCD I2C berfungsi sebagai media tampilan lokal untuk menampilkan hasil pembacaan sensor TCS3200, sensor MQ135, serta status tingkat kematangan buah alpukat mentega sebelum data dikirimkan ke Google Spreadsheet melalui jaringan internet [9], [24].

Secara umum, modul LCD I2C menggunakan IC ekspander I/O PCF8574 yang bertugas mengubah komunikasi serial I2C menjadi komunikasi paralel yang dibutuhkan oleh LCD karakter, seperti LCD 16×2 atau 20×4. Dengan adanya IC tersebut, koneksi antara ESP32 dan LCD cukup menggunakan empat pin, yaitu VCC, GND, SDA, dan SCL sehingga proses perancangan perangkat keras menjadi lebih ringkas dan mengurangi kompleksitas pengkabelan. Selain itu, sebagian besar modul LCD I2C telah dilengkapi dengan potensiometer yang digunakan untuk

mengatur kontras tampilan sehingga karakter dapat terbaca dengan jelas sesuai kondisi pencahayaan lingkungan. Karakteristik tersebut menjadikan LCD I2C banyak digunakan pada sistem monitoring berbasis mikrokontroler karena memiliki konsumsi pin yang rendah, biaya implementasi yang relatif murah, serta kemudahan integrasi dengan berbagai platform pengembangan [24], [25].

Tabel 2. 5 Spesifikasi Modul LCD I2C [23]

Jenis Display	LCD 16×2 (16 kolom × 2 baris karakter)
Interface	I2C Serial
Pitch Konektor	2.54mm
Voltage Supply	5V DC
Komunikasi	I2C (<i>Clock</i> dan <i>Data</i>)
Chip Converter	PCF8574 (atau sejenis)
Fitur	Potensiometer <i>brightness/contrast</i>

Pada tugas akhir ini, LCD I2C berperan sebagai media antarmuka pengguna (*user interface*) yang menampilkan informasi secara *real-time*, seperti hasil klasifikasi tingkat kematangan buah alpukat mentega yang diproses oleh ESP32. Informasi tersebut memungkinkan pengguna mengetahui kondisi objek secara langsung tanpa harus membuka Google Spreadsheet sedangkan penyimpanan data tetap dilakukan melalui sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT). Dengan demikian, penggunaan LCD I2C tidak hanya meningkatkan kemudahan dalam proses pengoperasian alat, tetapi juga mendukung efisiensi pemantauan data secara lokal maupun jarak jauh pada sistem yang dikembangkan [9], [10], [24].

2.2.8 Arduino IDE



Gambar 2. 7 Arduino IDE [26]

Arduino Integrated Development Environment (Arduino IDE) merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk mengembangkan, menulis, mengompilasi, dan mengunggah program ke berbagai papan mikrokontroler, termasuk Arduino maupun ESP32. Arduino IDE menyediakan editor kode, compiler, serta uploader dalam satu lingkungan pengembangan sehingga proses pembuatan program menjadi lebih sederhana. Bahasa pemrograman yang digunakan mengacu pada bahasa C/C++ dengan penyederhanaan melalui penyediaan berbagai *library* yang mendukung komunikasi dengan sensor, aktuator, maupun modul komunikasi. Kemudahan tersebut menjadikan Arduino IDE banyak dimanfaatkan dalam pengembangan sistem tertanam (*embedded system*) dan Internet of Things (IoT), terutama pada tahap prototipe maupun implementasi sistem otomatis [9].

Pada penelitian ini, Arduino IDE digunakan sebagai perangkat lunak utama untuk mengembangkan program pada mikrokontroler ESP32. Melalui Arduino IDE dilakukan penulisan algoritma pembacaan sensor warna TCS3200, sensor gas MQ135, pengolahan data hasil pembacaan sensor, penentuan tingkat kematangan buah alpukat, serta pengiriman data hasil pengukuran menuju Google Spreadsheet melalui koneksi Wi-Fi yang dimiliki oleh ESP32. Dukungan *library* yang lengkap pada Arduino IDE mempermudah proses integrasi antara perangkat keras dan perangkat lunak sehingga seluruh komponen sistem dapat bekerja secara terkoordinasi dalam satu program. Implementasi serupa juga diterapkan pada

sistem monitoring berbasis ESP32 yang mengirimkan data hasil pengukuran ke Google Spreadsheet secara daring sebagai media penyimpanan dan pemantauan data [27].

2.2.9 Google Spreadsheet sebagai Media Monitoring



Gambar 2. 8 Google Spreadsheet [28]

Google Spreadsheet merupakan layanan pengolah data berbasis komputasi awan (*cloud computing*) yang memungkinkan pengguna untuk menyimpan, mengelola, dan memantau data secara daring (*online*) melalui akun Google. Berbeda dengan aplikasi spreadsheet konvensional, Google Spreadsheet mendukung sinkronisasi data secara *real-time* sehingga perubahan data yang dikirim dari suatu perangkat dapat langsung ditampilkan tanpa memerlukan proses pembaruan (*refresh*) secara manual. Kemampuan tersebut menjadikan Google Spreadsheet banyak dimanfaatkan sebagai media pencatatan (*data logging*) dan monitoring pada sistem Internet of Things (IoT) karena dapat diakses melalui berbagai perangkat seperti komputer maupun telepon pintar selama terhubung dengan jaringan internet. Selain itu, data yang tersimpan pada Google Spreadsheet dapat diolah lebih lanjut menggunakan berbagai fungsi analisis maupun divisualisasikan dalam bentuk grafik sehingga memudahkan proses evaluasi hasil monitoring [9], [27].

Pada sistem berbasis ESP32, proses pengiriman data menuju Google Spreadsheet umumnya dilakukan melalui jaringan Wi-Fi dengan memanfaatkan layanan Google Apps Script sebagai *web service*. ESP32 mengirimkan data sensor menggunakan metode HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) kemudian Google

Apps Script menerima data tersebut dan secara otomatis menyimpannya ke dalam lembar kerja Google Spreadsheet. Mekanisme ini memungkinkan proses pencatatan data berlangsung secara otomatis, terstruktur, dan *real-time* tanpa memerlukan server khusus sehingga implementasinya relatif sederhana serta memiliki biaya yang rendah. Google Spreadsheet tidak hanya berfungsi sebagai media penyimpanan data tetapi juga sebagai antarmuka monitoring yang dapat diakses kapan saja dan dari lokasi mana saja [9], [27].

2.2.10 Rule-Based System (Sistem Berbasis Aturan)

Rule-Based System (Sistem Berbasis Aturan) merupakan salah satu metode pengambilan keputusan yang bekerja berdasarkan sekumpulan aturan logika berbentuk IF-THEN (jika-maka). Metode ini memanfaatkan pengetahuan yang telah ditentukan sebelumnya untuk menghasilkan suatu keputusan berdasarkan kondisi masukan yang diterima. Pada sistem berbasis aturan, data yang diperoleh dari sensor akan dibandingkan dengan aturan yang telah disusun sehingga sistem dapat menentukan keluaran secara otomatis tanpa memerlukan proses pelatihan (*training*) sebagaimana pada metode *machine learning*. Oleh karena itu, metode ini banyak diterapkan pada sistem kendali maupun sistem pakar karena memiliki proses komputasi yang ringan, mudah diimplementasikan pada mikrokontroler, serta menghasilkan keputusan yang konsisten selama aturan yang digunakan telah dirancang dengan benar [16].

Pada sistem deteksi kematangan buah, Rule-Based System digunakan untuk menggabungkan beberapa parameter pengukuran menjadi satu keputusan akhir mengenai tingkat kematangan buah. Parameter tersebut dapat berupa warna kulit buah yang diperoleh dari sensor warna maupun konsentrasi gas hasil respirasi yang diukur menggunakan sensor gas. Setiap kombinasi nilai sensor akan dibandingkan terhadap aturan yang telah ditentukan, misalnya apabila warna kulit masih didominasi hijau dan kadar gas etilen rendah maka buah dikategorikan mentah sedangkan apabila warna berubah menuju kuning kehijauan dan konsentrasi gas meningkat maka buah dikategorikan matang. Pendekatan ini memungkinkan proses

klasifikasi dilakukan secara objektif dan konsisten karena keputusan tidak lagi bergantung pada pengamatan visual pengguna [16].