

## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1. Tinjauan Pustaka

Perancangan sistem penyortiran buah kopi berbasis mikrokontroler merupakan salah satu penerapan teknologi otomasi yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi dan konsistensi proses sortasi hasil panen. Sistem ini dirancang untuk mengidentifikasi tingkat kematangan buah kopi berdasarkan karakteristik warna kulit buah menggunakan sensor warna TCS34725, kemudian mengelompokkan buah secara otomatis ke dalam kategori yang telah ditentukan dengan bantuan motor servo sebagai mekanisme penyortiran. Penggunaan sistem otomatis diharapkan dapat mengurangi ketergantungan terhadap proses penyortiran secara manual yang membutuhkan waktu relatif lama dan sangat bergantung pada ketelitian operator.

Pada penelitian ini, proses penyortiran dilakukan menggunakan sistem mekanik berupa *conveyor* yang berfungsi sebagai media pemindah buah kopi selama proses identifikasi berlangsung. *Conveyor* dirancang agar buah bergerak secara berurutan menuju area pembacaan sensor sehingga setiap buah dapat dideteksi secara individual. Sistem *conveyor* terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu *hopper* sebagai tempat penampungan buah kopi, *feeder* sebagai pengatur aliran buah agar masuk ke *conveyor* satu per satu, *conveyor belt* sebagai media pembawa buah menuju area pembacaan sensor, serta motor DC *stepper* Nema17 yang dikendalikan menggunakan *driver* A4988 sebagai penggerak utama *conveyor*. Setelah buah berada pada posisi pembacaan, sensor warna TCS34725 mendeteksi karakteristik warna kulit buah, kemudian data hasil pembacaan diproses oleh mikrokontroler ESP32 untuk menentukan kategori tingkat kematangan. Selanjutnya, motor servo akan bergerak sesuai perintah dari mikrokontroler untuk mengarahkan buah ke wadah penyortiran yang sesuai dengan kategori kematangannya.

Pengembangan sistem penyortiran buah kopi berbasis *conveyor* telah banyak dilakukan dengan berbagai metode, sensor, maupun mikrokontroler yang berbeda. Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penerapan sensor warna mampu meningkatkan akurasi identifikasi tingkat kematangan buah, sedangkan penggunaan *conveyor* dan sistem kendali berbasis mikrokontroler mampu menghasilkan proses penyortiran yang lebih cepat, konsisten, dan efisien.

## 2.2. Dasar Teori

Dasar teori merupakan bagian yang memuat konsep, prinsip, dan teori yang relevan dengan topik Tugas Akhir. Teori-teori tersebut digunakan sebagai landasan ilmiah dalam perancangan, pelaksanaan, serta analisis hasil penelitian yang dilakukan.

### 2.2.1. Buah Kopi



**Gambar 2.1** *Coffee Cherries*

Buah/cery kopi seperti pada Gambar 2.1 merupakan hasil dari tanaman kopi. Pada skala global, terdapat dua jenis spesies kopi yang ditanam yaitu kopi arabika (*coffea arabica*) dan kopi robusta (*coffea canephora* var. *robusta*). Kualitas kopi arabika lebih banyak disukai karena kopi arabika memiliki kadar kafein lebih rendah dan cita rasa tinggi dibanding dengan kopi robusta. Hal ini membuat harga kopi arabika lebih mahal. Namun tanaman kopi arabika rentan terserang penyakit karat daun. Di Indonesia, area penanaman kopi robusta lebih luas daripada kopi

arabika yang terbatas pada lahan dataran tinggi di atas 1.000 meter dari permukaan laut agar tidak terserang karat daun kopi [3]. Ukuran kematangan buah kopi ditandai oleh perubahan warna dan kekerasan buah sebagai berikut:

1. Buah hijau dan hijau kekuningan yang menandakan kondisi buah masih muda. Daging buah sedikit keras, belum berlendir dan rasanya tidak manis karena senyawa gula belum terbentuk maksimal. Biji pucat dan keriput, aromanya masih lemah. Tidak disarankan untuk dipanen.
2. Buah kuning kemerahan yang menunjukkan bahwa buah sudah mulai matang, aromanya sudah mulai mantap, dan sudah dapat dipetik.
3. Buah berwarna merah penuh yang menunjukkan buah sudah matang. Daging buah lunak dan berlendir serta mengandung senyawa gula yang relatif tinggi, sehingga rasanya manis. Aromanya dan cita rasa telah terbentuk dengan sempurna, dan merupakan kondisi yang tepat untuk dipanen. Buah merah tua yang menandakan bahwa buah lewat matang, dan disarankan segera dipanen. Aroma dan cita rasa mulai menurun, dan kandungan lendir cenderung berkurang karena sebagian senyawa gula dan pektin sudah terurai secara alami akibat proses respirasi. Jika dibiarkan lebih lama akan memberikan aroma tanah (*earthy*) yang berlebihan dan menjadi tidak enak [4].

Secara umum, perubahan tingkat kematangan buah kopi dapat diamati melalui perubahan warna kulit buah, mulai dari hijau pada kondisi belum matang, hijau kekuningan atau kuning kemerahan pada kondisi setengah matang, hingga merah pada kondisi matang. Perubahan warna tersebut dapat dimanfaatkan sebagai parameter dalam proses klasifikasi tingkat kematangan menggunakan sensor warna. Penelitian mengenai karakterisasi kematangan buah kopi juga menunjukkan bahwa perubahan warna kulit buah dapat digunakan untuk membedakan tahapan kematangan.

Pada penelitian ini, perubahan warna buah kopi dideteksi menggunakan sensor warna TCS34725. Nilai pembacaan kanal R, G, dan B dari sensor digunakan sebagai parameter dalam menentukan kategori tingkat kematangan buah kopi. Nilai

acuan RGB diperoleh berdasarkan hasil pengambilan data terhadap 30 *sample* buah kopi pada masing-masing kategori kematangan. Perhitungan dilakukan dengan menghitung nilai rata-rata pada setiap kanal RGB untuk memperoleh nilai yang dapat merepresentasikan karakteristik pembacaan warna pada masing-masing kategori kematangan.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (2.1)$$

Keterangan:

$\bar{X}$  = Nilai rata-rata pembacaan.

$X_i$  = Nilai pembacaan sensor pada sampel ke- $i$ .

$n$  = Jumlah *sample* pembacaan yang valid.

Karena setiap kategori memiliki 30 *sample*, maka untuk masing-masing kanal:

$$\begin{aligned} \bar{R} &= \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_{30}}{30} \\ \bar{G} &= \frac{G_1 + G_2 + \dots + G_{30}}{30} \\ \bar{B} &= \frac{B_1 + B_2 + \dots + B_{30}}{30} \end{aligned} \quad (2.2)$$

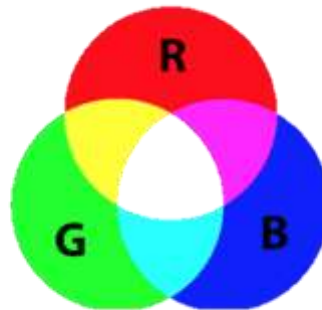
**Tabel 2.1** Nilai Rata-Rata RGB Berdasarkan Tingkat Kematangan Buah Kopi

| Tingkat Kematangan | $\bar{R}$ | $\bar{G}$ | $\bar{B}$ |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|
| Mentah             | 101,73    | 204,33    | 57,83     |
| Setengah Matang    | 253,00    | 120,67    | 70,30     |
| Matang             | 57,63     | 60,77     | 46,83     |

Berdasarkan Tabel 2.1, setiap tingkat kematangan memiliki karakteristik nilai pembacaan RGB yang berbeda. Buah kopi setengah matang memiliki nilai rata-rata R, G, dan B yang lebih tinggi dibandingkan kategori mentah dan matang. Sementara itu, buah kopi matang memiliki nilai rata-rata G dan B yang lebih rendah dibandingkan kedua kategori lainnya. Perbedaan karakteristik nilai RGB tersebut

digunakan sebagai salah satu dasar dalam menentukan parameter klasifikasi tingkat kematangan buah kopi pada sistem penyortiran.

#### 2.2.2. Ruang Warna RGB



**Gambar 2.2** Warna RGB

Warna seperti pada Gambar 2.2 adalah spektrum tertentu yang terdapat di dalam suatu cahaya sempurna yang berwarna putih. Identitas suatu warna ditentukan oleh panjang gelombang cahaya tersebut. Panjang gelombang warna yang dapat dilihat mata manusia berkisar antara 380-780 nanometer (nm). Setiap warna tersusun dari warna dasar yaitu warna merah, hijau dan biru, atau lebih dikenal dengan istilah RGB (*red, green, blue*).

Kegunaan utama model warna RGB adalah untuk menampilkan citra atau gambar dalam perangkat elektronik. Sebelum era elektronik, model warna RGB telah memiliki landasan yang kuat berdasarkan pemahaman manusia terhadap teori trikromatik. Dalam peralatan optis, warna berarti interpretasi otak terhadap campuran tiga warna primer merah, hijau, dan biru yang dapat digabungkan dalam komposisi tertentu untuk menghasilkan warna lain. Misalnya pencampuran 100% merah, 0% hijau, dan 100% biru akan menghasilkan interpretasi warna magenta. Dalam proses komputasi, warna dapat diolah untuk mengetahui nilai fitur unsur dasar penyusun suatu warna [3].

Model warna RGB merepresentasikan suatu warna berdasarkan intensitas relatif dari komponen merah (*Red*), hijau (*Green*), dan biru (*Blue*). Ketiga komponen tersebut dinyatakan dalam bentuk nilai numerik, sehingga setiap warna

memiliki kombinasi nilai RGB tertentu. Pada representasi RGB digital 8-bit, masing-masing komponen memiliki rentang nilai 0–255, dengan nilai 0 menunjukkan intensitas minimum dan nilai 255 menunjukkan intensitas maksimum. Kombinasi nilai dari ketiga komponen tersebut menghasilkan karakteristik warna yang berbeda. Sebagai contoh, nilai  $R = 255$ ,  $G = 0$ , dan  $B = 0$  merepresentasikan warna merah, sedangkan nilai  $R = 0$ ,  $G = 255$ , dan  $B = 0$  merepresentasikan warna hijau. Dengan demikian, perubahan nilai pada komponen R, G, dan B dapat digunakan untuk membedakan karakteristik warna suatu objek.

Rentang nilai 0–255 merupakan representasi umum pada RGB digital 8-bit. Namun, nilai pembacaan kanal warna dari sensor tidak selalu menggunakan representasi RGB 8-bit secara langsung. Pada penelitian ini, sensor TCS34725 menghasilkan nilai pembacaan kanal *Red*, *Green*, dan *Blue* yang diproses oleh ESP32. Oleh karena itu, nilai pembacaan yang digunakan dalam sistem dapat memiliki nilai lebih dari 255. Nilai tersebut merupakan hasil pembacaan kanal sensor yang digunakan sebagai data masukan dalam proses klasifikasi, sehingga rentang 0–255 pada RGB digital tidak digunakan sebagai batas klasifikasi secara langsung.

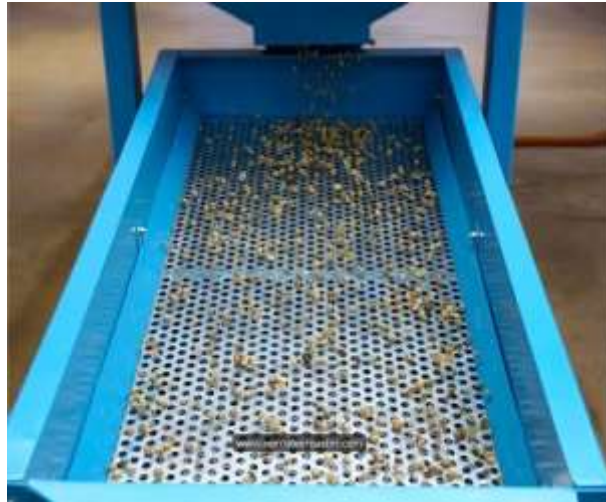
**Tabel 2.2** Rentang Nilai *Minimum* dan *Maximum* RGB Berdasarkan Tingkat Kematangan Buah Kopi

| <b>Tingkat Kematangan</b> | <b>R (<i>Min-Max</i>)</b> | <b>G (<i>Min-Max</i>)</b> | <b>B (<i>Min-Max</i>)</b> |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Mentah                    | 57–163                    | 171–252                   | 36–88                     |
| Setengah Matang           | 126–369                   | 56–188                    | 39–101                    |
| Matang                    | 40–95                     | 40–138                    | 33–93                     |

Berdasarkan Tabel 2.2, rentang nilai pembacaan RGB menunjukkan karakteristik yang berbeda pada setiap tingkat kematangan buah kopi. Pada kategori mentah, nilai R berada pada rentang 57–163, G sebesar 171–252, dan B sebesar 36–88. Kategori setengah matang memiliki rentang R sebesar 126–369, G sebesar 56–188, dan B sebesar 39–101. Sementara itu, kategori matang memiliki rentang R sebesar 40–95, G sebesar 40–138, dan B sebesar 33–93. Perbedaan rentang nilai

tersebut menunjukkan adanya variasi karakteristik pembacaan warna pada setiap tingkat kematangan buah kopi.

### 2.2.3. Sortasi Otomatis



**Gambar 2.3** Mesin Sortasi

Teknologi sortasi otomatis pada Gambar 2.3 merupakan sistem pemilahan objek berdasarkan karakteristik tertentu seperti warna, ukuran, bentuk, atau berat dengan bantuan sensor dan aktuator yang dikendalikan oleh mikrokontroler. Sistem ini dikembangkan untuk menggantikan metode sortasi manual yang umumnya masih bergantung pada pengamatan manusia dan memiliki tingkat subjektivitas tinggi. Prinsip dasar sortasi otomatis mencakup tiga tahap utama, yaitu:

1. Deteksi karakteristik objek – dilakukan oleh sensor yang sesuai dengan parameter yang ingin dibedakan, seperti sensor warna TCS34725 untuk deteksi tingkat warna biji kopi, atau *load cell* HX711 untuk mendeteksi berat hasil sortir.
2. Pemrosesan data sensor – dilakukan oleh mikrokontroler seperti ESP32 yang berfungsi menganalisis hasil pembacaan sensor dan menentukan kategori hasil sortir berdasarkan ambang nilai tertentu.
3. Eksekusi pemisahan objek – dilakukan oleh aktuator, seperti motor servo yang mengarahkan biji ke wadah sesuai kategori warna, serta motor *stepper* yang menggerakkan konveyor secara teratur.

Sistem otomatis memiliki keunggulan dibandingkan metode manual, antara lain kecepatan pemrosesan yang lebih tinggi, hasil sortir yang konsisten, serta kemampuan beroperasi tanpa pengawasan manusia secara terus-menerus. Selain itu, sistem ini dapat dikalibrasi ulang sesuai standar mutu tertentu, sehingga hasil pemilahan lebih objektif dan efisien. Dalam konteks pertanian modern, teknologi sortasi otomatis termasuk ke dalam *smart post-harvest system* — yaitu penerapan sistem sensorik dan kendali elektronik cerdas untuk meningkatkan efisiensi, akurasi, dan kecepatan dalam proses pascapanen [5].

Pada sistem penyortiran buah kopi, proses sortasi otomatis dilakukan secara berurutan mulai dari proses pengumpanan buah kopi, pembacaan karakteristik warna, klasifikasi tingkat kematangan, hingga pengarahannya menuju wadah yang sesuai. Buah kopi yang telah dimasukkan melalui *hopper* akan bergerak menggunakan *belt conveyor* menuju area pembacaan sensor. Ketika buah berada pada posisi pembacaan, sensor warna TCS34725 memperoleh nilai RGB dari permukaan buah. Nilai tersebut kemudian diproses oleh ESP32 untuk menentukan kategori tingkat kematangan buah kopi.

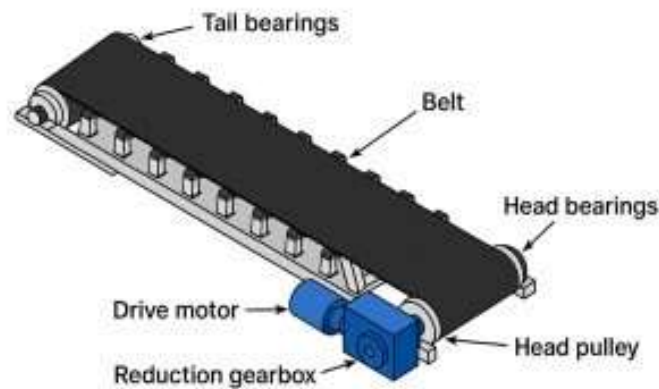
Hasil klasifikasi selanjutnya digunakan sebagai dasar pengendalian aktuator penyortiran. Motor servo MG996R digunakan untuk mengubah arah perjalanan buah kopi sesuai dengan kategori hasil klasifikasi. Buah kopi matang diarahkan menuju wadah kategori matang, buah kopi setengah matang diarahkan menuju wadah kategori setengah matang, sedangkan buah kopi mentah diarahkan menuju wadah kategori mentah. Setelah proses pengarahannya selesai, servo kembali ke posisi awal sehingga dapat melakukan proses penyortiran pada buah berikutnya. Mekanisme ini memungkinkan proses pemisahan berlangsung secara otomatis tanpa memerlukan pemilahan secara manual.

Keberhasilan proses sortasi otomatis dipengaruhi oleh keterpaduan antara sensor, mikrokontroler, *conveyor*, dan aktuator. *Conveyor* harus mampu menggerakkan buah kopi secara berurutan dengan kecepatan yang sesuai agar buah dapat terbaca oleh sensor dan mencapai mekanisme penyortiran pada waktu yang tepat. ESP32 berperan dalam mengolah hasil pembacaan sensor sekaligus

mengendalikan pergerakan motor servo berdasarkan hasil klasifikasi. Dengan demikian, proses sortasi tidak hanya bergantung pada kemampuan sensor dalam mengenali karakteristik buah, tetapi juga pada ketepatan waktu antara proses pembacaan, klasifikasi, dan pergerakan aktuator.

Pada penelitian ini, sistem sortasi otomatis juga dilengkapi dengan proses pengukuran berat setelah buah masuk ke dalam wadah penyortiran. *Load cell* digunakan untuk mengukur berat buah pada masing-masing kategori, sedangkan modul HX711 meneruskan hasil pembacaan *load cell* ke ESP32 untuk diproses. Hasil klasifikasi dan data berat selanjutnya dapat ditampilkan melalui LCD dan halaman monitoring berbasis HTML sehingga kondisi sistem dan hasil penyortiran dapat dipantau secara langsung.

#### 2.2.4. *Belt Conveyor*



**Gambar 2.4** Elemen Sistem *Belt Conveyor*

*Belt conveyor* pada Gambar 2.4 adalah mesin pemindah bahan menggunakan sabuk karet (*belt*) yang tidak berujung, terdiri dari beberapa lapisan yang diperkeras dengan serat baja (*fiber steel*) dan atau kawat baja untuk menghasilkan kekuatan pada *belt*. *Belt conveyor* dapat digunakan untuk memindahkan muatan satuan (*unit load*) maupun muatan curah (*bulk load*) sepanjang garis lurus (*horizontal*) atau sudut inklinasi terbatas.

*Belt conveyor* banyak digunakan oleh industri. Pada industri pengecoran digunakan untuk membawa kayu potongan (*chip*) ke *chipper* dan mendistribusikan bubur kertas kering (*bale pulp*) pada industri kertas, memindahkan biji batu bara

pada unit pembangkit daya dan pertambangan batu bara, di antara langkah *processing* pada industri makanan, dan sebagainya.

Berdasarkan perencanaan, konveyor sabuk dapat dibedakan menjadi *stationary conveyor* dan portable (*mobile*) *conveyor*. Berdasarkan lintasan gerak, konveyor sabuk diklasifikasikan sebagai: Horizontal, Inklinasi, dan Kombinasi horizontal-inklinasi. *Belt* bisa terbuat dari *textile* dan strip baja (Gambar 2.5), serta kawat baja (*woven-mesh steel wire*). Jenis bahan sabuk strip baja sesuai untuk memindahkan *electronic circuit board*, bahan yang panas, dan sesuai untuk memindahkan bahan yang bermuatan listrik.



**Gambar 2.5** Sabuk Strip Baja dan Tekstil

Jenis bahan *belt* strip baja sesuai untuk memindahkan *electronic circuit board*, bahan yang panas, dan sesuai untuk memindahkan bahan yang bermuatan listrik. Jenis belt testil terdiri dari: *cotton* (*woven* atau *sewed*), *duck catton*, *camel hair*, dan *rubberized textile belt*. *Belt conveyor* jenis *belt textil* harus memenuhi persyaratan: tidak menyerap air (*low hygroscopicity*), kekuatan tinggi, ringan pertambahan tidak mudah lepas (*high resistivity to play separation*), dan tahan lama (*long service life*) [6].

### 2.2.5. Motor Servo MG996R



**Gambar 2.6** Motor Servo MG996R

Motor Servo MG996R pada Gambar 2.6 adalah sebuah motor dengan sistem *closed feedback* di mana posisi dari motor akan diinformasikan kembali ke rangkaian kontrol yang ada di dalam motor servo. Motor ini terdiri dari sebuah motor, serangkaian *gear*, potensiometer dan rangkaian kontrol. Potensiometer berfungsi untuk menentukan batas sudut dari putaran servo. Sedangkan sudut dari sumbu motor servo diatur berdasarkan lebar pulsa yang dikirim melalui kaki sinyal dari kabel motor. Tampak pada gambar dengan pulsa 1.5mS pada periode selebar 2mS maka sudut dari sumbu motor akan berada pada posisi tengah. Semakin lebar pulsa OFF maka akan semakin besar gerakan sumbu ke arah jarum jam dan semakin kecil pulsa OFF maka akan semakin besar gerakan sumbu ke arah yang berlawanan dengan jarum jam. Jenis motor servo tampak pada Gambar 2.7.

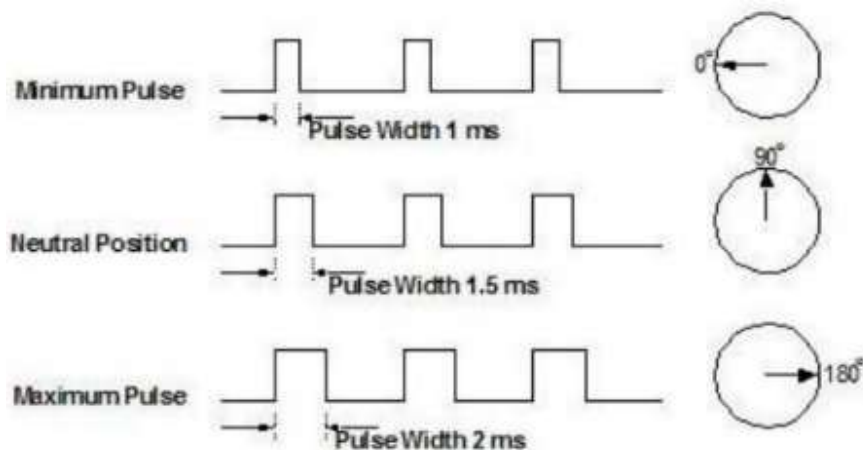


**Gambar 2.7** Jenis Motor Servo

Motor servo adalah motor yang berputar lambat, dimana biasanya ditunjukkan oleh rate putarannya yang lambat, namun demikian memiliki torsi yang kuat karena *internal gear*-nya. Lebih dalam dapat digambarkan bahwa sebuah motor servo memiliki:

1. 3 jalur kabel: *power*, *ground*, dan *control*
2. Sinyal *control* mengendalikan posisi
3. Operasional dari servo motor dikendalikan oleh sebuah pulsa selebar  $\pm 20\text{ms}$ , dimana lebar pulsa antara  $0.5\text{ms}$  dan  $2\text{ms}$  menyatakan akhir dari *range* sudut maksimum.
4. Konstruksi didalamnya meliputi *internal gear*, potensiometer, dan *feedback control*

Pemberian Pulsa Motor Servo pada Gambar 2.8 akan bekerja secara baik jika pada bagian pin kontrolnya diberikan sinyal PWM dengan frekuensi  $50\text{Hz}$ . Dimana pada saat sinyal dengan frekuensi  $50\text{Hz}$  tersebut dicapai pada kondisi *Ton duty cycle*  $1.5\text{ms}$ , maka rotor dari motor akan berhenti tepat di tengah-tengah (sudut  $0^\circ$ /netral).



**Gambar 2.8** Pemberian Pulsa Motor Servo [7]

**Tabel 2.3** Spesifikasi Motor Servo MG996R

| Parameter                  | Spesifikasi                                                  |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Tipe                       | MG996R <i>High Torque Metal Gear Dual Ball Bearing Servo</i> |
| Berat                      | 55g                                                          |
| Dimensi                    | 40,7 × 19,7 × 42,9mm                                         |
| <i>Stall Torque</i> (4,8V) | 9,4 kgf·cm                                                   |
| <i>Stall Torque</i> (6V)   | 11 kgf·cm                                                    |
| Kecepatan Operasi (4,8V)   | 0,17 s/60°                                                   |
| Kecepatan Operasi (6V)     | 0,14 s/60°                                                   |
| Tegangan Operasi           | 4,8–7,2V                                                     |
| Arus Operasi               | 500–900mA (6V)                                               |
| <i>Stall Current</i>       | 2,5A (6V)                                                    |
| <i>Dead Band Width</i>     | 5μs                                                          |
| Rentang Suhu Operasi       | 0–55°C                                                       |
| Jenis <i>Gear</i>          | Metal <i>gear</i>                                            |
| <i>Bearing</i>             | <i>Dual ball bearing</i>                                     |
| Sudut Rotasi               | ±60° atau sekitar 120° total                                 |
| Kabel                      | 30cm, 3-pin                                                  |
| Sinyal Kontrol             | PWM                                                          |
| Periode PWM                | 20ms (50Hz)                                                  |
| Kabel PWM                  | <i>Orange</i>                                                |
| Kabel VCC (+)              | Merah                                                        |
| Kabel <i>Ground</i> (–)    | Coklat                                                       |

Servo motor MG996R merupakan aktuator yang digunakan untuk menggerakkan mekanisme penyortiran pada sistem. Pada tabel 2.3 menunjukkan servo MG996R memiliki *metal gear* dan *dual ball bearing* sehingga mampu menghasilkan torsi yang cukup besar dengan torsi maksimum sebesar 11 kgf·cm

pada tegangan 6V. Servo MG996R juga dapat beroperasi pada tegangan 4,8–7,2V dengan kecepatan operasi hingga 0,14 s/60° pada 6V. Pengendalian posisi servo dilakukan menggunakan sinyal PWM dengan periode 20ms (50Hz), dimana karakteristik tersebut membuat MG996R sesuai digunakan sebagai penggerak mekanisme pemisah atau pendorong buah pada alat penyortir.

#### 2.2.6. Motor *Stepper* Nema17



**Gambar 2.9** *Stepper* Motor Nema17

Motor *stepper* Nema17 pada Gambar 2.9 merupakan perangkat elektromekanis yang bekerja dengan mengubah pulsa elektronis menjadi gerakan mekanis diskrit. Motor *stepper* bergerak berdasarkan urutan pulsa yang diberikan kepada motor. Karena itu, untuk menggerakkan motor *stepper* diperlukan pengendali motor *stepper* yang membangkitkan pulsa-pulsa periodik. Karakteristik motor *stepper* diantaranya Sudut rotasi motor proporsional dengan pulsa masukan sehingga lebih mudah diatur. Motor dapat langsung memberikan torsi penuh pada saat mulai bergerak, Posisi dan pergerakan repetisinya dapat ditentukan secara presisi. Memiliki respon yang sangat baik terhadap mulai, stop dan berbalik (perputaran). Sangat realibel karena tidak adanya sikat yang bersentuhan dengan rotor seperti pada motor DC. Dapat menghasilkan perputaran yang lambat sehingga beban dapat dikopel langsung ke porosnya. Frekuensi perputaran dapat ditentukan secara bebas dan mudah pada *range* yang luas [8].

Pada dasarnya terdapat 3 tipe motor *stepper* yaitu: Motor *stepper* tipe *Variable Reluctance* (VR), Motor *stepper* jenis ini telah lama ada dan merupakan jenis motor yang secara struktural paling mudah untuk dipahami. Motor ini terdiri

atas sebuah rotor besi lunak dengan beberapa gerigi dan sebuah lilitan stator. Ketika lilitan stator diberi energi dengan arus DC, kutub-kutubnya menjadi termagnetasi. Perputaran terjadi ketika gigi-gigi rotor tertarik oleh kutub-kutub stator. Kemudian, Motor *stepper* tipe *Permanent Magnet* (PM), Motor jenis ini biasanya memiliki resolusi langkah (*step*) yang rendah yaitu antara  $7,5^0$  hingga  $15^0$  per langkah atau 48 hingga 24 langkah setiap putarannya. Selain itu terdapat Motor *stepper* tipe *Hybrid* (HB), Motor tipe ini paling banyak digunakan dalam berbagai aplikasi karena kinerja lebih baik. Motor tipe *hybrid* dapat menghasilkan resolusi langkah yang tinggi yaitu antara  $3,6^0$  hingga  $0,9^0$  per langkah atau 100-400 langkah setiap putarannya [9].

Penentuan motor penggerak transfer *tube* diantara ditentukan dengan menghitung besarnya torsi. Torsi yang dapat dihasilkan oleh motor *stepper* dapat dihitung berdasarkan perbandingan daya kerja motor terhadap kecepatan putarannya atau dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (2.3)$$

Dengan:

$T$ : Torsi (Nm)

$P$ : Daya kerja motor (Watt)

$\omega$ : Kecepatan perputaran motor (rad/det)

Untuk mengetahui beban maksimum yang dapat digerakkan motor *stepper* dapat diperoleh dengan menghitung torsi dengan menggunakan rumus:

$$T = F \cdot r \quad (2.4)$$

Dengan:

$F$ : Gaya berat yang bekerja terhadap motor (N)

$P$ : Jarak sumbu putar pada motor (m)

*Step* motor yang dipilih sesuai derajat per *step* yang diinginkan, derajat per *step* adalah faktor terpenting dalam pemilihan motor *stepper* sesuai dengan aplikasinya. Tiap-tiap motor *stepper* mempunyai spesifikasi masing-masing. Dalam pengoperasian-nya kita dapat menggunakan 2 prinsip yaitu *full step* atau *half step*. Dengan *full step* berarti motor *stepper* berputar sesuai dengan spesifikasi derajat per *step*-nya, sedangkan *half step* berarti motor *stepper* berputar setengah derajat per *step* dari spesifikasi motor *stepper* tersebut.

Motor *stepper* Nema17 digunakan sebagai penggerak utama pada sistem *conveyor* untuk mengatur pergerakan *belt* dalam proses penyortiran buah kopi. Motor ini menghasilkan gerakan secara bertahap sehingga putaran motor dapat dikendalikan sesuai kebutuhan sistem. Spesifikasi motor *stepper* Nema17 yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2.4.

**Tabel 2.4** Spesifikasi Motor *Stepper* Nema17

| Parameter                     | Nema17S  | Nema17M  | Nema17L  |
|-------------------------------|----------|----------|----------|
| Tegangan input                | 14–48VDC | 14–48VDC | 14–48VDC |
| Arus kontinu                  | 1,8A     | 1,8A     | 1,8A     |
| <i>Holding torque</i> kontinu | 0,35Nm   | 0,45Nm   | 0,65Nm   |
| <i>Holding torque</i> puncak  | 0,50Nm   | 0,60Nm   | 1,05Nm   |
| Sudut langkah                 | 1,8°     | 1,8°     | 1,8°     |
| Resolusi <i>encoder</i>       | 4096 ppr | 4096 ppr | 4096 ppr |
| Berat                         | 0,37kg   | 0,44kg   | 0,59kg   |

### 2.2.7. Sensor Warna TCS34725



**Gambar 2.10** TCS34725 *Color Sensor*

Pada Gambar 2.10, Sensor warna TCS34725 merupakan sensor warna digital yang digunakan untuk mendeteksi karakteristik warna suatu objek berdasarkan kanal *Red*, *Green*, *Blue*, dan *Clear* (RGBC). Sensor ini menggunakan *photodiode* dengan filter warna yang memungkinkan intensitas cahaya dari masing-masing komponen warna diterjemahkan menjadi data digital. Data hasil pembacaan sensor dikirimkan ke mikrokontroler melalui antarmuka komunikasi I2C untuk selanjutnya diproses dalam menentukan karakteristik warna objek. Berbeda dengan sensor multispektral yang mampu membaca banyak rentang panjang gelombang cahaya, TCS34725 bekerja dengan mendeteksi tiga komponen warna dasar, yaitu merah (*Red*), hijau (*Green*), dan biru (*Blue*) atau dikenal dengan sistem warna RGB. Kombinasi nilai ketiga komponen tersebut digunakan sebagai dasar untuk mengenali karakteristik warna suatu objek. Dengan kemampuan tersebut, sensor TCS34725 banyak diterapkan pada sistem penyortiran produk, pendeteksi warna, pengendalian robot, serta berbagai aplikasi otomasi industri yang membutuhkan proses identifikasi warna secara cepat dan konsisten.

Prinsip kerja sensor TCS34725 didasari ketika permukaan buah kopi terkena pencahayaan dari sumber LED pada modul sensor, sebagian cahaya akan dipantulkan kembali menuju sensor. Cahaya pantulan tersebut diterima oleh susunan *photodiode* yang memiliki kanal *Red*, *Green*, *Blue*, dan *Clear*. Intensitas cahaya pada masing-masing kanal dikonversi menjadi nilai digital oleh ADC internal sensor. Nilai tersebut kemudian dapat dibaca oleh ESP32 melalui

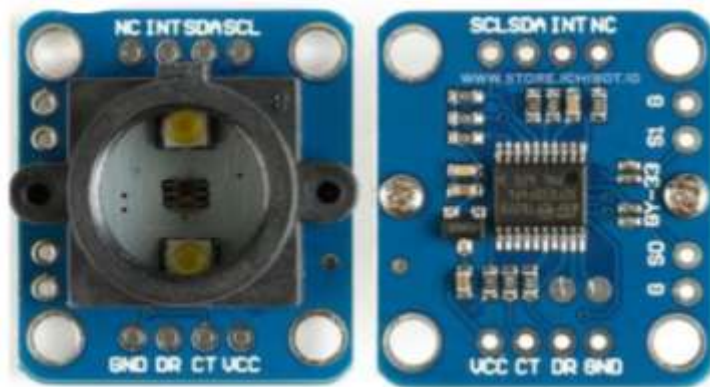
komunikasi I2C dan digunakan sebagai parameter untuk mengidentifikasi tingkat kematangan buah kopi.

Sensor warna TCS34725 memiliki tegangan suplai sesuai dengan spesifikasi sensor dan menggunakan antarmuka komunikasi I2C sehingga dapat diintegrasikan dengan mikrokontroler ESP32. Sensor ini memiliki empat kanal pengukuran, yaitu *Red* (R), *Green* (G), *Blue* (B), dan *Clear* (C), dengan resolusi ADC 16-bit. Data hasil pembacaan dari keempat kanal tersebut dikirimkan secara digital melalui komunikasi I2C dan selanjutnya diproses oleh ESP32 sebagai parameter untuk mengidentifikasi karakteristik warna permukaan buah kopi. Selain itu, modul TCS34725 dilengkapi dengan LED putih sebagai sumber pencahayaan pada objek yang diamati. Keberadaan LED tersebut membantu memberikan pencahayaan yang lebih konsisten pada area pembacaan sensor sehingga pengaruh perubahan pencahayaan lingkungan terhadap hasil pembacaan warna dapat diminimalkan. Spesifikasi sensor warna TCS34725 dapat dilihat pada Tabel 2.5.

**Tabel 2.5** Spesifikasi Sensor Warna TCS34725

| Parameter             | Spesifikasi                               |
|-----------------------|-------------------------------------------|
| Jenis Sensor          | <i>Color Light-to-Digital Converter</i>   |
| Kanal pengukuran      | <i>Red, Green, Blue, dan Clear</i> (RGBC) |
| Filter                | IR-blocking filter                        |
| Resolusi ADC          | 16-bit                                    |
| Antarmuka komunikasi  | I2C                                       |
| Kecepatan I2C         | Hingga 400kHz                             |
| Tegangan suplai (VDD) | 2,7 – 3,6V                                |
| Suhu operasi          | –30 hingga 70°C                           |
| Arus aktif            | 235–330μA                                 |
| Penguatan (Gain)      | 1×, 4×, 16×, dan 60×                      |
| Waktu integrasi       | 2,4 – 614ms                               |
| Nilai maksimum ADC    | 65.535 <i>counts</i>                      |
| <i>Dynamic range</i>  | Hingga 3.800.000:1                        |

| Parameter                  | Spesifikasi                                |
|----------------------------|--------------------------------------------|
| Antarmuka <i>interrupt</i> | INT, <i>active-low</i> , <i>open-drain</i> |
| Kemasan IC                 | 2 × 2,4mm <i>Dual Flat No-Lead</i> (FN)    |



**Gambar 2.11** Pin Sensor TCS34725

Pada konfigurasi pin sensor warna TCS34725 pada Gambar 2.11, sensor menggunakan antarmuka komunikasi I2C untuk mengirimkan data hasil pembacaan warna ke ESP32. Pin VDD digunakan sebagai sumber tegangan sensor, sedangkan pin GND digunakan sebagai referensi *ground*. Pin SDA berfungsi sebagai jalur data komunikasi I2C dan pin SCL sebagai jalur *clock* komunikasi I2C. Sensor juga menyediakan pin INT sebagai keluaran *interrupt* yang dapat digunakan untuk memberikan indikasi kondisi tertentu, sedangkan pin NC tidak digunakan dalam sistem. Pada penelitian ini, komunikasi utama antara sensor TCS34725 dan ESP32 menggunakan pin SDA dan SCL sehingga data kanal *Red*, *Green*, *Blue*, dan *Clear* dapat dibaca dan diproses oleh mikrokontroler. Berikut konfigurasi pin sensor warna TCS34725 ditunjukkan pada Tabel 2.6.

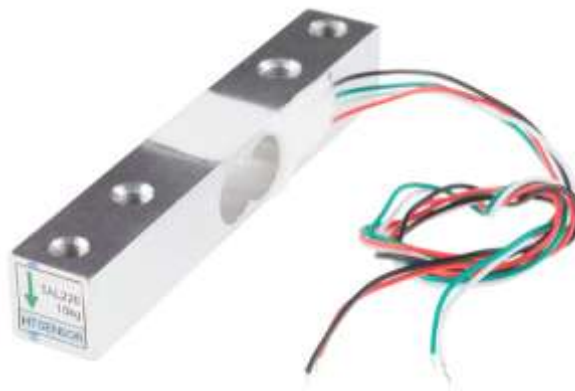
**Tabel 2.6** Konfigurasi Pin Sensor Warna TCS34725

| Nama Pin | Fungsi                                |
|----------|---------------------------------------|
| VDD      | Tegangan suplai sensor                |
| SCL      | Jalur <i>clock</i> komunikasi I2C     |
| GND      | <i>Ground</i> /catu daya              |
| NC       | Tidak digunakan ( <i>No Connect</i> ) |

| Nama Pin | Fungsi                                      |
|----------|---------------------------------------------|
| IT       | Sinyal <i>interrupt</i> , <i>active-low</i> |
| SDA      | Jalur data komunikasi I2C                   |

Penggunaan sensor warna TCS34725 pada sistem penyortiran buah kopi memberikan beberapa keuntungan dibandingkan proses identifikasi secara manual. Pembacaan warna dilakukan berdasarkan nilai digital sehingga hasil identifikasi menjadi lebih objektif, konsisten, dan tidak dipengaruhi oleh perbedaan persepsi pengamat maupun tingkat kelelahan operator. Selain itu, waktu respons sensor yang relatif cepat memungkinkan proses pembacaan dilakukan secara kontinu pada sistem *conveyor*. Dengan karakteristik tersebut, sensor warna TCS34725 dinilai sesuai untuk diterapkan sebagai perangkat identifikasi warna pada sistem penyortiran buah kopi otomatis berbasis ESP32.

#### 2.2.8. Sensor *Load Cell*



**Gambar 2.12** Sensor *Load Cell*

Sensor *load cell* pada Gambar 2.12 telah lama dikenal sebagai perangkat pengukur berat yang memiliki tingkat akurasi tinggi dan stabilitas pembacaan yang baik dalam berbagai aplikasi industri maupun domestik. Sensor bekerja dengan mengubah gaya mekanik menjadi sinyal listrik yang kemudian dikonversi menjadi data digital melalui modul penguat seperti HX711. Keunggulan *load cell* dalam memberikan pembacaan massa yang presisi menjadikannya pilihan tepat untuk sistem pemantauan berbasis berat. Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa integrasi *load cell* dengan mikrokontroler seperti ESP32

mampu menghasilkan sistem pemantauan yang handal dan responsif terhadap perubahan beban secara dinamis. Mikrokontroler ESP32 dipilih sebagai unit pemrosesan utama karena memiliki kemampuan konektivitas Wi-Fi dan *Bluetooth* yang terintegrasi, konsumsi daya yang rendah, serta dukungan pemrograman melalui Arduino IDE yang memudahkan proses pengembangan [10].

**Tabel 2.7** Spesifikasi Sensor *Load Cell*

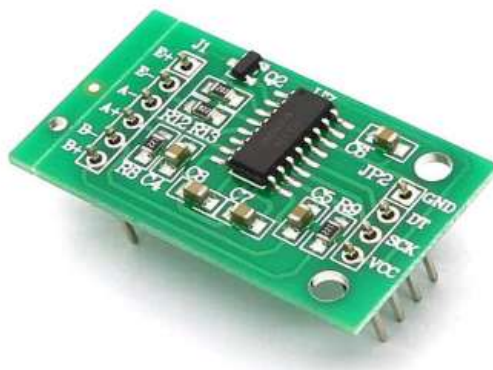
| Parameter                      | Spesifikasi                           |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| Type                           | <i>Parallel Beam</i>                  |
| Model                          | TAL220B                               |
| Kapasitas                      | 3kg dan 5kg                           |
| Material                       | <i>Aluminium Alloy</i>                |
| <i>Rated Output</i>            | $1,0 \pm 0,1 \text{mV/V}$             |
| Tegangan Eksitasi              | 3–10VDC                               |
| <i>Safe Overload</i>           | 120% FS                               |
| <i>Ultimate Overload</i>       | 150% FS                               |
| <i>Combined Error</i>          | $\pm 0,05\%$ FS                       |
| <i>Zero Balance</i>            | $\pm 0,1\%$ FS                        |
| <i>Non-linearity</i>           | $\pm 0,05\%$ FS                       |
| <i>Hysteresis</i>              | $\pm 0,05\%$ FS                       |
| <i>Repeatability</i>           | $\pm 0,05\%$ FS                       |
| <i>Creep</i>                   | $\pm 0,1\%$ FS/3 min                  |
| <i>Input Resistance</i>        | $1000 \pm 10\Omega$                   |
| <i>Output Resistance</i>       | $1090 \pm 10\Omega$                   |
| <i>Insulation Resistance</i>   | $\geq 2000\text{M}\Omega$             |
| <i>Operating Temperature</i>   | –10 sampai +55°C                      |
| <i>Compensated Temperature</i> | –10 sampai +40°C                      |
| <i>Protection</i>              | IP65                                  |
| Dimensi                        | $55 \times 12,7 \times 12,7\text{mm}$ |
| Kabel                          | 4-wire, $\pm 200\text{mm}$            |

Sensor *load cell* pada Tabel 2.7 merupakan jenis *parallel beam load cell* yang menggunakan elemen *strain gauge* sebagai elemen pendeteksi perubahan beban. Ketika beban diberikan pada bagian sensor, elemen elastis pada *load cell* mengalami deformasi yang sangat kecil. Deformasi tersebut menyebabkan perubahan resistansi pada *strain gauge* yang kemudian menghasilkan perubahan tegangan keluaran dari rangkaian *Wheatstone bridge*. Besarnya perubahan tegangan keluaran berbanding dengan beban yang diberikan sehingga dapat digunakan untuk mengetahui berat objek.

Pada sistem *conveyor* penyortir buah kopi, *load cell* digunakan untuk mengukur berat buah kopi yang melewati bagian penimbangan. Sensor yang digunakan memiliki kapasitas 3kg dan 5kg, sehingga masing-masing sensor memiliki batas maksimum beban sesuai kapasitasnya. Sinyal keluaran dari *load cell* memiliki nilai yang relatif kecil sehingga tidak dapat langsung dibaca oleh mikrokontroler. Oleh karena itu, *load cell* dihubungkan dengan modul HX711 yang berfungsi sebagai penguat sinyal sekaligus *analog-to-digital converter* (ADC) sehingga perubahan tegangan dari *load cell* dapat dikonversi menjadi data digital dan diproses oleh ESP32.

*Load cell* memiliki empat kabel yang terhubung pada rangkaian *Wheatstone bridge*, yaitu jalur eksitasi dan jalur keluaran sinyal. Dalam penggunaannya, *load cell* memerlukan tegangan eksitasi untuk menghasilkan sinyal keluaran akibat adanya perubahan beban. Nilai keluaran tersebut kemudian diproses melalui HX711 untuk memperoleh nilai berat. Dengan demikian, kombinasi *load cell* dan HX711 memungkinkan sistem melakukan pengukuran berat buah kopi sebelum data digunakan dalam proses monitoring dan penyortiran.

### 2.2.9. IC HX711 *Module Sensor*



**Gambar 2.13** IC HX711 *Module Sensor*

IC HX711 *Module Sensor* pada Gambar 2.13 adalah modul timbangan yang memiliki prinsip kerja mengkonversi perubahan yang terukur dalam perubahan resistansi dan mengkonversinya ke dalam besaran tegangan melalui rangkaian yang ada [11]. Modul ini melakukan komunikasi dengan *computer*/mikrokontroler melalui TTL 232. Prinsip Kerja dari modul HX711 adalah mengkonversi perubahan yang terukur dalam perubahan resistansi dan mengkonversinya ke dalam besaran tegangan yang nantinya besaran ini diteruskan ke Arduino Uno. HX711 biasanya digunakan pada bidang *aerospace*, mekanik, elektrik, kimia, konstruksi, farmasi dan lainnya serta untuk mengukur gaya, gaya tekanan, perpindahan, gaya tarikan, torsi dan percepatan [12].

**Tabel 2.8** HX711 *Specifications*

| Parameter        | Spesifikasi                     |
|------------------|---------------------------------|
| Nama IC          | HX711                           |
| Resolusi ADC     | 24-bit                          |
| Tegangan operasi | 2,6–5,5V                        |
| Penguatan PGA    | 32×, 64×, 128×                  |
| 10 SPS/80 SPS    | 10 SPS/80 SPS                   |
| Kanal input      | 2 kanal diferensial             |
| Antarmuka        | Serial DOUT dan PD_SCK          |
| Aplikasi         | <i>Load cell/weighing scale</i> |

Berdasarkan Tabel 2.8, HX711 merupakan modul penguat dan pembaca sinyal dari *load cell* yang digunakan untuk memperoleh data berat buah kopi. HX711 bekerja dengan menerima sinyal listrik yang sangat kecil dari perubahan resistansi *strain gauge* pada *load cell*, kemudian memperkuat dan mengubahnya menjadi data digital menggunakan ADC beresolusi 24-bit.

HX711 juga menyediakan penguatan sinyal melalui *Programmable Gain Amplifier* (PGA), dengan pilihan penguatan pada kanal A sebesar 64 atau 128 kali dan kanal B sebesar 32 kali. Selain itu, laju pembacaan data dapat diatur pada 10 SPS atau 80 SPS. Pada sistem penyortir buah kopi, hasil pembacaan *load cell* yang telah dikonversi oleh HX711 selanjutnya digunakan oleh ESP32 untuk menentukan berat buah kopi pada masing-masing kategori hasil penyortiran, kemudian data tersebut dapat ditampilkan pada sistem monitoring berbasis *website*.

#### 2.2.10. Mikrokontroler ESP32



**Gambar 2.14** Mikrokontroler ESP32

Mikrokontroler ESP32 pada Gambar 2.14 merupakan suatu sistem komputer kecil dalam satu chip yang berfungsi sebagai pusat pengendali dalam suatu sistem elektronik. ESP32 dilengkapi dengan CPU (*Central Processing Unit*), memori, serta fitur komunikasi nirkabel berupa Wi-Fi dan *Bluetooth* yang memungkinkan sistem terhubung dengan jaringan internet. Dalam penelitian ini, ESP32 berperan sebagai pusat pengendali sistem penyortiran buah kopi. ESP32

menerima data dari sensor warna TCS34725 dan sensor *load cell*, mengolah data untuk menentukan tingkat kematangan serta berat buah kopi, mengendalikan motor *stepper* dan motor servo, menampilkan informasi melalui LCD I2C, serta menyediakan antarmuka monitoring berbasis *web* melalui koneksi Wi-Fi.

Selain itu, ESP32 juga digunakan untuk mengirim data temperatur ke *spreadsheet* atau *database* berbasis IoT melalui koneksi WiFi. Dengan adanya fitur tersebut, data hasil pengukuran dapat dipantau dan disimpan secara digital sehingga memudahkan proses monitoring dan analisis data pengujian. Penggunaan ESP32 dipilih karena memiliki kemampuan pemrosesan yang baik, konsumsi daya yang rendah, mudah diprogram, serta mendukung implementasi sistem monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT).

Keluarga ESP32 termasuk dalam *chip* ESP32-D0WDQ6 (ESP32-D0WD), ESP32-D2WD, ESP32-S0WD, dan sistem dalam paket (SiP) ESP32-PICO-D4. Mikroprosesor yang digunakan oleh ESP32 adalah Tensilica Xtensa LX6 *dual-core* atau *single-core* dengan *clock rate* hingga 240MHz. Dengan rilisnya ESP32, *Espressif System* juga menawarkan fitur-fitur yang tertanam pada ESP32, dimana dengan dimensi yang kecil (25.5 x 18.0 x 2.8mm) modul ini sangat mudah digunakan karena komponennya sudah terintegrasi dengan *built-in antenna switches*, RF balun, *power amplifier*, *low-noise receive amplifier*, *filters*, dan *power management modules*. ESP32 memiliki spesifikasi seperti yang ditampilkan oleh Tabel 2.9.

**Tabel 2.9** Spesifikasi ESP32

| Parameter      | Spesifikasi                                |
|----------------|--------------------------------------------|
| Mikrokontroler | ESP32                                      |
| Prosesor       | Xtensa® <i>single/dual-core</i> 32-bit LX6 |
| Frekuensi CPU  | Hingga 240MHz                              |
| ROM            | 448KB                                      |
| SRAM           | 520KB                                      |
| GPIO           | 34 pin <i>programmable</i> GPIO            |

| Parameter                                     | Spesifikasi                                    |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|
| ADC                                           | 12-bit SAR ADC, hingga 18 <i>channel</i>       |
| DAC                                           | 2 × 8-bit DAC                                  |
| PWM                                           | Motor PWM dan LED PWM hingga 16 <i>channel</i> |
| SPI                                           | 4 <i>interface</i> SPI                         |
| I2C                                           | 2 <i>interface</i> I2C                         |
| UART                                          | 3 <i>interface</i> UART                        |
| Wi-Fi                                         | 802.11 b/g/n, 2,4GHz                           |
| Kecepatan Wi-Fi                               | Hingga 150Mbps                                 |
| <i>Bluetooth</i>                              | <i>Bluetooth</i> v4.2 BR/EDR dan BLE           |
| Tegangan operasi                              | 2,3–3,6V                                       |
| Tegangan yang direkomendasikan                | 3,3V                                           |
| Arus keluaran catu daya yang direkomendasikan | ≥ 500mA                                        |

Mikrokontroler ESP32 merupakan mikrokontroler yang digunakan sebagai pusat pengendalian pada sistem *conveyor* penyortir buah kopi. ESP32 memiliki mikroprosesor Xtensa LX6 dengan konfigurasi *single-core* atau *dual-core* dan frekuensi hingga 240 MHz, serta dilengkapi memori internal berupa 448 KB ROM dan 520 KB SRAM. ESP32 juga menyediakan berbagai antarmuka komunikasi dan *input/output* yang dapat digunakan untuk menghubungkan mikrokontroler dengan sensor maupun aktuator pada sistem.

Pada penelitian ini, ESP32 berfungsi untuk mengolah data yang diperoleh dari sensor warna TCS34725 dan sensor *load cell* melalui modul HX711. Data pembacaan sensor diproses untuk menentukan tingkat kematangan buah kopi dan memperoleh informasi berat hasil penyortiran. Selain itu, ESP32 mengendalikan aktuator berupa motor *stepper* NEMA17 melalui *driver* A4988 dan motor servo MG996R sesuai dengan proses kerja sistem. Integrasi berbagai perangkat tersebut memungkinkan ESP32 berperan sebagai pusat kendali yang mengatur proses pembacaan sensor, penggerakan *conveyor*, dan mekanisme penyortiran.

Penggunaan ESP32 pada sistem ini juga didukung oleh tersedianya antarmuka I2C, SPI, UART, GPIO, ADC, DAC, serta PWM yang dapat digunakan sesuai kebutuhan perangkat yang terhubung.

Selain sebagai pusat pengendali, ESP32 digunakan untuk menyediakan antarmuka monitoring berbasis *website* HTML. ESP32 terhubung ke jaringan Wi-Fi sehingga halaman monitoring dapat diakses melalui alamat IP ESP32 menggunakan perangkat yang berada pada jaringan yang sama. Data hasil identifikasi tingkat kematangan dan pengukuran berat kemudian ditampilkan pada halaman tersebut sehingga kondisi dan hasil proses penyortiran dapat dipantau secara *real-time*. Kemampuan Wi-Fi 802.11 b/g/n pada ESP32 dengan kecepatan hingga 150Mbps mendukung komunikasi jaringan yang digunakan dalam sistem monitoring.

#### 2.2.11. Power Supply (PSU) AC-DC 12V 10A



**Gambar 2.15** Power Supply AC-DC 12V 10A

Adaptor Power Supply Unit (PSU) AC-DC 12V 10A pada Gambar 2.15, merupakan komponen yang berfungsi mengubah sumber tegangan bolak-balik (*Alternating Current/AC*) dari jaringan listrik PLN menjadi tegangan searah (*Direct Current/DC*) yang stabil dan dapat digunakan oleh perangkat elektronika. Pada perancangan sistem Tugas Akhir ini, adaptor PSU AC-DC 12V 5A digunakan sebagai sumber catu daya utama yang menyuplai energi listrik ke seluruh rangkaian kontrol dan monitoring, seperti mikrokontroler ESP32, sensor warna, motor, serta perangkat pendukung lainnya. Penggunaan adaptor PSU dipilih karena mampu

memberikan tegangan keluaran yang lebih stabil dibandingkan sumber daya baterai, sehingga dapat meningkatkan keandalan sistem selama proses pengujian maupun pengoperasian secara kontinu. Selain itu, adaptor PSU juga memiliki sistem isolasi antara sisi tegangan tinggi (220VAC) dan sisi tegangan rendah (DC) sehingga lebih aman digunakan pada sistem elektronika.

PSU jenis *switching power supply* bekerja dengan melakukan proses pensaklaran tegangan pada frekuensi tinggi sehingga proses konversi AC menjadi DC dapat dilakukan dengan ukuran perangkat yang relatif ringkas dan efisien. Pada penggunaannya, tegangan keluaran PSU kemudian didistribusikan ke bagian-bagian sistem sesuai kebutuhan tegangan masing-masing komponen. Komponen yang membutuhkan tegangan lebih rendah dapat memperoleh catu daya melalui regulator atau *buck converter* yang digunakan pada sistem.

Secara umum, terminal pada PSU terdiri atas bagian masukan dan keluaran. Terminal L (*Line*) dan N (*Neutral*) digunakan untuk menghubungkan PSU dengan sumber tegangan AC, sedangkan terminal V+ dan V- digunakan sebagai keluaran tegangan DC positif dan negatif. Pada beberapa jenis PSU juga terdapat terminal FG (*Frame Ground*) yang berfungsi sebagai pengaman dan penghubung *grounding* pada rangkaian. Konfigurasi terminal tersebut memungkinkan PSU terhubung dengan sumber listrik dan mendistribusikan tegangan DC ke rangkaian sistem.

Adaptor PSU AC-DC bekerja melalui beberapa tahapan proses konversi energi listrik. Tegangan masukan sebesar 220VAC 50Hz terlebih dahulu masuk ke rangkaian penyearah (*rectifier*) yang mengubah tegangan AC menjadi DC. Selanjutnya tegangan DC tersebut difilter menggunakan kapasitor untuk mengurangi *ripple voltage*, kemudian distabilkan melalui rangkaian regulator *switching* sehingga menghasilkan tegangan keluaran yang sesuai dengan kebutuhan beban. Pada sistem ini digunakan adaptor AC-DC dengan keluaran tegangan 5VDC yang kemudian dimanfaatkan secara langsung untuk perangkat bertegangan rendah maupun sebagai sumber masukan ke regulator internal pada beberapa modul elektronik. Pemilihan tegangan 5VDC dilakukan karena sebagian besar sensor,

modul komunikasi, dan perangkat kontrol memiliki rentang tegangan kerja yang kompatibel pada level tersebut.

**Tabel 2.10** Spesifikasi Adaptor PSU AC-DC 12V 5A

| Parameter                                   | Spesifikasi                                                        |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Jenis Catu Daya                             | Adaptor PSU AC-DC <i>Switching</i>                                 |
| Tegangan Masukan ( <i>Input Voltage</i> )   | 100–240VAC                                                         |
| Frekuensi Masukan                           | 50/60Hz                                                            |
| Tegangan Keluaran ( <i>Output Voltage</i> ) | 12VDC                                                              |
| Arus Keluaran Maksimum                      | 5A                                                                 |
| Daya Maksimum                               | 60W                                                                |
| <i>Voltage adjustment</i>                   | 10,8–13,2V                                                         |
| Efisiensi                                   | $\geq 80\%$                                                        |
| Tipe Regulasi                               | <i>Switching Power Supply</i>                                      |
| Proteksi Hubung Singkat                     | Tersedia                                                           |
| Proteksi Arus Lebih                         | Tersedia                                                           |
| Proteksi Tegangan Lebih                     | Tersedia                                                           |
| Isolasi I/O                                 | Ya                                                                 |
| Suhu Operasi                                | 0°C – 40°C                                                         |
| Pendinginan                                 | <i>Free air convection</i>                                         |
| Aplikasi                                    | ESP32, sensor, modul komunikasi, dan perangkat elektronika lainnya |

Secara spesifikasi pada Tabel 2.10, adaptor PSU AC-DC yang digunakan memiliki tegangan masukan (*input voltage*) sebesar 100–240VAC dengan frekuensi kerja 50/60Hz sehingga dapat digunakan pada berbagai standar jaringan listrik. Tegangan keluaran (*output voltage*) sebesar 5VDC dengan arus keluaran maksimum umumnya berkisar antara 2A hingga 3A, tergantung tipe adaptor yang digunakan.

**Tabel 2.11** *Pinout* Adaptor PSU AC-DC 12V 10A

| Pin/Terminal | Nama                           | Fungsi                                                                                            |
|--------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| L            | <i>Line</i> (Fase)             | Masukan tegangan AC dari jaringan PLN 220 VAC                                                     |
| N            | <i>Neutral</i>                 | Jalur netral sumber tegangan AC                                                                   |
| FG           | <i>Frame Ground</i> (Opsional) | <i>Grounding</i> bodi adaptor untuk meningkatkan keamanan dan mengurangi gangguan elektromagnetik |
| V+           | <i>Output</i> Positif (+)      | Keluaran tegangan DC positif (+5 VDC) untuk mensuplai rangkaian                                   |
| V–           | <i>Output</i> Negatif (GND)    | <i>Ground</i> atau referensi tegangan DC sistem                                                   |

Dari sisi *pinout* atau terminal koneksi pada Tabel 2.11, adaptor PSU AC-DC 12V 10A umumnya terdiri dari dua terminal *input* dan dua terminal *output*. Terminal *input* diberi label L (*Line/Fase*) dan N (*Neutral*) yang dihubungkan ke sumber listrik 220VAC. Pada beberapa tipe adaptor juga tersedia terminal FG (*Frame Ground*) atau *grounding* yang berfungsi meningkatkan keamanan dan mengurangi gangguan elektromagnetik. Sementara itu, terminal *output* terdiri dari V+ yang merupakan kutub positif tegangan DC dan V– yang merupakan kutub negatif atau *ground* sistem. Terminal V+ dihubungkan ke jalur catu daya perangkat elektronik, sedangkan terminal V– dihubungkan ke *ground* bersama (*common ground*) seluruh rangkaian. Konfigurasi pin tersebut memungkinkan distribusi daya yang lebih mudah serta memudahkan proses perawatan dan *troubleshooting* apabila terjadi gangguan pada sistem.

Dalam perancangan sistem Tugas Akhir ini, adaptor PSU AC-DC berperan sebagai fondasi utama penyedia energi listrik sehingga kestabilan dan keandalan sistem sangat dipengaruhi oleh performa komponen tersebut. Oleh karena itu, pemilihan adaptor dilakukan dengan mempertimbangkan kapasitas daya yang mencukupi, tingkat efisiensi yang baik, fitur proteksi yang lengkap, serta kompatibilitas tegangan terhadap seluruh perangkat yang digunakan.

#### 2.2.12. *Driver Motor Stepper A4988*



**Gambar 2.16** A4988 *Stepper Motor Driver*

Motor *stepper* pada Gambar 2.16 merupakan aktuator elektromekanik yang mengubah pulsa listrik menjadi gerakan putar bertahap. Setiap pulsa yang diterima akan menghasilkan perubahan posisi sudut tertentu sehingga motor *stepper* mampu memberikan tingkat presisi yang tinggi. Oleh karena itu, motor *stepper* banyak digunakan pada mesin CNC, printer 3D, robotika, dan sistem gerak otomatis lainnya. Dalam pengoperasiannya, motor *stepper* memerlukan *driver* motor pada Gambar 2.13 sebagai penguat sinyal kontrol dari mikrokontroler. Salah satu *driver* yang banyak digunakan adalah A4988 yang mampu mengatur arah putaran, jumlah langkah, dan kecepatan motor secara stabil. Kombinasi dari ESP32, *driver* A4988, dan motor *stepper* memungkinkan terbentuknya sistem gerak tiga sumbu yang sederhana, ekonomis, dan memiliki tingkat akurasi yang baik [13]. Tabel spesifikasi A4988 dapat dilihat pada Tabel 2.12.

**Tabel 2.12** A4988 *Specifications*

| Parameter                    | Spesifikasi                                                                    |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Tegangan suplai motor (VBB)  | 8 – 35VDC                                                                      |
| Tegangan logika (VDD)        | 3,0 – 5,5VDC                                                                   |
| Arus keluaran maksimum       | Hingga 2A/ <i>coil</i> *                                                       |
| Resistansi ON <i>output</i>  | Typ. 320m $\Omega$ ; maks. 430m $\Omega$                                       |
| Mode <i>microstepping</i>    | <i>Full</i> , 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 <i>step</i>                                  |
| Tegangan input logika        | Min. $0,7 \times VDD$ untuk HIGH; maks. $0,3 \times VDD$ untuk LOW             |
| Proteksi                     | <i>Overcurrent</i> , <i>thermal shutdown</i> , dan <i>undervoltage lockout</i> |
| Suhu <i>thermal shutdown</i> | Typ. 165°C                                                                     |
| Pengaturan arus              | Menggunakan <i>potentiometer</i> /VREF                                         |

### 2.2.13. LCD (*Liquid Crystal Display*) I2C

**Gambar 2.17** LCD (*Liquid Crystal Display*) I2C

LCD I2C pada Gambar 2.17 merupakan modul tampilan berbasis kristal cair yang dirancang untuk menampilkan berbagai jenis informasi secara visual, seperti teks, angka, maupun simbol, dan dihubungkan ke mikrokontroler melalui komunikasi antarmuka I2C (*Inter-Integrated Circuit*). Modul ini umumnya digunakan bersama LCD 16x2 atau 20x4 yang menampilkan dua atau empat baris teks dengan panjang masing-masing 16 atau 20 karakter. Dalam sistem berbasis

mikrokontroler seperti Arduino, LCD I2C sangat populer karena menyederhanakan koneksi dan menghemat penggunaan pin *input/output* digital. Tanpa modul I2C, LCD standar biasanya membutuhkan setidaknya enam pin digital untuk mengatur data dan kendali tampilan. Namun dengan bantuan modul I2C, hanya dibutuhkan dua pin yaitu SDA (Serial Data) dan SCL (Serial *Clock*), sehingga sisa pin mikrokontroler bisa digunakan untuk keperluan lain.

Modul I2C pada LCD ini bekerja dengan menggunakan *chip* ekspander seperti PCF8574, yang berfungsi mengonversi sinyal I2C menjadi sinyal indikator yang dibutuhkan oleh LCD. Dengan indikator, data yang dikirim oleh mikrokontroler secara serial akan diterjemahkan menjadi instruksi-instruksi indikator yang dapat dimengerti oleh panel LCD. Protokol I2C itu sendiri merupakan indikator komunikasi serial sinkron yang dirancang untuk memungkinkan banyak perangkat berbagi dua jalur komunikasi dengan kecepatan cukup tinggi, dan telah menjadi standar pada banyak perangkat elektronik. Melalui sistem ini, modul LCD dapat diatur untuk menampilkan teks dinamis, seperti waktu, suhu, kelembaban, status perangkat, atau hasil pembacaan sensor lainnya secara *real-time*.

Dalam penerapannya, LCD I2C sangat cocok digunakan dalam berbagai proyek elektronika dan otomasi yang melibatkan mikrokontroler seperti Arduino, ESP32, maupun STM32. Sebagai contoh, pada sistem irigasi otomatis berbasis mikrokontroler, LCD I2C dapat digunakan untuk menampilkan waktu penyiraman, kelembaban tanah saat ini, atau status pompa air. Pengguna cukup menambahkan *library* khusus seperti “LiquidCrystal\_I2C” pada Arduino IDE untuk mempermudah pemrograman modul ini. Dengan ukuran yang kompak dan kemudahan integrasi, LCD I2C menjadi pilihan praktis dan efisien untuk menyampaikan informasi penting secara langsung kepada pengguna tanpa memerlukan komputer atau perangkat tambahan lainnya [14].

#### 2.2.14. *Push Button Switch*



**Gambar 2.18** *Push Button Switch*

*Push Button Switch* pada Gambar 2.18 merupakan komponen listrik yang berfungsi untuk menghubungkan dan memutus aliran arus listrik pada suatu rangkaian. Ketika saklar berada pada posisi *On*, kontak di dalam saklar akan terhubung sehingga arus listrik dapat mengalir menuju beban atau perangkat yang digunakan. Sebaliknya, ketika saklar berada pada posisi *Off*, kontak akan terbuka sehingga aliran arus listrik terputus dan perangkat tidak memperoleh suplai daya. Oleh karena itu, saklar menjadi salah satu komponen penting dalam sistem kelistrikan karena berfungsi sebagai pengendali utama proses penyalan dan pemadaman perangkat.

Secara umum, *Push Button* bekerja berdasarkan mekanisme kontak mekanis yang menghubungkan atau memisahkan dua penghantar listrik. Jenis saklar yang paling banyak digunakan pada peralatan elektronika adalah *Single Pole Single Throw* (SPST) karena memiliki konstruksi yang sederhana dan hanya memiliki dua kondisi operasi, yaitu *On* dan *Off*. Selain mudah dipasang, saklar jenis ini juga memiliki tingkat keandalan yang baik untuk mengendalikan sumber tegangan pada sistem berdaya rendah maupun menengah.

Dalam suatu sistem berbasis mikrokontroler, *Push Button* umumnya dipasang pada jalur catu daya utama sebelum tegangan didistribusikan ke seluruh komponen, seperti mikrokontroler, sensor, aktuator, dan modul komunikasi. Dengan penempatan tersebut, pengguna dapat menyalakan atau mematikan seluruh

sistem secara mudah tanpa perlu mencabut sumber listrik. Selain meningkatkan kemudahan pengoperasian, penggunaan saklar juga membantu mengurangi konsumsi daya saat alat tidak digunakan serta melindungi komponen dari kondisi yang tidak diinginkan selama proses instalasi atau perawatan.

Pada penelitian ini, *Push Button* digunakan sebagai pengendali utama catu daya sistem penyortiran buah kopi otomatis. Saklar dipasang pada jalur keluaran *Power Supply Unit* (PSU) sebelum tegangan didistribusikan ke seluruh rangkaian, termasuk ESP32, sensor warna, sensor *load cell*, motor servo, motor *stepper*, LCD I2C, dan komponen pendukung lainnya. Dengan demikian, seluruh sistem dapat diaktifkan atau dinonaktifkan melalui satu saklar sehingga proses pengoperasian alat menjadi lebih praktis, aman, dan efisien.

#### 2.2.15. *Emergency Stop Button*



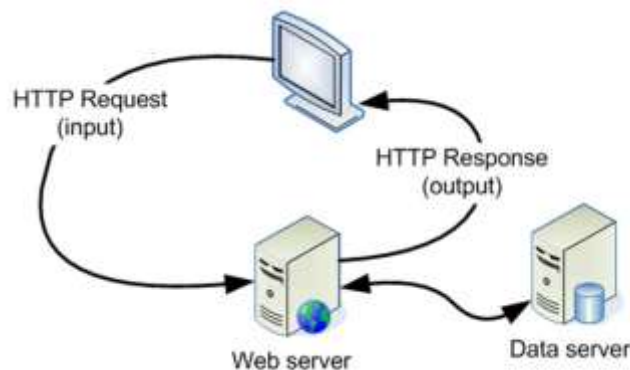
**Gambar 2.19** *Emergency Stop Button*

*Emergency Stop Button* pada Gambar 2.19 adalah mekanisme penting yang memastikan keselamatan di berbagai industri dengan memberikan respon cepat terhadap keadaan darurat, menghentikan pengoperasian mesin produksi secara cepat. Menekan tombol atau tuas *emergency stop* yang mudah diakses akan langsung memutus sirkuit daya utama, mencegah cedera, kerusakan peralatan, dan bahaya lingkungan yang lebih besar. Penggunaan *emergency stop* untuk menjaga standar keselamatan tempat kerja dan memastikan perlindungan yang cepat dan efektif dalam situasi darurat. Komponen *emergency stop* terdiri dari berbagai komponen untuk memberikan keamanan perlindungan yang maksimal terhadap operator, mesin dan lingkungan sekitar. Dari tombol atau tuas yang mudah dijangkau oleh operator, hingga rangkaian elektronik yang memutuskan pasokan

daya utama. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam tentang cara kerja dan pentingnya rangkaian *emergency stop* menjadi hal yang tak terikat bagi setiap individu yang beroperasi di lingkungan industri [15].

*Emergency stop* merupakan salah satu tipe sakelar yang mana prinsip kerjanya ketika ditekan maka akan mengunci rangkaian dan harus memutarinya ketika akan melepas atau release. *Emergency stop* digunakan dalam keadaan darurat. *Emergency stop* memiliki 2 kondisi yaitu NO (*Normally Open*) dan NC (*Normally Close*) yang mana ketika kondisi NO maka arus akan mengalir melewati rangkaian begitupun sebaliknya ketika keadaan NC maka arus listrik yang mengalir dalam rangkaian akan terputus [16].

#### 2.2.16. Web Server



**Gambar 2.20** *Web Server*

Secara sederhana, *web server* pada Gambar 2.19 adalah program komputer yang bertanggung jawab melayani permintaan HTTP dari klien (seperti *browser web*). Ketika mengetik alamat *web* (URL) di *browser*, *browser* mengirimkan permintaan ke *server* yang bersangkutan. *Server* tersebut kemudian merespons dengan mengirimkan halaman HTML, gambar, atau *file* lain yang membentuk situs *web* yang dilihat.

Dalam konteks ESP32, mikrokontroler ini berperan sebagai *server* mini yang dapat menyediakan layanan berbasis jaringan. ESP32 akan terus-menerus “mendengarkan” permintaan HTTP dari perangkat lain yang terhubung pada jaringan yang sama. Ketika menerima permintaan, ESP32 akan memberikan respon

berupa data yang telah, baik dalam bentuk halaman HTML statis maupun data sensor yang dapat diperbarui secara berkala.



**Gambar 2.21** *Input Data on HTML Form ESP32*

HTML *Form* pada Gambar 2.21 merupakan elemen pada halaman *web* yang digunakan untuk menerima masukan (*input*) dari pengguna. Form ini terdiri atas berbagai komponen, seperti kotak isian (*text field*), tombol (*button*), daftar pilihan (*dropdown*), maupun elemen *input* lainnya yang memungkinkan pengguna mengirimkan data ke *web server*.

Pada sistem berbasis ESP32, data yang dimasukkan melalui HTML *Form* akan dikirim dari *browser* menggunakan metode komunikasi HTTP, seperti metode GET atau POST. Selanjutnya, ESP32 menerima data tersebut, memprosesnya sesuai program yang telah dirancang, kemudian menggunakannya sebagai parameter dalam pengoperasian sistem. Dengan demikian, perubahan nilai parameter dapat dilakukan langsung melalui halaman *web* tanpa perlu mengubah maupun mengunggah ulang program ke mikrokontroler.

Dalam penelitian ini, HTML *Form* digunakan sebagai media untuk memasukkan parameter yang berkaitan dengan proses penyortiran buah kopi, seperti nilai kalibrasi, batas klasifikasi, atau pengaturan sistem lainnya sesuai kebutuhan. Data yang dimasukkan melalui halaman *web* akan diterima oleh ESP32 dan digunakan sebagai acuan dalam proses pengendalian alat sehingga pengoperasian sistem menjadi lebih fleksibel dan mudah dilakukan oleh pengguna.