BAB V
PENGUJIAN DAN ANALISA ALAT

5.1. Pengujian dan Analisa Sistem

Pengujian dan analisa pada sistem diperlukan untuk mengetahui kinerja setiap bagian pada sistem *conveyor* penyortir buah kopi serta mengetahui kemampuan sistem dalam menjalankan proses penyortiran berdasarkan tingkat kematangan buah. Pengujian meliputi sensor warna TCS34725, klasifikasi tingkat kematangan, sistem penyortiran, sensor *load cell*, dan monitoring *website*. Hasil pengujian dari setiap bagian dianalisis berdasarkan data yang diperoleh untuk mengetahui kesesuaian antara perancangan dengan kondisi aktual sistem.

5.1.1. Pengujian dan Analisa Sensor Warna TCS34725

Pengujian sensor warna TCS34725 dilakukan untuk mengetahui kemampuan sensor dalam membaca karakteristik warna buah kopi pada tingkat kematangan yang berbeda. Sensor TCS34725 digunakan untuk memperoleh nilai *Red* (R), *Green* (G), *Blue* (B), dan *Clear* (C) yang menjadi data masukan dalam proses klasifikasi tingkat kematangan buah kopi, yaitu mentah, setengah matang, dan matang. Pengujian dilakukan secara bertahap untuk memperoleh kondisi pembacaan sensor yang sesuai dengan karakteristik sampel dan posisi sensor pada sistem *conveyor*.



(a) Mentah (b) Setengah Matang (c) Matang

Gambar 5.1 Diameter *Sample* Buah Kopi

Sample buah kopi seperti pada Gambar 5.1 yang digunakan dalam pengujian memiliki ukuran yang berbeda-beda. Perbedaan ukuran *sample* diperhatikan karena dapat memengaruhi posisi permukaan buah terhadap sensor dan jarak pembacaan sensor. Oleh karena itu, diameter *sample* diukur terlebih dahulu sebagai salah satu karakteristik kondisi pengujian. Setiap *sample* buah kemudian dibaca oleh sensor untuk memperoleh data pembacaan yang dapat digunakan dalam mengetahui kestabilan sensor. Hasil pembacaan nilai R, G, B, dan C dicatat pada setiap pengambilan data.

Tabel 5.1 Hasil Pembacaan Sensor TCS34725

Sample	**R**	**G**	**B**	**C**	**Hasil Klasifikasi**	**Kondisi Sebenarnya**	**Status**
1	180	72	50	284	Mentah	Setengah Matang	Tidak Berhasil
2	178	130	62	357	Mentah	Mentah	Berhasil
3	116	66	44	211	Matang	Matang	Berhasil
4	110	60	40	196	Matang	Matang	Berhasil
5	322	250	115	682	*Unknown*	Mentah	Tidak Berhasil
6	455	162	111	683	Setengah Matang	Setengah Matang	Berhasil
7	173	74	49	282	Mentah	Setengah Matang	Tidak Berhasil
8	204	168	74	436	Mentah	Mentah	Berhasil
9	158	52	39	228	Matang	Matang	Berhasil
10	116	66	44	211	Matang	Matang	Berhasil
11	347	111	86	507	Setengah Matang	Setengah Matang	Berhasil
12	178	130	62	357	Mentah	Mentah	Berhasil
13	107	62	41	196	Matang	Matang	Berhasil

Sample	R	G	B	C	Hasil Klasifikasi	Kondisi Sebenarnya	Status
14	355	116	79	520	Setengah Matang	Setengah Matang	Berhasil
15	112	58	35	194	Matang	Mentah	Tidak Berhasil
16	130	74	48	238	Matang	Matang	Berhasil
17	181	113	57	338	Mentah	Mentah	Berhasil
18	214	134	66	400	Mentah	Mentah	Berhasil
19	163	118	55	323	Matang	Matang	Berhasil
20	354	137	99	547	Setengah Matang	Setengah Matang	Berhasil
21	144	62	46	228	Matang	Matang	Berhasil
22	179	106	54	326	Mentah	Mentah	Berhasil
23	373	171	101	616	Setengah Matang	Setengah Matang	Berhasil
24	138	63	39	226	Matang	Matang	Berhasil
25	311	101	75	455	Setengah Matang	Setengah Matang	Berhasil
26	364	155	86	577	Setengah Matang	Setengah Matang	Berhasil
27	101	68	45	202	Matang	Matang	Berhasil
28	138	88	45	263	Mentah	Mentah	Berhasil
29	115	52	34	201	Matang	Matang	Berhasil
30	162	116	54	318	Matang	Matang	Berhasil
31	104	75	50	206	Matang	Matang	Berhasil
32	120	93	71	245	Matang	Matang	Berhasil
33	155	94	59	285	Matang	Matang	Berhasil
34	186	104	66	331	Matang	Matang	Berhasil

Sample	R	G	B	C	Hasil Klasifikasi	Kondisi Sebenarnya	Status
35	136	63	41	226	Matang	Setengah Matang	Tidak Berhasil
36	118	116	55	274	Mentah	Mentah	Berhasil
37	293	160	100	509	Setengah Matang	Setengah Matang	Berhasil
38	181	92	52	309	Matang	Matang	Berhasil
39	289	138	85	477	Setengah Matang	Setengah Matang	Berhasil
40	208	102	67	342	Matang	Matang	Berhasil
41	190	189	80	437	Mentah	Mentah	Berhasil
42	179	81	56	288	Matang	Matang	Berhasil
43	113	115	53	271	Mentah	Mentah	Berhasil
44	140	128	58	314	Mentah	Mentah	Berhasil
45	150	77	49	253	Matang	Matang	Berhasil
46	453	148	106	668	Setengah Matang	Setengah Matang	Berhasil
47	121	85	58	248	Matang	Matang	Berhasil
48	270	177	84	514	Mentah	Mentah	Berhasil
49	160	59	47	235	Matang	Matang	Berhasil
50	120	77	50	231	Matang	Matang	Berhasil

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 5.1, nilai dari masing-masing *sample* menunjukkan adanya perbedaan karakteristik pembacaan warna pada setiap buah. Nilai tersebut tidak hanya dipengaruhi oleh tingkat kematangan buah, tetapi juga dapat dipengaruhi oleh kondisi buah ketika berada pada area pembacaan sensor. Pada beberapa *sample* yang berstatus tidak berhasil, proses pembacaan atau klasifikasi tidak menghasilkan keluaran yang sesuai dengan kondisi yang diharapkan. Kondisi tersebut dapat berupa buah yang tidak terbaca secara optimal oleh sensor maupun hasil klasifikasi yang tidak sesuai. Hal ini menunjukkan bahwa

keberhasilan sistem tidak hanya ditentukan oleh kemampuan sensor dalam membaca nilai warna, tetapi juga dipengaruhi oleh kondisi fisik sampel dan posisi buah saat melewati area sensor. Dengan demikian, data dengan status tidak berhasil tetap dicantumkan dalam hasil pengujian karena menunjukkan kondisi aktual sistem selama pengoperasian.

Selain itu, kondisi ketidakberhasilan pada pengujian dapat dipengaruhi oleh adanya hasil klasifikasi yang berbeda antarbuah, yang menunjukkan bahwa parameter klasifikasi yang digunakan pada program masih memiliki batas tertentu dalam membedakan karakteristik warna buah kopi. Buah dengan tingkat kematangan yang berbeda dapat memiliki nilai pembacaan yang saling mendekati, terutama apabila terdapat variasi warna pada permukaan buah. Oleh karena itu, nilai R, G, dan B tidak dapat dilihat hanya dari salah satu kanal saja, tetapi perlu diproses berdasarkan parameter klasifikasi yang telah ditentukan dalam program.

Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa kondisi *unknown* perlu diperhatikan dalam proses klasifikasi. Keluaran *unknown* diberikan ketika nilai pembacaan sensor tidak memenuhi kondisi atau rentang parameter yang telah ditentukan dalam program. Pada kondisi tersebut, sistem tidak memaksakan buah untuk masuk ke salah satu kategori kematangan. Sesuai dengan batasan sistem, buah yang menghasilkan keluaran *unknown* akan tetap bergerak lurus mengikuti *conveyor* dan tidak diarahkan ke wadah penyortiran. Mekanisme tersebut digunakan untuk mencegah buah dengan hasil pembacaan yang tidak dapat diklasifikasikan masuk ke kategori kematangan yang tidak sesuai.

5.1.2. Analisa Klasifikasi Tingkat Kematangan

Analisa klasifikasi tingkat kematangan dilakukan untuk mengetahui tingkat ketepatan sistem dalam mengidentifikasi tingkat kematangan buah kopi berdasarkan hasil pembacaan sensor warna TCS34725. Pengujian dilakukan dengan menggunakan 50 *sample* buah kopi yang terdiri atas tiga kategori tingkat kematangan, yaitu mentah, setengah matang, dan matang. Setiap *sample* dibaca oleh sensor TCS34725 untuk memperoleh nilai warna RGB dan kemudian diproses oleh ESP32 berdasarkan parameter klasifikasi yang telah ditentukan. Hasil

klasifikasi sistem selanjutnya dibandingkan dengan kondisi sebenarnya dari masing-masing *sample*.

Data hasil pembacaan yang telah terakumulasi selanjutnya diolah untuk memperoleh nilai rata-rata pada masing-masing kanal warna. Perhitungan dilakukan terhadap *sample* buah kopi yang telah dikelompokkan berdasarkan kondisi sebenarnya, yaitu mentah, setengah matang, dan matang. Nilai rata-rata pada kanal *Red*, *Green*, dan *Blue* digunakan untuk mengetahui karakteristik warna pada setiap tingkat kematangan sekaligus menjadi nilai referensi RGB hasil kalibrasi. Nilai rata-rata setiap kanal diperoleh dengan membagi jumlah akumulasi pembacaan dengan jumlah *sample* yang valid. Perhitungan nilai rata-rata dapat dinyatakan menggunakan persamaan sebagai berikut [17].

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n} \tag{5.1}$$

Keterangan:

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

X_i = Nilai pembacaan sensor pada sampel ke-i.

n = Jumlah *sample* pembacaan yang valid.

Perhitungan dilakukan secara terpisah pada kanal *Red*, *Green*, dan *Blue* untuk memperoleh nilai acuan RGB pada masing-masing tingkat kematangan buah kopi. Berdasarkan hasil pengolahan data pembacaan sensor, diperoleh nilai rata-rata RGB pada masing-masing tingkat kematangan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 5.4 berikut.

Tabel 5.2 Nilai Rata-Rata RGB *Sample* Berhasil

Tingkat Kematangan	**Jumlah *Sample* Berhasil**	$\bar{R}$	$\bar{G}$	$\bar{B}$	$\bar{C}$
Mentah	12	175,25	122,50	62,50	357,25

Tingkat Kematangan	Jumlah *Sample* Berhasil	$\overline{R}$	$\overline{G}$	$\overline{B}$	$\overline{C}$
Setengah Matang	10	359,40	143,90	92,80	555,90
Matang	23	141,04	78,17	50,17	250,04

Berdasarkan hasil pengolahan data, nilai rata-rata RGB dihitung berdasarkan *sample* yang berhasil diklasifikasikan oleh sistem. *Sample* dengan status tidak berhasil tidak dimasukkan dalam perhitungan karena hasil pembacaannya tidak menghasilkan klasifikasi yang sesuai. Berdasarkan data tersebut, kategori mentah memiliki nilai rata-rata R, G, dan B masing-masing sebesar 175,25, 122,50, dan 62,50. Kategori setengah matang memiliki nilai rata-rata R sebesar 359,40, G sebesar 143,90, dan B sebesar 92,80, sedangkan kategori matang memiliki nilai rata-rata R sebesar 141,04, G sebesar 78,17, dan B sebesar 50,17. Nilai rata-rata tersebut menunjukkan karakteristik pembacaan warna dari sampel yang berhasil dan selanjutnya digunakan sebagai data pendukung dalam analisis klasifikasi tingkat kematangan.

Berdasarkan hasil pengujian yang diperoleh pada tabel 5.1, sebagian besar *sample* berhasil diklasifikasikan sesuai dengan kondisi sebenarnya. Dari 50 *sample* yang diuji, sebanyak 45 *sample* berhasil diklasifikasikan dengan benar, sedangkan 5 *sample* menghasilkan klasifikasi yang tidak sesuai. Dengan demikian, persentase keberhasilan klasifikasi sistem dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$(\%)Berhasil = \frac{Jumlah\ Klasifikasi\ Benar}{Jumlah\ Seluruh\ Sample} \times 100\% \quad (5.2)$$

Keterangan:

Jumlah Klasifikasi Benar = jumlah *sample* yang hasil klasifikasinya sesuai dengan kondisi sebenarnya.

Jumlah Seluruh *Sample* = seluruh *sample* yang digunakan dalam pengujian, termasuk *sample* yang menghasilkan klasifikasi tidak sesuai maupun *unknown*.

Tabel 5.3 Persentase Keberhasilan Klasifikasi Sistem

Kategori *Sample*	Jumlah *sample*	Klasifikasi Benar	Keberhasilan(%)
Mentah	15	12	80,00%
Setengah Matang	11	10	90,91%
Matang	24	23	95,83%
Total	**50**	**45**	**90,00%**

Sehingga diperoleh:

$$(\%)Berhasil = \frac{45}{50} \times 100\% = 90\% \tag{5.3}$$

Berdasarkan hasil peninjauan kategori *sample* yang ditunjukkan pada tabel 5.5, sistem berhasil mengklasifikasikan tingkat kematangan buah kopi dengan benar sebanyak 45 dari total 50 *sample* yang diuji, sehingga diperoleh persentase keberhasilan sistem secara keseluruhan sebesar 90,00%. sisanya menghasilkan klasifikasi yang tidak sesuai dengan kondisi sebenarnya.

Pada kategori matang menunjukkan tingkat keberhasilan tertinggi, yaitu 95,83% dengan 23 dari 24 *sample* berhasil diklasifikasikan dengan benar dan mengindikasikan bahwa karakteristik warna buah kopi matang memiliki perbedaan yang cukup signifikan dan mudah dibedakan oleh sensor dibandingkan kategori lain. Kategori mentah memperoleh tingkat keberhasilan sebesar 80,00%, dengan 12 dari 15 *sample* berhasil diklasifikasikan dengan benar. Sedangkan, kategori setengah matang memperoleh tingkat keberhasilan sebesar 90,91%, dengan 10 dari 11 *sample* berhasil diklasifikasikan dengan benar.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem memiliki kemampuan klasifikasi yang paling baik pada kategori matang. Sementara itu, kategori setengah matang memiliki persentase keberhasilan paling rendah dibandingkan dua kategori lainnya. Hal tersebut dapat disebabkan oleh karakteristik warna buah pada tingkat setengah matang yang memiliki kemiripan dengan karakteristik warna pada kategori mentah maupun matang. Selain itu, variasi warna pada permukaan buah dan posisi *sample*

terhadap sensor saat pembacaan juga dapat memengaruhi nilai RGB yang diperoleh.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan klasifikasi tingkat kematangan buah kopi dengan tingkat keberhasilan sebesar 90,00% dari 50 *sample*. Meskipun masih terdapat lima *sample* yang mengalami kesalahan klasifikasi, hasil tersebut menunjukkan bahwa penerapan sensor TCS34725 dan algoritma klasifikasi pada ESP32 telah mampu memberikan hasil klasifikasi yang cukup baik.

5.1.3. Kalibrasi Sensor Warna TCS34725

Kalibrasi sensor warna TCS34725 dilakukan untuk memperoleh nilai referensi RGB yang digunakan sebagai acuan dalam menentukan tingkat kematangan buah kopi. Proses kalibrasi dilakukan untuk setiap kategori, yaitu buah kopi mentah, setengah matang, dan matang. Sebelum proses pengambilan data dilakukan, sistem memberikan waktu stabilisasi selama 500ms seperti pada Gambar 5.2.

```
Serial.println(
  "Menstabilkan sensor...");

vTaskDelay(
  pdMS_TO_TICKS(500));
```

Gambar 5.2 Waktu Stabilisasi Program

Selanjutnya, sensor melakukan pembacaan sebanyak 10 *sample* untuk memperoleh nilai RGB yang lebih representatif. Setiap hasil pembacaan berupa nilai kanal *Red* (R), *Green* (G), *Blue* (B), dan *Clear* (C) dijumlahkan, kemudian dihitung nilai rata-ratanya. Nilai rata-rata R, G, dan B tersebut digunakan sebagai nilai referensi warna untuk kategori yang sedang dikalibrasi. Dengan metode tersebut, nilai referensi tidak hanya bergantung pada satu kali pembacaan sensor sehingga dapat mengurangi pengaruh variasi pembacaan selama proses kalibrasi.

Hasil kalibrasi kemudian disimpan pada parameter referensi masing-masing kategori dan digunakan pada proses klasifikasi tingkat kematangan buah kopi.

```
3783  //------------------------------------------------------------
3784  // ONLY IDLE
3785  //------------------------------------------------------------
3786
3787  if (
3788    machineState != MACHINE_IDLE) {
3789
3790    Serial.println(
3791      "Kalibrasi TCS hanya boleh saat IDLE.");
3792
3793
3794    return;
3795  }
3796
3797
3798  calibrationBusy =
3799    true;
3800
3801
3802  //------------------------------------------------------------
3803  // CATEGORY NAME
3804  //------------------------------------------------------------
3805
3806  const char *name =
3807    "UNKNOWN";
```

```
3810  if (
3811    category == 1) {
3812
3813    name =
3814      "MENTAH";
3815  }
3816
3817
3818  else if (
3819    category == 2) {
3820
3821    name =
3822      "SETENGAH MATANG";
3823  }
3824
3825
3826  else if (
3827    category == 3) {
3828
3829    name =
3830      "MATANG";
3831  }
3832
3833
3834  else if (
3835    category == 4) {
3836
3837    name =
3838      "STANDBY";
3839  }
```

Gambar 5.3 Inisialisasi dan Pemilihan Kategori Kalibrasi TCS34725

Proses kalibrasi sensor warna TCS34725 pada Gambar 5.3 dilakukan melalui serial monitor Arduino IDE dan hanya dapat dilakukan ketika sistem berada dalam kondisi *idle*. Sebelum menjalankan proses kalibrasi, program memeriksa kondisi *machine state* untuk memastikan sistem tidak sedang menjalankan proses penyortiran. Apabila sistem masih berada pada kondisi selain *idle*, proses kalibrasi akan dihentikan sehingga nilai referensi warna tidak dapat diubah ketika sistem sedang beroperasi. Setelah sistem berada pada kondisi *idle*, pengguna dapat memilih kategori yang akan dikalibrasi melalui perintah pada serial monitor. Program menyediakan empat pilihan kategori kalibrasi, yaitu C4 untuk buah kopi mentah, C5 untuk buah kopi setengah matang, C6 untuk buah kopi matang, dan C7 untuk kondisi *standby*. Setelah kategori dipilih, pengguna menempatkan *sample* sesuai dengan kategori yang dipilih pada area pembacaan sensor TCS34725. Selanjutnya, pengguna menekan tombol *enter* pada serial monitor sebagai tanda bahwa *sample* telah ditempatkan dan proses pengambilan data dapat dimulai. Program kemudian menjalankan tahapan pembacaan sensor sesuai dengan kategori yang telah dipilih. Pada proses tersebut, sensor TCS34725 membaca nilai kanal warna *Red* (R), *Green* (G), *Blue* (B), dan *Clear* (C) dari *sample*. Nilai yang diperoleh digunakan untuk merepresentasikan karakteristik warna dari kategori tersebut dan selanjutnya ditetapkan sebagai nilai referensi RGB. Nilai referensi ini digunakan sebagai acuan dalam proses klasifikasi, yaitu dengan membandingkan nilai RGB hasil pembacaan buah kopi pada saat proses penyortiran terhadap karakteristik warna yang telah diperoleh melalui proses kalibrasi. Dengan adanya proses kalibrasi tersebut, sistem memiliki nilai acuan warna untuk masing-masing tingkat kematangan sehingga proses identifikasi buah kopi dapat disesuaikan dengan karakteristik warna *sample* yang digunakan pada sistem.

5.1.4. Pengujian dan Analisa Sistem Penyortiran

Pengujian sistem penyortiran dilakukan untuk mengetahui kemampuan *conveyor* dan mekanisme pengarah dalam mengarahkan buah kopi menuju posisi sortir sesuai dengan hasil klasifikasi tingkat kematangan. Proses penyortiran dilakukan dengan mengatur pergerakan motor *stepper* berdasarkan jumlah step

yang telah ditentukan pada program. Perbedaan jarak antara sensor TCS34725 dan masing-masing posisi sortir menyebabkan jumlah *step* dan waktu perpindahan *conveyor* berbeda untuk setiap kategori kematangan.

Tabel 5.4 Parameter Pergerakan *Conveyor* pada Proses Penyortiran

Kondisi	***Step Delay***	**RPM Motor**	**RPM *Conveyor***	**Jumlah *Step***	**Waktu**
Mencari buah/menuju TCS	150µs	125 RPM	41.67 RPM	Kontinu	–
Setelah TCS → Mentah	100µs	187.5 RPM	62.5 RPM	27.550	2.755s
Setelah TCS → Setengah Matang	100µs	187.5 RPM	62.5 RPM	41.800	4.180s
Setelah TCS → Matang	100µs	187.5 RPM	62.5 RPM	53.250	5.325s
Standby/*Idle*	–	0 RPM	0 RPM	–	–

Berdasarkan Tabel 5.6 di atas, kecepatan *conveyor* pada saat membawa buah menuju sensor TCS34725 diatur sebesar 41.67 RPM dengan *step delay* 150µs. Setelah proses pembacaan dan klasifikasi dilakukan, kecepatan *conveyor* berubah menjadi 62.5 RPM dengan *step delay* 100µs. Jumlah *step* yang diberikan berbeda berdasarkan kategori kematangan buah karena setiap kategori memiliki posisi wadah sortir yang berbeda.

Buah yang diklasifikasikan sebagai mentah memerlukan 27.550 *step* dengan waktu perpindahan sebesar 2.755 detik. Buah setengah matang memerlukan 41.800 *step* dengan waktu 4.180 detik, sedangkan buah matang memerlukan 53.250 *step*

dengan waktu 5.325 detik. Semakin jauh posisi wadah sortir dari sensor TCS34725, semakin besar jumlah *step* dan waktu perpindahan yang diperlukan.

5.1.5. Pengujian dan Analisa Sensor *Load Cell*

Pengujian sensor *load cell* dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam membaca berat buah kopi yang telah melalui proses penyortiran. Sensor *load cell* digunakan sebagai masukan untuk memperoleh data berat buah pada masing-masing kategori hasil sortir. Pengujian dilakukan dengan memberikan beban pada *load cell*, kemudian hasil pembacaan sensor dibandingkan dengan berat sebenarnya yang diukur menggunakan alat ukur pembanding.

Tabel 5.5 Hasil Perbandingan Pengujian

Kategori *Sample*	**Sensor *Load Cell***	***Digital Scale***	**Selisih**	***Error*(%)**
Mentah	 MENTAH		2gr	11,11%

Kategori *Sample*	**Sensor *Load Cell***	***Digital Scale***	**Selisih**	***Error*(%)**
Setengah Matang	9 gr SETENGAH MATANG		2gr	18,18%
Matang	16 gr MATANG		0gr	0,00%

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Tabel 5.7, sensor *load cell* menunjukkan tingkat akurasi yang bervariasi pada tiap kategori *sample*. Pada kategori matang, sensor *load cell* mampu membaca berat secara tepat tanpa selisih (0gr, *error* 0%) dibandingkan dengan alat ukur pembanding (timbangan). Sementara itu, kategori mentah dan setengah matang masing-masing menghasilkan selisih pembacaan sebesar 2gr, namun dengan persentase *error* yang berbeda, yaitu 11,11% untuk kategori mentah dan 18,18% untuk kategori setengah matang. Perbedaan persentase *error* ini disebabkan oleh nilai pembanding pada kategori setengah matang yang lebih kecil, sehingga selisih pembacaan yang sama

menghasilkan persentase *error* yang lebih besar secara relatif. Perhitungan selisih dan tingkat kesalahan (*error*) dihitung berdasarkan perbandingan pengujian antara nilai sensor *load cell* dengan nilai *digital scale*. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$Selisih = |Load\ Cell - Digital\ Scale| \tag{5.4}$$

$$Error(\%) = \frac{|Load\ Cell - Digital\ Scale|}{Digital\ Scale} \times 100\% \tag{5.5}$$

Secara keseluruhan, sistem memiliki rata-rata *error* sebesar 9,76% dalam pengujian ini, yang menunjukkan bahwa sensor mampu membaca berat buah kopi hasil sortir dengan tingkat akurasi yang cukup baik, meskipun masih terdapat selisih kecil dibandingkan dengan alat ukur pembanding (*digital scale*). Selisih ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, di antaranya kalibrasi sensor *load cell* yang belum optimal, resolusi pembacaan sensor, maupun faktor lingkungan pengujian.

5.1.6. Kalibrasi Sensor *Load Cell*

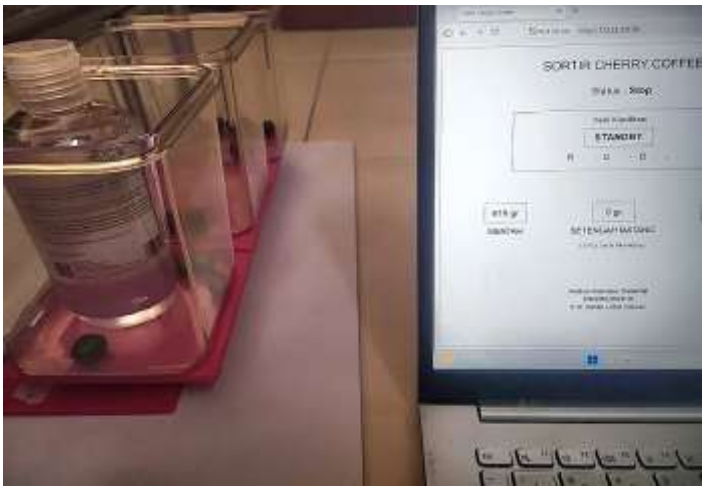
Kalibrasi *load cell* dilakukan untuk memperoleh hubungan antara nilai pembacaan mentah (*raw value*) dari HX711 dengan berat sebenarnya dalam satuan gram. Pada sistem ini digunakan tiga buah *load cell*, yaitu LC1 untuk menimbang buah kopi kategori mentah, LC2 untuk kategori setengah matang, dan LC3 untuk kategori matang. Proses kalibrasi dilakukan secara terpisah pada masing-masing *load cell* melalui serial monitor dan hanya dapat dilakukan ketika sistem berada dalam kondisi *idle*.

```
3082    Serial.println(
3083      "Kosongkan load cell.");
3084
3085
3086    Serial.println(
3087      "Tekan ENTER untuk capture ZERO.");
3088
3089
3090    waitSerialLine();
3091
3092
3093    Serial.println(
3094      "Menunggu stabil...");
3095
3096
3097    vTaskDelay(
3098      pdMS_TO_TICKS(1000));
3099
3100
3101    long zeroRaw =
3102      selectedLoadCell->read_average(
3103        LOAD_CELL_AVERAGE);
3104
3105
3106    referenceWeight[0] =
3107      0.0f;
3108
3109
3110    measuredRaw[0] =
3111      (float)zeroRaw;
```

```
3134    Serial.println(
3135      "----------------------------------------");
3136
3137
3138    Serial.print(
3139      "REFERENCE POINT ");
3140
3141
3142    Serial.println(
3143      pointCount);
3144
3145
3146    Serial.println(
3147      "Masukkan berat referensi dalam gram:");
3148
3149
3150    String weightString =
3151      waitSerialLine();
3152
3153
3154    float reference =
3155      weightString.toFloat();
3156
3157
3158    if (
3159      reference <= 0.0f) {
```

Gambar 5.4 Proses Kalibrasi Multi-Point *Load Cell*

Program pada Gambar 5.4 menggunakan metode kalibrasi multi-point, sehingga hubungan antara nilai *raw* dan berat tidak ditentukan hanya berdasarkan satu titik pengukuran. Pada proses awal, *load cell* dikosongkan untuk memperoleh nilai *zero raw* yang kemudian ditetapkan sebagai titik dengan berat 0 gram. Setelah itu, pengguna memasukkan nilai berat referensi dalam satuan gram melalui serial monitor, kemudian meletakkan beban dengan berat tersebut pada *load cell*. Program membaca nilai *raw* dari HX711 dan menyimpan pasangan data antara berat referensi dengan nilai *raw* hasil pengukuran. Proses penambahan titik referensi dapat dilakukan beberapa kali hingga pengguna memilih untuk menyelesaikan proses kalibrasi.



Gambar 5.5 Kalibrasi Berat Referensi

Pada Gambar 5.5, ditunjukkan salah satu proses pemberian beban referensi pada *load cell* sebagai bagian dari proses kalibrasi. Beban referensi ditempatkan pada *load cell*, kemudian nilai berat yang digunakan sebagai acuan dimasukkan ke dalam program melalui serial monitor. Selanjutnya, sistem membaca nilai *raw* dari HX711 yang dihasilkan oleh beban tersebut. Data berat referensi dan nilai *raw* yang diperoleh menjadi pasangan data yang digunakan dalam proses kalibrasi. Program menyediakan kapasitas hingga 10 titik kalibrasi sehingga beberapa variasi berat referensi dapat digunakan untuk memperoleh hubungan antara nilai *raw* dan berat sebenarnya. Proses kalibrasi dapat dihentikan setelah diperoleh minimal dua titik data yang valid, sedangkan titik tambahan dapat digunakan apabila diperlukan

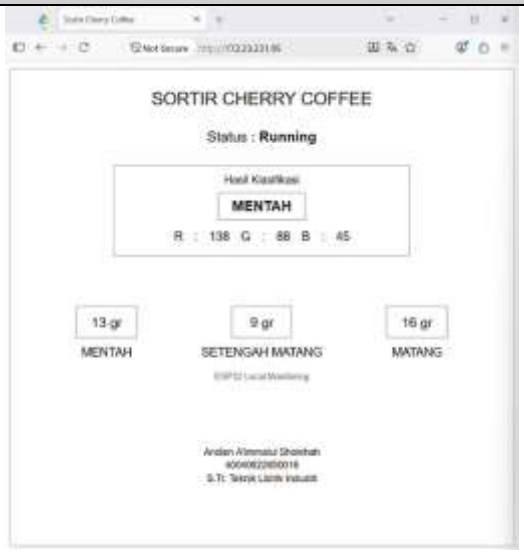
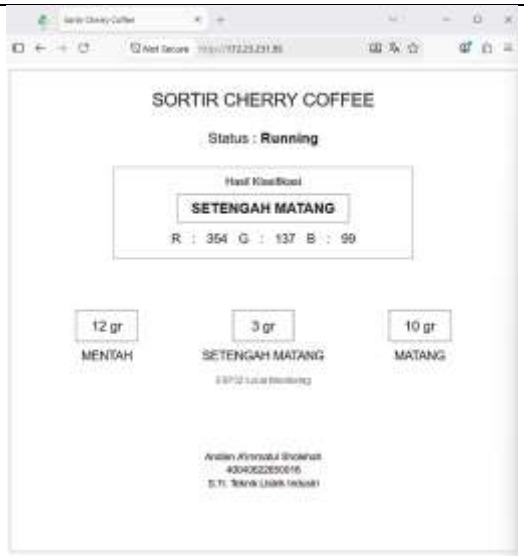
untuk memberikan data kalibrasi pada rentang berat yang lebih beragam. Data tersebut selanjutnya digunakan untuk menentukan parameter kalibrasi berupa *slope* dan *offset* yang menjadi dasar konversi nilai pembacaan sensor menjadi satuan gram.

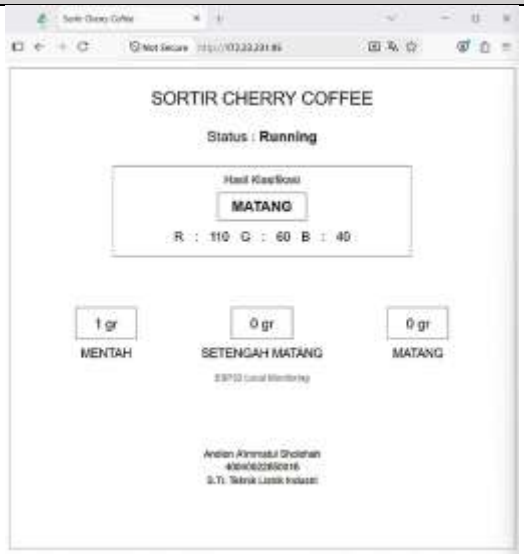
Berdasarkan hasil pengujian, kemampuan pembacaan *load cell* juga dipengaruhi oleh massa beban yang diberikan. Pada massa yang sangat kecil, khususnya di bawah 1 gram, pembacaan berat cenderung kurang stabil. Dalam kondisi tertentu, beban dengan massa di bawah 1 gram bahkan tidak terdeteksi oleh sistem. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa hasil pembacaan pada rentang massa yang sangat kecil masih memiliki keterbatasan sehingga nilai yang ditampilkan dapat mengalami perubahan atau tidak memberikan hasil pembacaan yang konsisten. Oleh karena itu, penggunaan sistem untuk pengukuran buah kopi lebih sesuai pada massa yang berada di atas rentang tersebut. Temuan ini juga menjadi salah satu pertimbangan dalam pengembangan sistem selanjutnya, khususnya dalam meningkatkan kestabilan dan kemampuan sensor dalam mendeteksi beban dengan massa yang lebih kecil.

5.1.7. Pengujian dan Analisa Monitoring *Website*

Pengujian monitoring *website* dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mengirimkan dan menampilkan data hasil proses penyortiran secara daring. Data yang diperoleh dari sensor dan diproses oleh ESP32 dikirimkan melalui koneksi Wi-Fi untuk ditampilkan pada antarmuka *website*. Parameter yang ditampilkan pada *website* meliputi hasil klasifikasi tingkat kematangan dan data berat buah kopi pada masing-masing kategori hasil penyortiran.

Tabel 5.6 Hasil Pengujian Monitoring *Website*

Kategori *Sample*	**Tampilan *Website***	**Keterangan**
Mentah		*Website* menampilkan hasil klasifikasi mentah dengan nilai R:138, G:88, dan B:45, sesuai dengan data serial monitor.
Setengah Matang		*Website* menampilkan hasil klasifikasi setengah matang dengan nilai R:354, G:137, dan B:99, sesuai dengan data serial monitor.

Kategori *Sample*	Tampilan *Website*	Keterangan
Matang		*Website* menampilkan hasil klasifikasi matang dengan nilai R:110, G:60, dan B:40, sesuai dengan data serial monitor.
Unknown		*Website* menampilkan status u*nknown* dengan nilai R:332, G:250, dan B:115, karena kombinasi nilai RGB tersebut berada di luar rentang ketiga kategori klasifikasi yang telah ditentukan.

Selain ketiga kategori utama pada tabel 5.8, sistem juga diuji dengan kondisi buah kopi yang menghasilkan nilai RGB di luar rentang klasifikasi yang telah ditentukan. Pada percobaan ke-4, sistem membaca nilai R:332, G:250, B:115 dan menampilkan status "*unknown*" pada halaman *website*, sesuai dengan hasil yang tercatat pada serial monitor. Hal ini menunjukkan bahwa sistem tidak hanya mampu menampilkan hasil klasifikasi yang sesuai kategori, tetapi juga mampu menangani kondisi di luar jangkauan (*out of range*) tanpa menghasilkan klasifikasi yang salah, seperti intensitas cahaya berlebih (*overexposure*) pada area pembacaan sensor,

posisi buah yang kurang tepat, atau terdapat variasi warna alami pada buah kopi yang belum tercakup dalam rentang RGB yang ditetapkan di algoritma klasifikasi. Hal ini memberikan status "*unknown*" berfungsi sebagai indikator keandalan sistem dalam mendeteksi data yang tidak sesuai dengan kategori manapun.

5.1.8. Analisa Keseluruhan Sistem

Berdasarkan seluruh hasil pengujian yang telah dilakukan, sistem penyortir buah kopi berbasis sensor warna TCS34725 secara keseluruhan telah mampu menjalankan fungsi utama yang dirancang, yaitu mengidentifikasi tingkat kematangan buah kopi, mengukur berat hasil penyortiran, mengarahkan buah menuju wadah sesuai kategori kematangan, serta menampilkan hasil pengukuran dan klasifikasi secara *real-time* melalui *website*. Setiap bagian sistem yang meliputi sensor warna, sensor *load cell*, mekanisme *conveyor*, mekanisme pengarah, ESP32, dan *website* dapat terintegrasi dan bekerja dalam satu rangkaian proses penyortiran..

Pada proses identifikasi tingkat kematangan, sensor TCS34725 mampu mengklasifikasikan buah kopi dengan benar sebanyak 45 dari 50 *sample* yang diuji, sehingga diperoleh tingkat keberhasilan klasifikasi sebesar 90%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor TCS34725 mampu membedakan tingkat kematangan buah kopi berdasarkan karakteristik warna yang terdeteksi, meskipun tingkat akurasinya masih belum optimal. Kategori mentah memiliki tingkat keberhasilan klasifikasi terendah, yaitu sebesar 80,00%, dengan 12 dari 15 *sample* berhasil diklasifikasikan dengan benar. Kesalahan klasifikasi pada kategori ini terjadi karena terdapat dua *sample* yang teridentifikasi sebagai setengah matang dan satu *sample* yang menghasilkan keluaran *unknown*. Kondisi tersebut dapat dipengaruhi oleh variasi warna pada permukaan buah dan posisi sampel terhadap sensor saat proses pembacaan, sehingga nilai RGB yang diperoleh dapat memiliki karakteristik yang mendekati kategori lain atau berada di luar rentang parameter klasifikasi yang telah ditentukan.

Dari sisi mekanisme penyortiran, hasil pengujian menunjukkan bahwa *conveyor* dan mekanisme pengarah telah mampu menjalankan proses pemindahan buah sesuai dengan kategori yang ditentukan oleh sistem. Pergerakan *conveyor* dikendalikan menggunakan parameter jumlah *step* pada motor *stepper*, sedangkan mekanisme pengarah digunakan untuk mengarahkan buah menuju posisi wadah penyortiran yang sesuai. Jumlah *step* dan waktu perpindahan yang digunakan berbeda berdasarkan jarak antara posisi pembacaan sensor dengan masing-masing wadah penyortiran. Hasil pengujian menunjukkan bahwa mekanisme tersebut dapat bekerja secara konsisten selama proses penyortiran, sehingga perbedaan jarak antarwadah dapat diakomodasi melalui pengaturan parameter pergerakan motor. Dengan demikian, mekanisme mekanis pada sistem telah mampu mendukung proses penyortiran berdasarkan hasil klasifikasi yang diberikan oleh sensor warna.

Pada bagian pengukuran berat, sensor *load cell* yang terintegrasi dengan modul HX711 mampu memberikan hasil pengukuran berat pada masing-masing kategori hasil penyortiran. Berdasarkan perbandingan dengan timbangan sebagai alat acuan, diperoleh rata-rata nilai *error* sebesar 9,76%. Hasil pengukuran paling mendekati nilai acuan terdapat pada kategori matang dengan nilai *error* sebesar 0%, sedangkan nilai *error* terbesar terdapat pada kategori setengah matang sebesar 18,18%. Perbedaan hasil pengukuran tersebut menunjukkan bahwa tingkat ketelitian *load cell* masih dipengaruhi oleh proses kalibrasi dan kondisi pembebanan pada saat pengujian. Nilai *error* yang berbeda pada setiap kategori tidak secara langsung menunjukkan adanya gangguan pada mekanisme penyortiran, tetapi lebih berkaitan dengan kemampuan sensor dalam menghasilkan pembacaan berat yang sesuai dengan nilai acuan.

Pada bagian monitoring, ESP32 berhasil mengirimkan data hasil pembacaan sistem menuju *website* sehingga data dapat ditampilkan secara *real-time*. Pengujian dilakukan dengan masing-masing pengujian mewakili kategori matang, setengah matang, dan mentah. Berdasarkan hasil pengujian, seluruh data yang dikirimkan oleh ESP32 dapat ditampilkan pada *website* sesuai dengan data yang dihasilkan oleh sistem, sehingga diperoleh tingkat kesesuaian sebesar 100%.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa komunikasi antara ESP32 dengan *website* telah berjalan dengan baik dan mampu mendukung fungsi monitoring hasil penyortiran secara langsung. Selain itu, sistem juga mampu menangani kondisi ketika hasil pembacaan sensor berada di luar rentang nilai klasifikasi yang telah ditentukan dengan menampilkan status *unknown*. Penggunaan status tersebut mencegah sistem memaksakan hasil pembacaan ke dalam salah satu kategori kematangan ketika karakteristik warna yang terdeteksi tidak memenuhi kriteria klasifikasi yang tersedia. Hal ini menjadi salah satu aspek yang mendukung keandalan sistem dalam menghadapi kondisi pembacaan yang berada di luar parameter yang telah ditentukan.

Dengan demikian, sistem yang meliputi perancangan sistem penyortir buah kopi berdasarkan tingkat kematangan menggunakan sensor TCS34725, integrasi sensor *load cell* sebagai pengukur berat, serta pengembangan sistem monitoring berbasis HTML telah berhasil direalisasikan dengan tingkat keberhasilan klasifikasi warna sebesar 90%. Meskipun demikian, peningkatan kinerja sistem masih dapat dilakukan melalui penyempurnaan algoritma klasifikasi, penyesuaian batas rentang nilai warna pada setiap kategori kematangan, serta pengendalian kondisi pencahayaan pada saat proses pembacaan sensor. Selain itu, peningkatan ketelitian kalibrasi *load cell* juga dapat dilakukan untuk mengurangi nilai *error* pengukuran berat.