

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA

4.1 Pengujian Komponen

Pengujian komponen dilakukan untuk memastikan bahwa komponen yang digunakan dapat beroperasi secara baik dan akurat, sehingga dapat menghindari kesalahan komponen dalam sistem.

4.1.1 Pengujian Catu Daya

Pengujian catu daya dilakukan untuk memastikan bahwa *power supply* memiliki tegangan keluaran yang stabil dan sesuai kebutuhan sebelum digunakan pada sistem. Catu daya ini berfungsi sebagai sumber energi utama bagi seluruh komponen, termasuk mikrokontroler ESP32, ESP32-CAM, Pump Motor, serta berbagai sensor dan aktuator lainnya. Pengujian dilakukan dengan menggunakan multimeter digital yang diatur pada mode pengukuran tegangan DC guna memverifikasi kestabilan dan kesesuaian nilai tegangan yang dihasilkan.

Tabel 4.1 Pengujian Catu Daya

No	Pengukuran	Multimeter
1	<i>Input</i> PLN	225 V
2	<i>Output Power Supply</i>	12,04 V

Pada pengujian yang ditampilkan pada Tabel 4.1 digunakan alat ukur multimeter digital yang berfungsi untuk mengukur tegangan AC maupun DC. Proses pengujian dilakukan dengan menghubungkan probe multimeter ke *power supply*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan *input* dari PLN sebesar 225 VAC, yang masih berada dalam batas normal dengan toleransi $\pm 10\%$ dari standar PLN. Sementara itu, tegangan *output* DC dari *power supply* sebesar 12,04 VDC, menunjukkan bahwa *power supply* mampu menyalurkan tegangan yang stabil dan sesuai untuk mendukung kinerja seluruh komponen pada alat yang dirancang.

4.1.2 Pengujian Buck Converter LM2596

Pengujian Modul Stepdown LM2596 ini bertujuan untuk mengetahui tegangan yang digunakan sebagai catu daya pada mikrokontroler ESP32 dan juga untuk kebutuhan komponen lainnya yang membutuhkan tegangan 5 dan 3,3 volt.

Tabel 4.2 Pengujian Buck Converter LM2596

No	Pengukuran	Multimeter
1	<i>Input</i> Psu (3,3V)	11,99 V
2	<i>Output</i> Buck (3,3V)	3,3 V
3	<i>Input</i> Psu (5V)	11,99 V
4	<i>Output</i> Buck (5V)	5 V

Berdasarkan data pada Tabel 4.2 bahwa modul stepdown LM2596 dapat bekerja dengan baik karena menurunkan tegangan ke angka 5 dan 3,3 volt dimana mendekati spesifikasi dan sesuai dengan kebutuhan pada alat.

4.1.3 Pengujian *Capacitive Soil Moisture*

Pengujian sensor *Capacitive Soil Moisture* dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi dan keandalan sensor dalam mengukur kelembapan tanah serta memastikan bahwa sensor bekerja sesuai dengan spesifikasi teknis yang telah ditetapkan. Tujuan lain dari pengujian ini adalah untuk mengevaluasi kemampuan sensor dalam mendeteksi kondisi tanah kering dan basah. Tahap awal pengujian diawali dengan proses kalibrasi sensor, yaitu dengan menentukan nilai *Analog to Digital Converter* (ADC) minimum dan maksimum sebagai acuan kondisi ekstrem. Penentuan nilai ADC dilakukan dengan menempatkan sensor pada media tanah dalam kondisi sangat kering hingga diperoleh nilai ADC pada kondisi tanah kering, kemudian dilanjutkan dengan menempatkan sensor pada media tanah yang sangat basah untuk memperoleh nilai ADC maksimum.

Berdasarkan hasil kalibrasi tersebut, diketahui bahwa kondisi tanah paling kering yang teridentifikasi oleh alat ukur standar berada pada nilai kelembapan sebesar 9%, sedangkan kondisi tanah paling basah mencapai 99%. Nilai ini digunakan sebagai acuan dalam proses kalibrasi sensor, sehingga pembacaan

sensor disesuaikan untuk merepresentasikan kondisi tanah kering dan basah sesuai dengan nilai yang terdeteksi oleh alat ukur standar pabrik. Dengan demikian, nilai 9% dan 99% bukan merupakan hasil pembacaan langsung sensor, melainkan nilai rujukan yang diperoleh dari alat ukur standar.

Selanjutnya, pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor yang telah dikalibrasi dengan alat ukur standar pabrik yang memiliki tingkat akurasi tinggi. Proses pengujian menggunakan media tanah yang sama, di mana sensor dan alat ukur ditempatkan pada kondisi yang identik, sehingga diperoleh data pengujian sebagaimana ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 4.3 Pengujian *Capacitive Soil Moisture*

No	Pengukuran Aktual	Pengukuran Sensor	Nilai ADC	Error
Soil 1	9%	9%	2950	0%
	24%	24%	2640	0%
	62%	61%	2046	2%
	72%	73%	1735	1%
	97%	98%	1399	1%
Soil 2	9%	9%	3050	0%
	25%	25%	2705	0%
	62%	62%	2137	0%
	72%	73%	1850	1%
	90%	91%	1637	1%
Soil 3	9%	9%	3000	0%
	25%	26%	2600	1%
	58%	58%	2096	0%
	72%	71%	1730	1%
	96%	95%	1407	1%

Berdasarkan hasil pengujian yang disajikan pada Tabel 4.3 terlihat bahwa error maksimum yang terjadi sebesar 2%, sedangkan error minimum sebesar 0%. Seluruh nilai error tersebut masih berada dalam batas toleransi spesifikasi sensor, yaitu sekitar $\pm 3\%$ hingga $\pm 5\%$, sebagaimana umumnya pada sensor *Capacitive*

Soil Moisture V2.0. Dengan demikian, sensor dapat dikatakan memiliki akurasi yang baik dan bekerja secara konsisten dalam mendeteksi kelembapan tanah pada berbagai kondisi, sehingga tidak memerlukan kalibrasi tambahan.

Nilai hasil kalibrasi *Analog to Digital Converter* (ADC) yang digunakan sebagai acuan pengukuran menunjukkan perbedaan karakteristik pada setiap sensor. Untuk sensor Soil 1, diperoleh nilai ADC kondisi tanah kering sebesar 2950 dan kondisi tanah basah sebesar 1390. Sensor Soil 2 memiliki nilai ADC tanah kering sebesar 3050 dan tanah basah sebesar 1500, sedangkan pada sensor Soil 3 nilai ADC tanah kering sebesar 3000 dan nilai ADC tanah basah sebesar 1350. Perbedaan nilai ini menunjukkan adanya variasi sensitivitas antar sensor, namun tidak berpengaruh signifikan terhadap tingkat akurasi pengukuran setelah dilakukan proses kalibrasi.

4.1.4 Pengujian DHT22

Pengujian sensor DHT22 dilakukan untuk menilai tingkat akurasi sensor dalam mengukur suhu dan kelembapan udara di sekitar alat, serta memastikan kinerjanya sesuai dengan spesifikasi teknis yang ditetapkan. Selain itu, pengujian ini juga bertujuan untuk menilai kemampuan sensor dalam mendeteksi perubahan suhu dan kelembapan secara *real-time*. Sebelum dilakukan perbandingan dengan alat ukur referensi, sensor dikalibrasi terlebih dahulu dengan cara membandingkan hasil pembacaan DHT22 terhadap alat ukur yang memiliki akurasi tinggi, dengan toleransi kesalahan $\pm 1\%$ untuk suhu dan $\pm 5\%$ untuk kelembapan. Berdasarkan hasil pengujian, sensor DHT22 menunjukkan kesalahan pembacaan sebesar 1% untuk suhu dan 14% untuk kelembapan. Oleh karena itu, dilakukan penyesuaian (kalibrasi) pada kode program agar hasil pembacaan sensor lebih mendekati nilai dari alat ukur referensi.

Tabel 4.4 Pengujian DHT22

No	Kondisi	Jam	Pengukuran Aktual	Pengukuran DHT22	Error
1	Suhu	9.20	29,6°C	29,4°C	0,7%
	Kelembapan		63%	63,9%	1,4%
2	Suhu	12.37	30,4°C	31,1°C	2,3%
	Kelembapan		59%	57,6%	2,4%
3	Suhu	16.22	30,1°C	30,4°C	1,0%
	Kelembapan		64%	66,1%	3,3%
4	Suhu	20.23	27,4°C	27,2°C	0,7%
	Kelembapan		78%	78,5%	0,6%

Berdasarkan Tabel 4.4, terlihat bahwa sensor DHT22 memiliki error terbesar pada suhu sebesar 2,3% dengan rata-rata error sebesar 1,1%, dan error terbesar pada kelembapan sebesar 3,3% dengan rata-rata error sebesar 1,9%. Nilai ini menunjukkan bahwa setelah dilakukan kalibrasi melalui kode program, hasil pembacaan sensor sudah cukup mendekati nilai pengukuran aktual. Seluruh nilai error tersebut masih berada dalam batas toleransi spesifikasi sensor DHT22, yaitu sekitar $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ untuk suhu (sekitar $\pm 2\%$) dan $\pm 2-5\%$ untuk kelembapan relatif. Hal ini membuktikan bahwa sensor DHT22 memiliki tingkat akurasi yang baik untuk aplikasi pengukuran lingkungan, terutama pada rentang suhu dan kelembapan normal. Selain itu, perbedaan kecil yang muncul masih tergolong wajar, karena dapat dipengaruhi oleh sirkulasi udara, posisi penempatan sensor, serta waktu respon sensor terhadap perubahan kondisi udara. Dengan demikian, sensor DHT22 dapat dikatakan bekerja secara stabil dan andal untuk digunakan dalam sistem *monitoring* suhu dan kelembapan udara.

4.1.5 Pengujian Sensor BH1750

Pengujian sensor BH1750 dilakukan untuk mengevaluasi tingkat akurasi sensor dalam mengukur intensitas cahaya di sekitar alat, serta memastikan kinerjanya sesuai dengan spesifikasi teknis yang telah ditetapkan. Selain itu, pengujian ini bertujuan untuk menilai kemampuan sensor dalam mendeteksi perubahan intensitas cahaya secara tepat. Sebelum digunakan pada sistem, sensor

BH1750 terlebih dahulu dikalibrasi melalui penyesuaian pada program, karena hasil pengukuran awal menunjukkan selisih yang cukup besar antara pembacaan sensor dan alat ukur referensi, dengan rata-rata error sebesar 34%. Oleh karena itu, dilakukan proses kalibrasi agar hasil pembacaan sensor dapat lebih mendekati nilai pengukuran aktual dan meningkatkan akurasi sistem secara keseluruhan.

Tabel 4.5 Pengujian Sensor BH1750

No	Jam	Pengukuran Aktual	Pengukuran Sensor	Pengukuran Sensor Kalibrasi	Error
1	08.15	3958 Lux	2643 Lux	3912 Lux	1,2%
2	12.46	4908 Lux	3361 Lux	4975 Lux	1,4%
3	16.34	945 Lux	667 Lux	987 Lux	4,4%
4	19.21	39 Lux	22 Lux	33 Lux	15,4%

Berdasarkan data pada Tabel 4.5, terlihat bahwa sensor BH1750 memiliki error terbesar sebesar 15,4% pada malam hari, namun memiliki rata-rata error dari pagi hingga malam sebesar 2,7%. Hal ini menunjukkan bahwa setelah dilakukan kalibrasi melalui kode program, hasil pembacaan sensor telah mendekati nilai pengukuran aktual. Seluruh nilai error tersebut masih berada dalam batas toleransi spesifikasi sensor BH1750, yaitu dengan tingkat akurasi sekitar $\pm 20\%$ pada intensitas cahaya rendah dan $\pm 1-3\%$ pada intensitas cahaya sedang hingga tinggi, sebagaimana tercantum dalam lembar data (datasheet) sensor. Nilai error yang relatif tinggi pada malam hari wajar terjadi karena tingkat intensitas cahaya yang sangat rendah mendekati batas sensitivitas sensor, sehingga pembacaan menjadi kurang stabil. Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor BH1750 bekerja dengan baik dan memiliki akurasi yang cukup tinggi untuk digunakan dalam sistem *monitoring* intensitas cahaya. Kalibrasi yang dilakukan berhasil mengurangi selisih pembacaan secara signifikan, sehingga sensor dapat diandalkan untuk mendeteksi perubahan pencahayaan dari pagi hingga malam hari.

4.1.6 Pengujian Sensor Hujan

Pengujian sensor hujan dilakukan untuk menilai dan mengevaluasi tingkat sensitivitas sensor dalam mendeteksi kondisi cuaca, khususnya untuk membedakan antara keadaan kering, gerimis, dan hujan lebat berdasarkan intensitas air yang mengenai permukaan sensor. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memastikan bahwa sensor mampu memberikan respon yang akurat terhadap perubahan kondisi lingkungan melalui variasi nilai tegangan atau nilai digital (ADC) yang dihasilkan. Dalam proses pengujian, dilakukan penentuan batas ambang (threshold) agar sensor dapat mengenali kondisi hujan secara tepat tanpa terpengaruh oleh faktor seperti embun atau kelembapan udara yang tinggi, yang dapat menyebabkan deteksi palsu (false detection). Berdasarkan hasil pengujian, ditetapkan bahwa nilai ADC di bawah 2000 menunjukkan kondisi hujan lebat, nilai ADC di bawah 3000 menunjukkan kondisi gerimis, dan nilai ADC di atas 3000 menunjukkan tidak hujan.

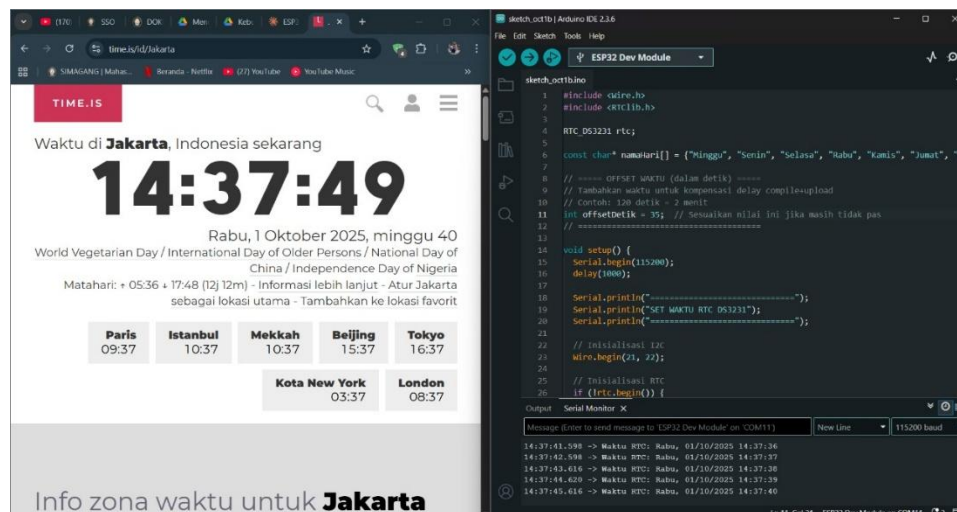
Tabel 4.6 Pengujian Sensor Hujan

No	Kondisi Sensor	Pembacaan Sensor	ADC
1	Tidak ada Air	Tidak Hujan	3980
2	Sedikit Air	Gerimis	2300
3	Banyak Air	Lebat	1968

Tabel 4.6 menunjukkan bahwa sensor hujan memiliki respon yang cepat, stabil, dan sensitif terhadap perubahan kondisi air pada permukaannya. Dengan penerapan ambang batas tersebut, sensor dapat memberikan informasi cuaca yang akurat dan ditampilkan secara *real-time* pada *dashboard* sistem otomatisasi, sehingga mendukung kinerja sistem dalam pengambilan keputusan otomatis seperti pengendalian penyiraman atau perlindungan perangkat dari hujan.

4.1.7 Pengujian *Real Time Clock* DS3231

Pengujian sensor RTC DS3231 dilakukan untuk memastikan akurasi dan kestabilan waktu yang dihasilkan oleh modul RTC dalam sistem. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan DS3231 dalam menyimpan dan menampilkan waktu aktual (jam, menit, detik, serta tanggal) secara konsisten, bahkan ketika sistem utama dimatikan, berkat dukungan baterai cadangan yang terpasang pada modul. Proses pengujian dilakukan dengan cara membandingkan hasil pembacaan waktu dari RTC DS3231 dengan waktu referensi standar, seperti waktu dari komputer atau jam digital yang memiliki ketepatan tinggi.



Gambar 4.1 Pengujian *Real Time Clock* DS3231

Berdasarkan Gambar 4.1, modul RTC DS3231 menunjukkan kesalahan waktu (error) sekitar 9 detik. Berdasarkan spesifikasi teknis pabrikan, modul ini memiliki tingkat akurasi sekitar ± 2 ppm (parts per million), yang setara dengan penyimpangan waktu ± 1 menit per tahun. Artinya, dalam kondisi normal, modul DS3231 hanya akan mengalami deviasi sekitar 0,17 detik per hari atau sekitar 5 detik per bulan. Dengan demikian, hasil pengujian yang menunjukkan selisih 9 detik masih dapat dikatakan wajar, karena dapat dipengaruhi oleh durasi pengujian yang cukup lama, fluktuasi sumber daya listrik, serta proses inisialisasi awal waktu pada sistem. Secara keseluruhan, modul RTC DS3231 tetap menunjukkan akurasi dan kestabilan waktu yang sangat baik, sehingga dapat diandalkan untuk aplikasi yang memerlukan pencatatan waktu dan penjadwalan

otomatis secara presisi, seperti sistem *monitoring* dan kontrol berbasis mikrokontroler.

4.1.8 Pengujian Modul Relay

Pengujian modul relay dilakukan untuk memastikan bahwa modul dapat bekerja dengan baik sebagai saklar elektronik yang mengendalikan beban (seperti pompa air atau perangkat lain) sesuai dengan perintah dari sistem. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah relay berfungsi sesuai logika yang diinginkan, yaitu ketika sistem memberikan sinyal aktif berdasarkan kondisi tertentu atau jadwal yang telah ditentukan, relay akan menyala (ON) dan mematikan beban (OFF) ketika kondisi tersebut tidak terpenuhi. Pada sistem ini, pengujian dilakukan dengan mensimulasikan jadwal penyiraman otomatis, di mana relay diharapkan aktif secara otomatis pada jam yang telah diatur oleh sistem RTC (*Real-Time Clock*) dan nonaktif setelah kelembapan tanah mencapai nilai optimal.

Tabel 4.7 Pengujian Modul Relay

No	Jadwal	Waktu Aktual	Waktu RTC	Kondisi Relay
1	09:00	08:41:21	08:41:20	OFF
		09:00:02	09:00	ON
2	16:10	16:07:16	16:07:15	OFF
		16:10:02	16:10:01	ON

Berdasarkan Tabel 4.7, modul relay dapat berfungsi dengan baik sesuai dengan jadwal penyiraman yang telah ditentukan. Dari tabel pengujian terlihat bahwa pada jadwal pukul 09:00 dan 16:10, relay berhasil aktif (ON) tepat setelah waktu RTC menunjukkan waktu yang sesuai dengan jadwal penyiraman. Hal ini menunjukkan bahwa sinkronisasi antara waktu RTC DS3231 dan logika kontrol relay berjalan dengan akurat, karena perbedaan waktu antara RTC dan waktu aktual hanya sekitar 1 detik, yang masih dalam batas toleransi wajar untuk sistem *real-time* berbasis mikrokontroler. Selain itu, saat waktu belum mencapai jadwal yang ditentukan, kondisi relay tetap OFF, yang menandakan bahwa sistem tidak mengalami kesalahan pemicu (*false trigger*). Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa modul relay mampu beroperasi secara responsif dan stabil,

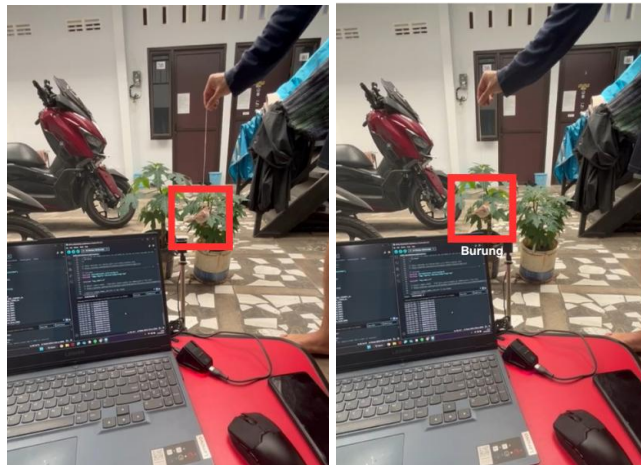
baik dalam mendeteksi waktu penyiraman maupun dalam mengaktifkan dan menonaktifkan pompa secara otomatis sesuai dengan jadwal yang diatur dalam sistem.

4.1.9 Pengujian ESP32 CAM

Pengujian ESP32-CAM dilakukan untuk mengetahui kemampuan kamera dalam mendeteksi objek burung berdasarkan jarak dan kecepatan tangkap gambar. Pengujian ini bertujuan menilai kinerja kamera dalam mengenali objek secara *real-time* serta kestabilan pengiriman data ke modul ESP32 utama melalui komunikasi serial. Dari hasil pengujian, kamera mampu mendeteksi objek dengan baik pada jarak tertentu dengan respon cepat dan stabil, sehingga dapat diandalkan untuk mengaktifkan sistem otomatis seperti *buzzer* atau servo saat burung terdeteksi. Berikut pengujian kecepatan dan jarak:

4.1.9.1 Pengujian Kecepatan

Pengujian kecepatan dilakukan untuk mengetahui seberapa cepat kamera ESP32-CAM mampu mendeteksi dan mengenali objek seperti burung yang bergerak di depan lensa. Pengujian ini menilai waktu respon antara munculnya objek hingga kamera berhasil mengirimkan sinyal deteksi ke ESP32 utama. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kamera dapat mendeteksi objek dengan cepat dalam kondisi pencahayaan yang cukup, dengan jeda deteksi hanya dalam hitungan milidetik hingga beberapa detik tergantung pada kecepatan gerak objek.



Gambar 4. 2 Pengujian Kecepatan

Tabel 4.8 Pengujian Kecepatan Kamera

No	Kecepatan	Kamera
1	1,2 cm/detik	Berhasil
2	2,6 cm/detik	Berhasil
3	3,3 cm/detik	Berhasil
4	5,7 cm/detik	Berhasil
5	10 cm/detik	Berhasil
6	13,3 cm/detik	Tidak Berhasil
7	20 cm/detik	Tidak Berhasil

Berdasarkan data pada Tabel 4.8, diketahui bahwa kamera ESP32-CAM mampu menangkap objek dengan kecepatan maksimal sebesar 10 cm/detik. Nilai tersebut diperoleh melalui pengujian dengan menentukan sudut pandang efektif kamera yang mencapai jarak 40 cm. Selanjutnya, pengujian dilakukan dengan mengamati waktu yang dibutuhkan objek (burung) untuk bergerak dari jarak 0 cm hingga 40 cm. Dari hasil pengamatan tersebut, kecepatan dihitung dengan membagi jarak (40 cm) terhadap waktu tempuh objek. Sebagai contoh, pada kecepatan 10 cm/detik, objek menempuh jarak 40 cm dalam waktu sekitar 4 detik.

4.1.9.2 Pengujian Jarak

Pengujian jarak dilakukan untuk mengetahui seberapa jauh kamera ESP32-CAM mampu mendeteksi dan mengenali objek seperti burung yang berada di depan lensa. Pengujian ini menilai kemampuan kamera dalam menangkap objek pada berbagai jarak serta memastikan sinyal deteksi dapat dikirimkan ke ESP32 utama secara konsisten. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kamera dapat mendeteksi objek dengan baik selama berada dalam jarak tangkap optimal dan kondisi pencahayaan memadai, dengan proses deteksi yang masih berlangsung cepat meskipun jarak objek semakin bertambah.



Gambar 4. 3 Pengujian Jarak

Tabel 4.9 Pengujian Jarak Kamera

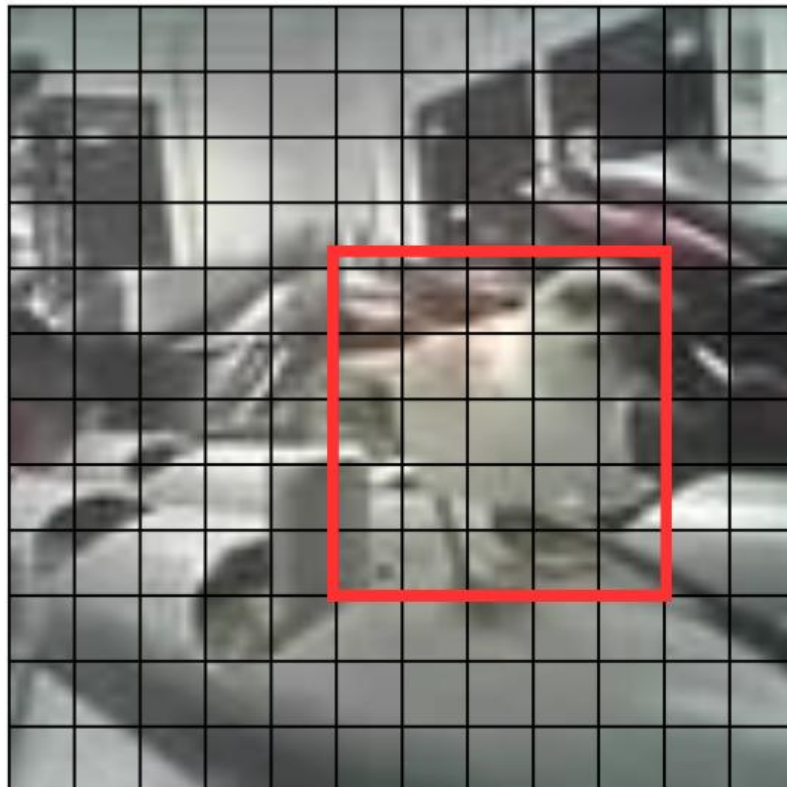
No	Jarak	Kamera
1	Tidak Ada Burung	Berhasil
2	15 Cm	Berhasil
3	35 Cm	Berhasil
4	40 Cm	Berhasil
5	60 Cm	Berhasil
6	80 Cm	Tidak Berhasil

Berdasarkan data Tabel 4.9, diperoleh bahwa kamera ESP32-CAM mampu mendeteksi objek pada jarak maksimum 60 cm. Pengujian dilakukan dengan menempatkan objek burung pada berbagai jarak, kemudian mengukurnya menggunakan meteran yang ditarik lurus dari posisi kamera. Dari hasil tersebut

terlihat bahwa pada jarak di bawah 60 cm, kamera masih dapat menangkap objek dengan jelas dan konsisten. Namun, ketika jarak melebihi 60 cm, kemampuan kamera untuk mengenali objek mulai menurun sehingga deteksi tidak lagi akurat.

4.1.9.3 Pengujian Pixel Kamera

Pengujian ini bertujuan untuk menganalisis batas minimum dan maksimum ukuran *pixel grid* yang masih dapat dideteksi secara baik oleh ESP32-CAM dan model deteksi objek yang digunakan. Pengujian dilakukan dengan memanfaatkan data *testing* untuk mengidentifikasi citra mana saja yang berhasil dan tidak berhasil dideteksi oleh model. Hasil deteksi tersebut kemudian dianalisis lebih lanjut melalui pendekatan visual dengan membagi citra ke dalam grid secara manual, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.4, untuk memetakan area piksel yang berkontribusi terhadap proses deteksi objek.



Gambar 4.4 Pengujian Pixel yang Dapat Dideteksi

Pendekatan pembagian grid ini digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara ukuran objek terhadap resolusi citra dan sel grid yang diproses oleh model. Dengan membandingkan area objek yang terdeteksi (ditunjukkan oleh *box* berwarna merah) terhadap jumlah dan ukuran grid yang terlibat, dapat ditentukan batas ukuran piksel minimum yang masih mampu dikenali oleh model serta ukuran maksimum objek yang tetap terdeteksi secara konsisten. Hasil analisis ini memberikan gambaran kemampuan dan keterbatasan sistem dalam mendeteksi objek pada berbagai skala, sekaligus menjadi dasar evaluasi performa model dan kesesuaian resolusi kamera ESP32-CAM terhadap kebutuhan aplikasi.

Tabel 4.10 Pengujian *Pixel* yang dapat Dideteksi

No	Pixel	Keterangan
1	1x2 Pixel	Tidak Mendeteksi
2	2x1 Pixel	Tidak Mendeteksi
3	2x1,5 Pixel	Tidak Mendeteksi
4	2x3 Pixel	Mendeteksi
5	4x2 Pixel	Mendeteksi
6	4x3 Pixel	Mendeteksi
7	5x5 Pixel	Mendeteksi
8	7x5 Pixel	Mendeteksi
9	7x9 Pixel	Mendeteksi
10	8x5 Pixel	Mendeteksi
11	10x6 Pixel	Mendeteksi

Berdasarkan hasil pengujian yang disajikan pada Tabel 4.10, dapat diketahui bahwa ukuran *pixel grid* minimum yang masih dapat dideteksi oleh model adalah 2×3 piksel. Pada ukuran yang lebih kecil, seperti 1×2 piksel, 2×1 piksel, dan 2×1,5 piksel, model tidak mampu melakukan deteksi objek. Hal ini menunjukkan bahwa pada ukuran tersebut informasi visual yang dihasilkan belum mencukupi bagi model untuk melakukan ekstraksi fitur secara memadai. Sementara itu, ukuran *pixel grid* maksimum yang masih dapat

dideteksi pada pengujian ini adalah 10×6 piksel. Pada ukuran tersebut, model tetap mampu mengenali objek secara konsisten tanpa mengalami kegagalan deteksi. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa rentang ukuran *pixel grid* yang dapat dikenali oleh model berada pada kisaran 2×3 piksel hingga 10×6 piksel.

Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa kemampuan deteksi model dipengaruhi oleh ukuran objek terhadap resolusi citra dan struktur grid yang digunakan dalam proses pembelajaran. Objek dengan ukuran terlalu kecil tidak menyediakan informasi yang cukup untuk membentuk pola fitur yang representatif, sedangkan objek dengan ukuran lebih besar masih dapat terdeteksi selama berada dalam cakupan grid pemrosesan model.

4.2 Pengujian Keseluruhan Sistem

Pengujian ini dilakukan untuk memastikan ketika alat Rancang Bangun *Smart Farming* dengan Sistem Pengusir Hama Burung Otomatis menggunakan Deteksi Objek dioperasikan, sistem dapat bekerja dan berfungsi dengan baik sesuai dengan tujuan perancangan.

4.2.1 Pengujian Sistem *Smart Farming*

Pada tahap ini dilakukan pengujian menyeluruh terhadap sistem untuk memastikan bahwa setiap fitur dan komponen bekerja sesuai fungsi serta mengikuti alur proses yang telah ditetapkan pada diagram alir. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam memantau kelembapan tanah, mengatur proses penyiraman secara otomatis maupun manual, serta mendeteksi keberadaan hama burung di sekitar area tanaman. Secara umum, pengujian dibagi menjadi dua bagian utama: pertama, pengujian performa penyiraman tanaman berdasarkan data sensor; dan kedua, pengujian kemampuan sistem pendeteksi objek dalam mengidentifikasi burung melalui modul ESP32-CAM. Melalui pengujian ini dapat dinilai sejauh mana integrasi sensor, aktuator, dan logika kontrol bekerja secara konsisten dalam kondisi sebenarnya.



Gambar 4.5 Kondisi Alat

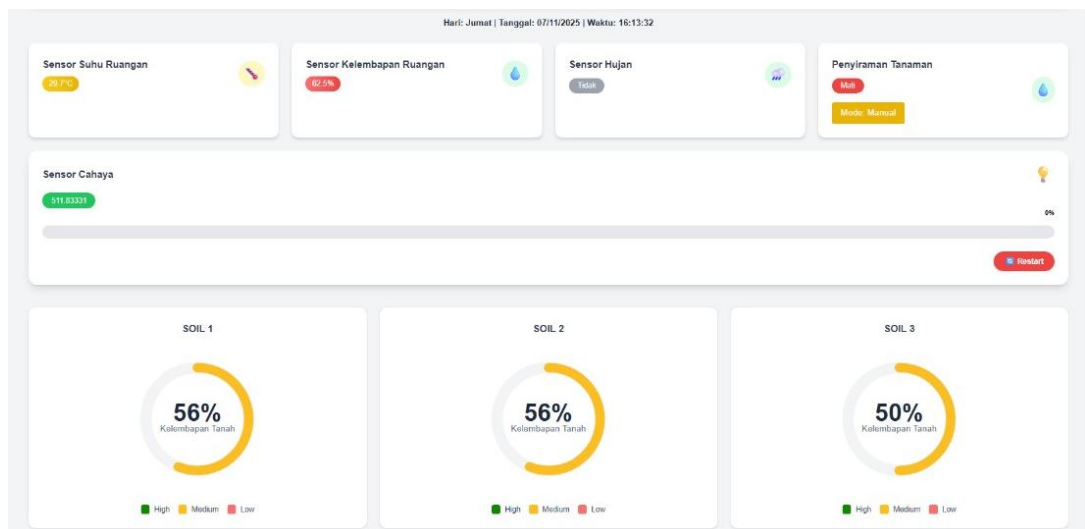
4.2.1.1 Pengujian kelembapan dibawah 60

Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa sensor mampu mengirimkan sinyal informasi secara akurat dan konsisten ke sistem. Proses pengujian diawali dengan menurunkan kelembapan tanah hingga berada di bawah 60% menggunakan mode manual, sehingga sistem tidak melakukan penyiraman otomatis selama proses pengukuran berlangsung. Langkah ini bertujuan untuk mengevaluasi apakah nilai kelembapan yang terbaca benar-benar sesuai dengan kondisi tanah serta dapat diteruskan ke sistem kontrol tanpa keterlambatan atau gangguan. Selain itu, pengujian ini juga membantu memastikan bahwa logika pembacaan sensor, komunikasi data, dan respons sistem berjalan dengan stabil sebelum melanjutkan ke tahap pengujian penyiraman otomatis.



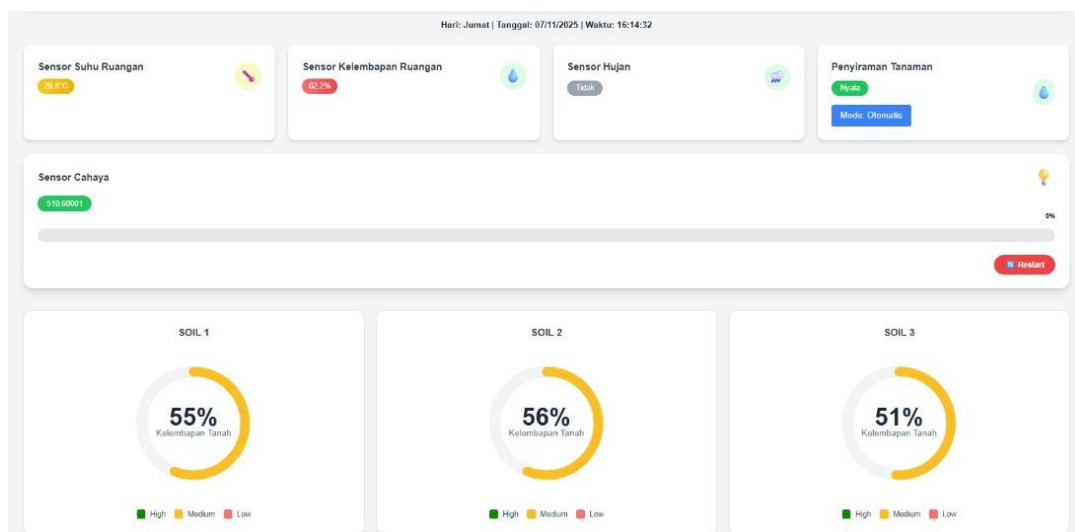
Gambar 4.6 Kondisi LCD Ketika Kelembapan Tanah di Bawah 60%

Pada Gambar 4.6 terlihat bahwa nilai kelembapan tanah yang ditampilkan pada LCD menunjukkan kondisi di bawah 60% dan sejalan dengan data yang ditampilkan pada web *dashboard*. Perbedaan nilai yang muncul sangat kecil dan disebabkan oleh selang waktu pengambilan gambar yang tidak dilakukan secara bersamaan. Namun, ketika pengamatan dilakukan pada waktu yang sama, hasil pembacaan antara LCD dan *dashboard* menunjukkan nilai yang identik, sehingga dapat disimpulkan bahwa proses pengiriman dan penampilan data kelembapan tanah pada sistem berjalan dengan baik dan konsisten.



Gambar 4.7 *Dashboard* Ketika Kelembapan Tanah di Bawah 60%

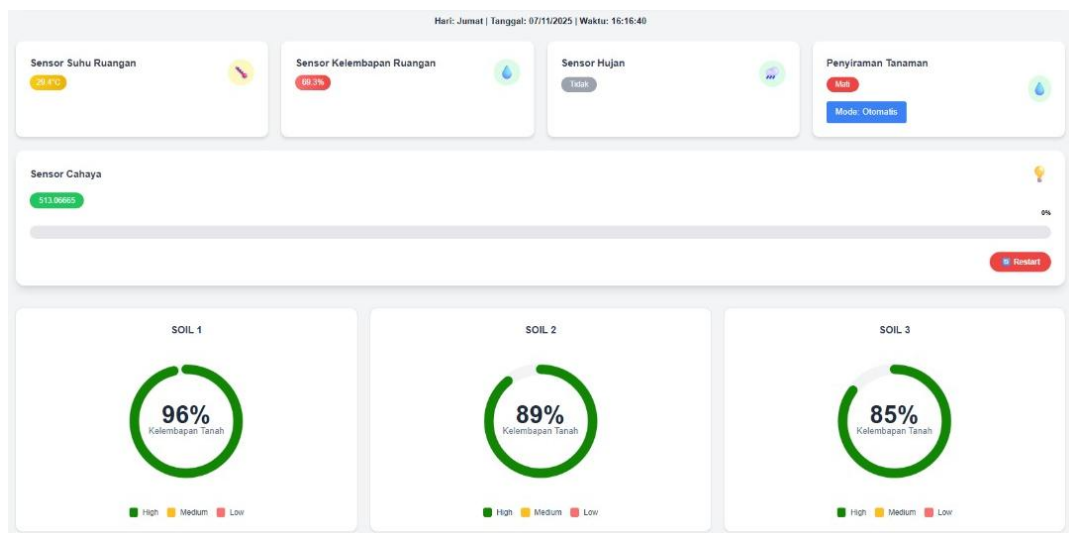
Seperti ditunjukkan pada Gambar 4.7, ketiga sensor telah mendeteksi bahwa nilai kelembapan tanah berada di bawah ambang 60%. Namun, sistem tidak melakukan penyiraman karena mode operasi masih berada pada posisi manual, sehingga logika otomatisasi penyiraman tidak diaktifkan. Kondisi ini menjelaskan mengapa pompa tetap tidak menyala meskipun parameter kelembapan sudah memenuhi syarat penyiraman otomatis. Selain itu, indikator status pompa pada *dashboard* juga menunjukkan kondisi OFF, menandakan bahwa sistem hanya akan mengeksekusi perintah penyiraman apabila tombol manual diaktifkan atau mode otomatis diubah. Pengamatan ini membuktikan bahwa mekanisme pencegahan penyiraman yang tidak diinginkan bekerja dengan baik dan sesuai dengan desain sistem.



Gambar 4.8 Mode diubah Otomatis

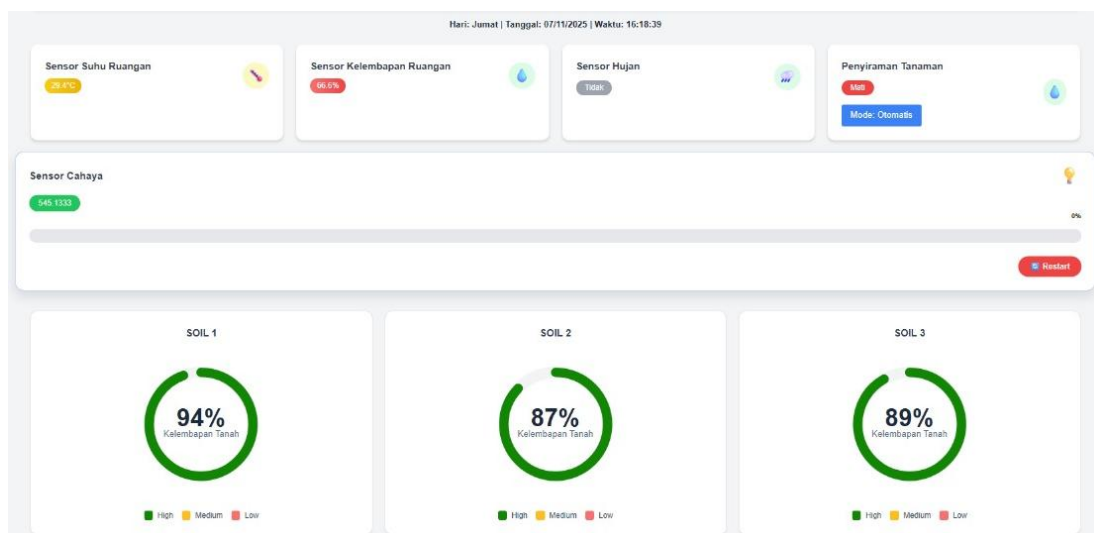
Pada Gambar 4.8 terlihat bahwa ketika mode operasi diubah dari manual ke otomatis, pompa langsung aktif. Hal ini menunjukkan bahwa sistem bekerja sesuai dengan logika yang telah dirancang. Saat mode otomatis diaktifkan, sistem segera membaca nilai dari ketiga sensor kelembapan tanah dan mendeteksi bahwa semuanya berada di bawah ambang batas yang ditentukan, sehingga memicu perintah untuk menyalakan pompa agar proses penyiraman dimulai. Pada momen awal ini, nilai kelembapan tanah memang belum menunjukkan perubahan signifikan karena pompa baru saja menyala dan air belum meresap ke media tanam. Kondisi tersebut merupakan respon awal yang

wajar, mengingat kenaikan kelembapan membutuhkan waktu beberapa saat hingga air terdistribusi secara merata. Hal ini sekaligus membuktikan bahwa mekanisme penyiraman otomatis berjalan dengan benar dan sistem mampu memberikan respons yang cepat terhadap kondisi lingkungan yang terdeteksi.



Gambar 4.9 Dashboard Kelembapan Tanah di Atas 80%

Pada Gambar 4.9 terlihat bahwa ketiga sensor kelembapan tanah telah menunjukkan nilai di atas 80%, sehingga sistem secara otomatis mematikan pompa sesuai dengan logika pengendalian yang telah ditetapkan. Nilai yang terbaca menunjukkan Soil 1 sebesar 96%, Soil 2 sebesar 89%, dan Soil 3 sebesar 85%. Perbedaan nilai ini masih tergolong wajar mengingat proses penyiraman baru saja berlangsung, sehingga distribusi air belum merata pada seluruh area tanam. Selain itu, tingginya nilai pada Soil 1 dipengaruhi oleh cipratan air yang langsung mengenai sensor, sehingga pembacaan meningkat secara signifikan. Kondisi seperti ini umum terjadi pada tahap awal penyiraman dan akan kembali stabil setelah air meresap lebih merata ke dalam media tanam. Temuan ini sekaligus menunjukkan bahwa sistem otomatis dapat mengenali kondisi tanah yang telah mencapai kelembapan optimal dan memutus aliran pompa secara tepat waktu.



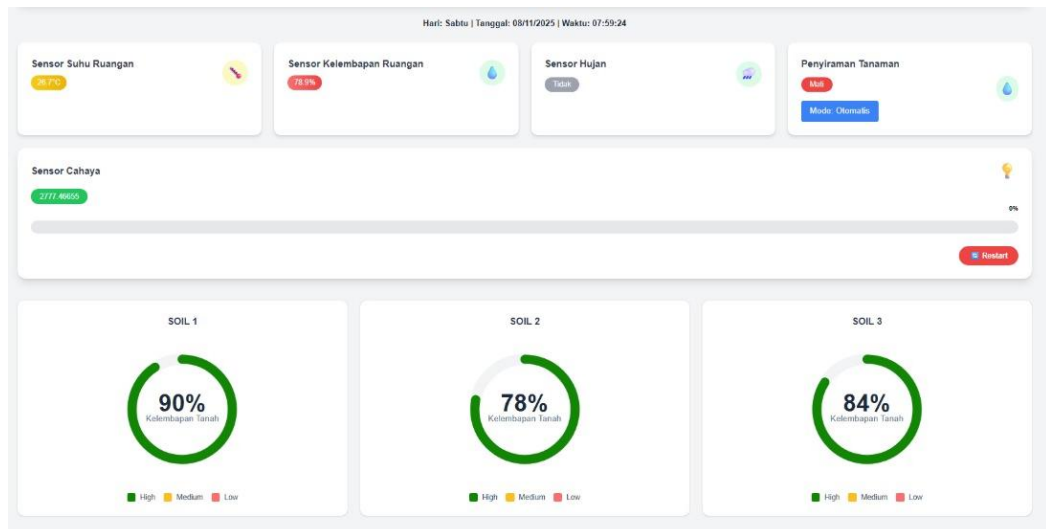
Gambar 4.10 Kondisi Pompa setelah 2 Menit

Pada Gambar 4.10 terlihat bahwa setelah dua menit proses penyiraman, air mulai meresap lebih merata ke dalam media tanam dan efek cipratan dari sprayer juga mulai berkurang. Hal ini tercermin dari nilai kelembapan yang terbaca, yaitu Soil 1 sebesar 94%, Soil 2 sebesar 87%, dan Soil 3 sebesar 89%. Perbedaan pada masing-masing sensor kini sudah jauh lebih kecil dibandingkan sesaat setelah pompa dimatikan, menunjukkan bahwa distribusi air pada ketiga paralon telah menjadi lebih seragam. Nilai kelembapan tersebut berada dalam rentang yang sesuai untuk kondisi optimal tanaman tomat, sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem penyiraman bekerja secara efektif dalam mencapai dan mempertahankan tingkat kelembapan yang diperlukan oleh tanaman.

4.2.1.2 Pengujian penyiraman waktu pagi

Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa modul RTC bekerja sesuai fungsinya sebagai penunjuk waktu utama dalam sistem. Dalam pengujian ini, RTC dibandingkan dengan waktu aktual untuk melihat apakah modul mampu memicu proses penyiraman otomatis tepat pada jadwal yang telah ditentukan, yaitu setiap pagi pada pukul 08.00. Pengujian ini penting karena akurasi waktu sangat berpengaruh pada ketepatan sistem dalam mengatur penyiraman tanaman. Dengan memastikan RTC berjalan stabil dan tidak mengalami deviasi waktu yang signifikan, sistem dapat menjalankan otomatisasi

penyiraman secara konsisten sesuai kebutuhan tanaman tanpa keterlambatan maupun penyiraman yang terlalu dini.



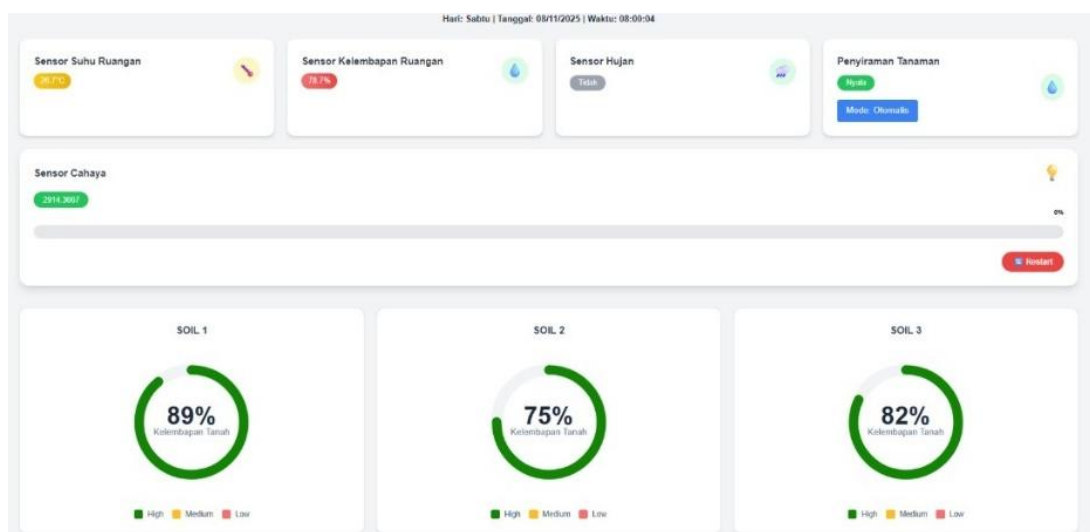
Gambar 4.11 Kondisi Sebelum Jam 8

Pada Gambar 4.11 terlihat bahwa waktu pada modul RTC menunjukkan pukul 07.59, sesuai dengan waktu pada laptop yang juga menunjukkan 07.59. Pada kondisi ini, sistem belum melakukan penyiraman karena jadwal otomatis belum mencapai pukul 08.00. Kelembapan tanah pada ketiga sensor juga masih berada pada nilai yang cukup tinggi, namun sistem telah dirancang dengan mekanisme antisipasi apabila kondisi tersebut terjadi. Meskipun jadwal penyiraman tercapai, pompa tidak akan dipaksakan untuk menyiram apabila semua nilai kelembapan telah berada di atas 80%. Logika ini memastikan bahwa sistem tidak melakukan penyiraman berlebih dan menjaga penggunaan air, sekaligus memastikan bahwa tanaman tetap berada pada kondisi kelembapan optimal tanpa mengganggu jadwal otomatis yang telah ditentukan.



Gambar 4.12 Kondisi LCD saat Jam 8

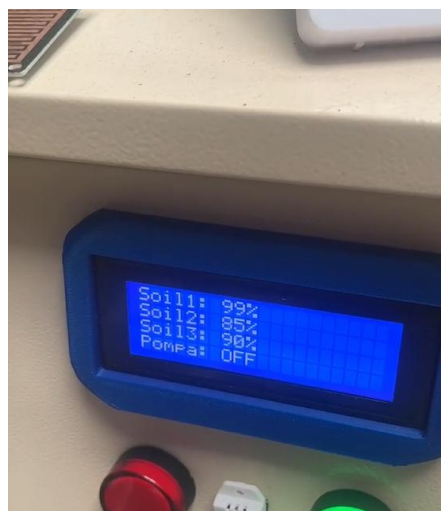
Pada Gambar 4.12 ditunjukkan bahwa ketika waktu pada jam digital dan tampilan LCD sama-sama menunjukkan pukul 08.00, sistem secara otomatis mengaktifkan pompa penyiraman sesuai dengan jadwal yang telah ditetapkan. Nilai kelembapan tanah yang ditampilkan pada LCD juga konsisten dengan data yang muncul pada *dashboard monitoring*, menandakan bahwa proses pembacaan sensor serta pengiriman data berjalan dengan baik. Kondisi ini menunjukkan bahwa sinkronisasi waktu, sistem kontrol penyiraman, dan tampilan informasi telah berfungsi sesuai dengan perancangan sistem.



Gambar 4.13 Kondisi saat Jam 8

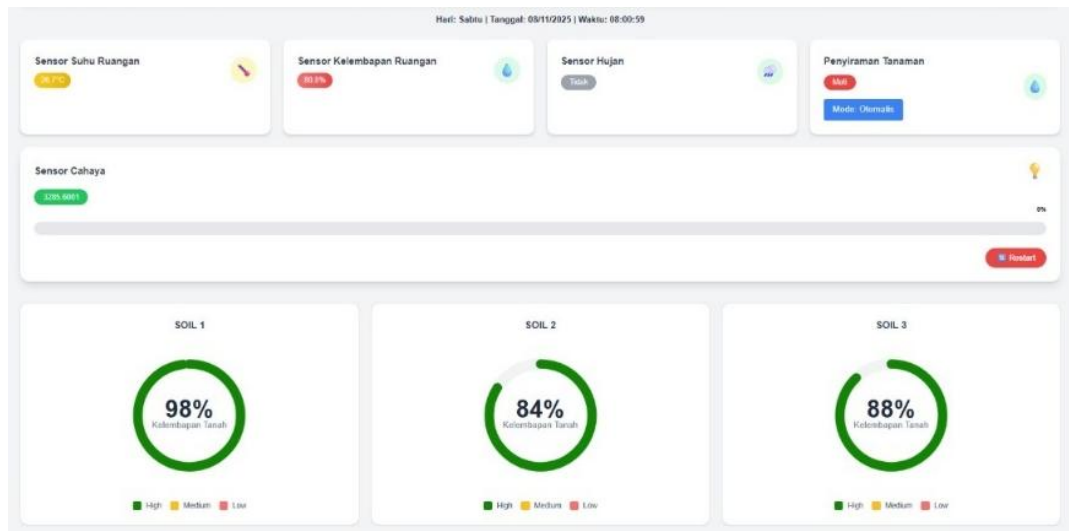
Pada Gambar 4.13 terlihat bahwa ketika waktu pada modul RTC mencapai pukul 08.00, sistem secara otomatis memulai proses penyiraman, sesuai dengan

waktu pada laptop yang juga menunjukkan pukul 08.00. Meskipun terdapat selisih beberapa detik antara waktu aktual dan waktu RTC, perbedaan tersebut sangat kecil dan tidak melebihi 10 detik, sehingga masih berada dalam batas toleransi normal untuk modul RTC. Pada saat pompa mulai menyala, nilai kelembapan tanah belum menunjukkan perubahan yang berarti karena respons sensor terhadap air membutuhkan waktu beberapa saat hingga air benar-benar meresap ke media tanam. Hal ini merupakan kondisi yang wajar dan sesuai dengan karakteristik pembacaan sensor kelembapan tanah.



Gambar 4.14 Kondisi LCD saat Kelembapan di Atas 80%

Pada Gambar 4.14 terlihat bahwa ketika nilai kelembapan tanah telah melampaui batas rata-rata 80%, sistem secara otomatis mematikan pompa penyiraman sebagai bentuk pengendalian yang sesuai dengan logika kerja yang telah dirancang. Perbedaan kecil pada nilai kelembapan antara tampilan LCD dan web *dashboard* disebabkan oleh selisih waktu pengambilan data yang hanya berlangsung beberapa detik. Namun, pada saat data diambil secara bersamaan, nilai kelembapan yang ditampilkan pada LCD dan *dashboard* menunjukkan hasil yang sama. Hal ini menegaskan bahwa proses pembacaan sensor, pengiriman data, serta penampilan informasi pada kedua media berjalan secara konsisten dan akurat.

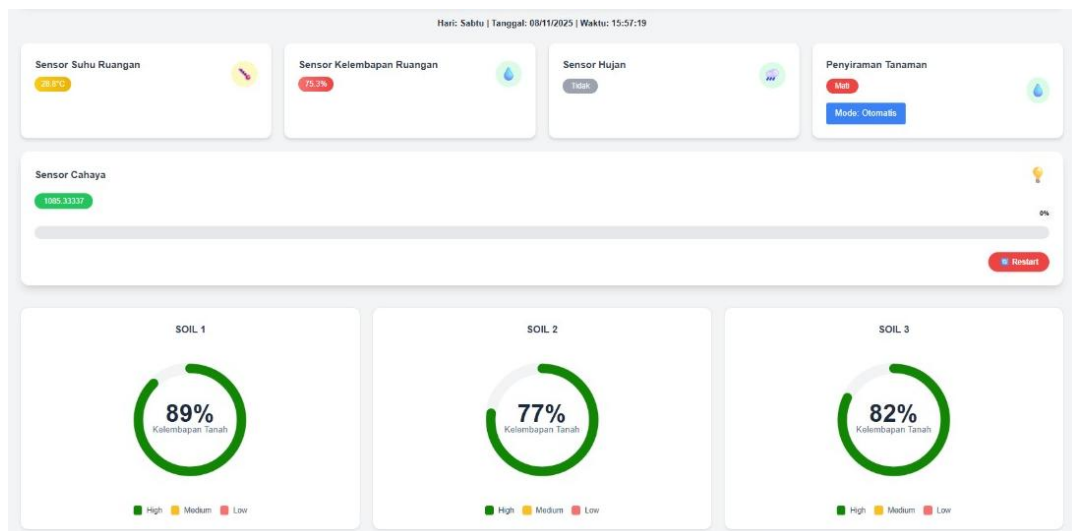


Gambar 4.15 Kondisi Kelembapan Tanah di Atas 80%

Pada Gambar 4.15 terlihat bahwa proses penyiraman berlangsung kurang dari satu menit sebelum pompa kembali mati. Hal ini terjadi karena kondisi awal kelembapan tanah sudah cukup tinggi, sehingga tidak diperlukan waktu lama bagi sistem untuk mencapai batas kelembapan yang ditetapkan. Tanah yang sebelumnya masih basah membuat kenaikan nilai kelembapan terjadi lebih cepat. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa fitur penyiraman otomatis pada pagi hari bekerja sesuai dengan yang dirancang, baik ketika tanah dalam kondisi kering maupun ketika kelembapannya masih tinggi.

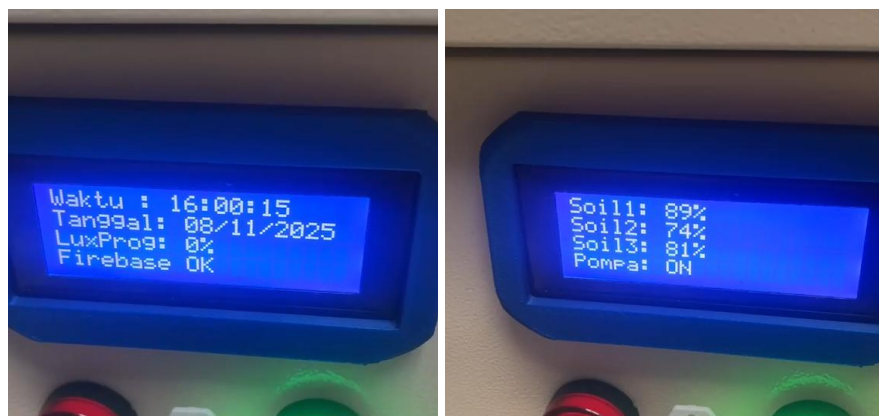
4.2.1.3 Pengujian berdasarkan waktu sore

Pengujian ini dilakukan dengan prosedur yang sama seperti pengujian sebelumnya, yaitu memverifikasi kinerja RTC dan fungsi penyiraman otomatis, namun dengan fokus pada jadwal yang berbeda. Sistem dirancang memiliki dua waktu penyiraman pagi dan sore untuk memenuhi kebutuhan optimal tanaman tomat yang memerlukan suplai air teratur pada kedua periode tersebut. Pengujian ini bertujuan memastikan bahwa sistem mampu menjalankan kedua jadwal secara konsisten, membaca waktu dengan tepat, serta mengaktifkan pompa sesuai kondisi kelembapan tanah yang telah ditentukan.



Gambar 4.16 Sebelum Penyiraman Jadwal Jam 16.00

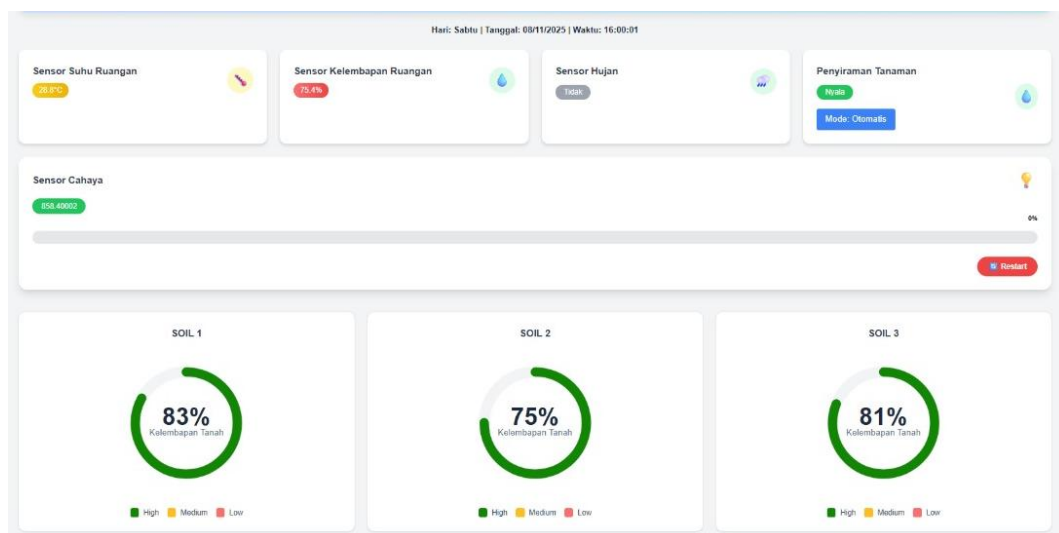
Pada Gambar 4.16 terlihat bahwa RTC menunjukkan pukul 15.57 dan waktu pada laptop juga menunjukkan jam yang sama, menandakan bahwa akurasi waktu RTC masih sangat baik dan selaras dengan waktu aktual. Kondisi kelembapan tanah pada saat pengujian juga masih cukup tinggi, karena sepanjang hari tanaman tidak mendapat paparan sinar matahari akibat cuaca yang terus-menerus hujan. Hal ini menyebabkan kelembapan tanah pada sore hari tidak berbeda jauh dari kondisi setelah penyiraman pagi, meskipun sudah mengalami sedikit penurunan yang wajar seiring berjalannya waktu.



Gambar 4.17 Kondisi LCD saat Jam 16.00

Pada Gambar 4.17 terlihat bahwa ketika waktu pada sistem menunjukkan pukul 16.00 sebagai jadwal penyiraman sore, pompa secara otomatis aktif sesuai dengan pengaturan yang telah ditentukan. Perbedaan nilai kelembapan yang

ditampilkan sebelum dan saat proses penyiraman berlangsung disebabkan oleh kondisi fisik sensor yang sempat mengalami perubahan posisi, sehingga memengaruhi hasil pembacaan sementara. Meskipun demikian, pada saat pengambilan data dilakukan pada waktu yang sama, nilai kelembapan yang ditampilkan pada LCD dan web *dashboard* menunjukkan hasil yang identik. Hal ini menunjukkan bahwa sistem akuisisi data dan sinkronisasi tampilan berjalan dengan baik, serta perbedaan nilai yang muncul lebih dipengaruhi oleh faktor teknis lapangan dibandingkan kesalahan sistem.



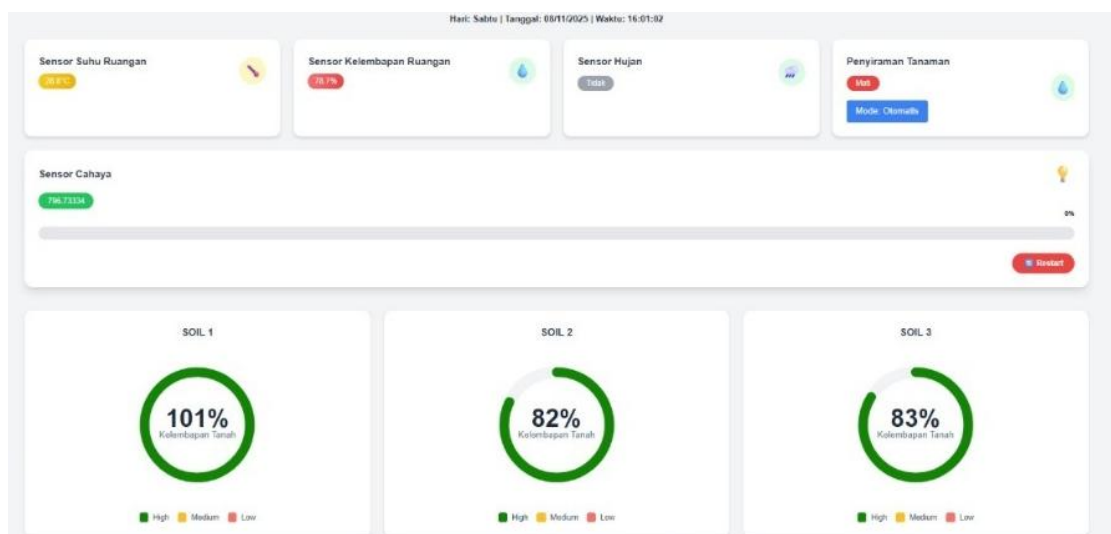
Gambar 4.18 Waktu Tepat 16.00

Pada Gambar 4.18 terlihat bahwa ketika modul RTC menunjukkan pukul 16.01, sistem penyiraman otomatis bekerja dengan sangat responsif. Pompa air langsung aktif dalam waktu kurang dari satu detik setelah waktu penyiraman tercapai. Selisih antara waktu RTC dengan waktu pada laptop juga tidak lebih dari 10 detik, sehingga dapat dipastikan bahwa sinkronisasi waktu berjalan dengan baik dan tidak memengaruhi kinerja sistem. Pada momen tersebut, nilai kelembapan tanah belum menunjukkan perubahan yang berarti. Hal ini wajar karena pompa baru menyala selama sekitar 1 detik, sehingga air belum sempat meresap ke media tanam dan terbaca oleh sensor soil. Perubahan nilai kelembapan umumnya baru terlihat setelah beberapa detik hingga belasan detik, tergantung jenis tanah, kedalaman sensor, dan tekanan pompa.



Gambar 4.19 Kondisi LCD saat Kelembapan Tanah di Atas 80%

Pada Gambar 4.19 terlihat bahwa ketika nilai kelembapan tanah telah mencapai dan melampaui batas rata-rata 80%, sistem secara otomatis mematikan pompa penyiraman sesuai dengan logika kontrol yang telah dirancang. Kondisi ini ditunjukkan secara konsisten baik pada perangkat fisik maupun pada tampilan web *dashboard*, di mana status pompa ditampilkan dalam keadaan *off*. Kesesuaian antara respon aktuator dan informasi yang ditampilkan pada *dashboard* menunjukkan bahwa sistem kontrol dan *monitoring* bekerja selaras, sehingga pengguna dapat memperoleh informasi kondisi penyiraman secara jelas dan akurat tanpa harus melakukan pengecekan langsung di lapangan.



Gambar 4.20 Kelembapan Tanah di Atas 80%

Pada Gambar 4.20 terlihat bahwa pompa air berhenti bekerja setelah ketiga sensor kelembapan tanah menunjukkan nilai di atas 80%, sesuai dengan batas

penghentian penyiraman pada mode otomatis. Pada kondisi ini, pompa hanya menyala selama sekitar satu menit untuk mencapai nilai tersebut. Hal ini terjadi karena tingkat kelembapan sebelum penyiraman memang sudah relatif tinggi, sehingga sistem hanya membutuhkan waktu singkat untuk menaikkan kelembapan tanah hingga batas yang ditentukan. Namun, pada pengujian ini sensor Soil 1 mencatat nilai hingga 101%, yang secara teknis melebihi rentang normal pembacaan kelembapan tanah. Nilai yang tidak wajar ini dapat terjadi akibat perbedaan posisi penempatan sensor dibandingkan dua sensor lainnya. Misalnya, sensor tertanam sedikit lebih dalam, lebih dekat dengan sumber air, atau berada pada area yang memiliki retensi air lebih tinggi. Penempatan yang tidak seragam dapat menyebabkan distribusi air yang diterima setiap sensor berbeda, sehingga menghasilkan pembacaan yang tidak proporsional.

Fenomena ini menunjukkan bahwa konsistensi penempatan sensor sangat berpengaruh terhadap akurasi pengukuran, dan untuk mendapatkan data kelembapan yang lebih seragam diperlukan penempatan sensor pada kedalaman dan lokasi yang setara.

4.2.2 Pengujian Sistem Deteksi Objek untuk Mengusir Hama Burung

Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mendeteksi objek burung melalui kamera serta memastikan bahwa seluruh respons sistem bekerja sesuai dengan alur yang telah dirancang pada diagram alir.

4.2.2.1 Confusion Matrix

Confusion matrix adalah alat evaluasi yang digunakan untuk menilai kinerja model klasifikasi dengan mengelompokkan hasil prediksi ke dalam kategori *true positive*, *true negative*, *false positive*, dan *false negative*, yang selanjutnya digunakan untuk menghitung metrik performa model.

Tabel 4.11 Struktur Nilai *Confusion Matrix*

Aktual/Prediksi	Burung	<i>Background</i>
Burung	TP = 100	FN = 6
<i>Background</i>	FP = 1	TN = 26

Berdasarkan hasil pengujian sistem deteksi objek burung, diperoleh confusion matrix sebagaimana ditunjukkan pada Tabel di atas. Dari total 133 data uji, terdapat 106 data burung dan 27 data background. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengklasifikasikan 100 data burung dengan benar (*true positive*), sedangkan 6 data burung tidak berhasil terdeteksi dan diklasifikasikan sebagai background (*false negative*).

Pada kelas background, sistem berhasil mengklasifikasikan 26 data dengan benar (*true negative*), namun terdapat 1 data background yang salah terdeteksi sebagai burung (*false positive*). Dengan demikian, jumlah data yang berhasil diklasifikasikan dengan benar adalah 126 data, sedangkan 7 data lainnya mengalami kesalahan klasifikasi.

Distribusi nilai *true positive*, *true negative*, *false positive*, dan *false negative* pada confusion matrix ini menjadi dasar dalam perhitungan metrik evaluasi kinerja model, yaitu accuracy, precision, recall, dan F1-score. Nilai-nilai metrik tersebut digunakan untuk menilai kemampuan sistem dalam mendeteksi keberadaan burung serta membedakannya dari objek background secara kuantitatif.

1. Accuracy

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} = \frac{100+26}{100+26+1+6} = \frac{126}{133} = 0,9474 \quad (3.1)$$

Berdasarkan hasil perhitungan evaluasi kinerja model, diperoleh nilai accuracy sebesar 94,74%. Nilai *accuracy* tersebut menunjukkan bahwa dari total 133 data uji, sistem mampu mengklasifikasikan 126 data dengan benar, baik pada kelas burung maupun background. Tingginya nilai *accuracy* ini menunjukkan bahwa model memiliki tingkat ketepatan yang sangat baik dalam melakukan proses klasifikasi secara keseluruhan. Nilai *accuracy* yang diperoleh mengindikasikan bahwa sistem deteksi objek yang dikembangkan mampu membedakan antara objek burung dan background dengan tingkat kesesuaian yang tinggi terhadap data aktual. Meskipun demikian, masih terdapat sejumlah kecil kesalahan klasifikasi yang ditunjukkan oleh adanya nilai *false positive* dan *false negative*. Oleh karena itu, penggunaan metrik evaluasi lain seperti precision, recall, dan F1-score tetap diperlukan untuk

memberikan gambaran kinerja model yang lebih menyeluruh, khususnya dalam mendeteksi objek burung sebagai kelas utama.

2. Precision

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} = \frac{100}{100 + 1} = \frac{100}{101} = 0,9901 \quad (3.2)$$

Berdasarkan hasil evaluasi, diperoleh nilai precision sebesar 99,01%. Nilai precision yang tinggi menunjukkan bahwa sebagian besar data yang diprediksi sebagai objek burung merupakan data burung yang sebenarnya. Dengan kata lain, kesalahan klasifikasi berupa *false positive* relatif sangat kecil, yaitu hanya terdapat satu data background yang salah terdeteksi sebagai burung. Nilai precision yang tinggi ini mengindikasikan bahwa model memiliki tingkat ketelitian yang sangat baik dalam memprediksi keberadaan burung, sehingga risiko kesalahan deteksi objek non-burung sebagai burung dapat diminimalkan. Hal ini menjadi penting dalam konteks sistem pengusir hama burung, karena kesalahan deteksi dapat menyebabkan sistem bekerja pada kondisi yang tidak diperlukan. Oleh karena itu, nilai precision yang tinggi menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan respons berdasarkan hasil deteksi yang dapat dipercaya.

3. Recall

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} = \frac{100}{100 + 6} = \frac{100}{106} = 0,9434 \quad (3.3)$$

Berdasarkan hasil evaluasi kinerja model, diperoleh nilai recall sebesar 94,34%. Nilai recall ini menunjukkan kemampuan model dalam mendeteksi data burung dari keseluruhan data burung yang ada pada data uji. Dari total 106 data burung, sebanyak 100 data berhasil terdeteksi dengan benar, sementara 6 data lainnya tidak terdeteksi dan diklasifikasikan sebagai background (*false negative*). Nilai recall yang tinggi mengindikasikan bahwa sebagian besar objek burung yang muncul pada citra uji dapat terdeteksi oleh sistem. Meskipun masih terdapat sejumlah kecil data burung yang tidak terdeteksi, hasil ini menunjukkan bahwa model memiliki

kemampuan yang baik dalam mengenali keberadaan burung sebagai objek utama. Evaluasi menggunakan metrik recall menjadi penting karena berkaitan langsung dengan tingkat kegagalan sistem dalam mendeteksi objek burung, yang dapat berdampak pada kinerja sistem pengusir hama burung secara keseluruhan.

4. *F1-Score*

$$F1 - Score = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} = 2 \times \frac{0,9901 \times 0,9434}{0,9901 + 0,9434} = 0,9661 \quad (3.4)$$

Berdasarkan hasil evaluasi kinerja model, diperoleh nilai F1-score sebesar 96,61%. Nilai F1-score merupakan rata-rata harmonik dari nilai precision dan recall, sehingga metrik ini digunakan untuk menilai keseimbangan antara ketelitian model dalam memprediksi objek burung dan kemampuannya dalam mendeteksi seluruh data burung yang ada. Nilai F1-score yang tinggi menunjukkan bahwa model memiliki keseimbangan yang baik antara tingkat kesalahan *false positive* yang rendah dan tingkat *false negative* yang relatif kecil. Dengan demikian, model tidak hanya mampu memprediksi objek burung dengan tingkat ketelitian yang tinggi, tetapi juga mampu mendeteksi sebagian besar objek burung yang muncul pada data uji. Nilai F1-score ini menunjukkan bahwa kinerja model secara keseluruhan berada pada kategori sangat baik dalam mendukung sistem deteksi burung yang dikembangkan. Pada penelitian oleh Firdaus, nilai F1-score yang didapatkan sebesar 99,2% [42], pada penelitiannya lainnya oleh Firdaus, nilai F1-score yang didapatkan sebesar 97,3% [43], terakhir pada penelitian oleh Putri, nilai F1-score yang didapatkan sebesar 93,3% [44]. F1-score pada penelitian ini masuk pada nilai rata-rata dari ketiga penelitian di atas.

4.2.2.2 Pengujian Kamera Tidak Mendeteksi Burung

Pada proses pengujian, objek burung diletakkan di area sekitar tanaman sehingga dapat tertangkap oleh kamera ESP32-CAM. Selanjutnya diamati apakah aktuator, seperti servo dan *buzzer*, memberikan respons yang sesuai dengan kondisi deteksi. Pengujian ini juga bertujuan untuk memastikan bahwa proses komunikasi antara ESP32-CAM dan ESP32 utama berjalan dengan benar,

mulai dari pengiriman sinyal *BURUNG_DETECTED*, pemrosesan perintah oleh mikrokontroler, hingga aktivasi aktuator secara real time. Dengan demikian dapat dilihat apakah sistem mampu memberikan respons yang cepat, akurat, dan konsisten dalam kondisi lingkungan sebenarnya. Jika seluruh komponen bekerja sebagaimana mestinya, maka dapat disimpulkan bahwa mekanisme deteksi dan penanggulangan hama burung telah berfungsi sesuai dengan desain yang direncanakan.



Gambar 4.21 Kondisi Servo dan *Buzzer* tidak ada burung

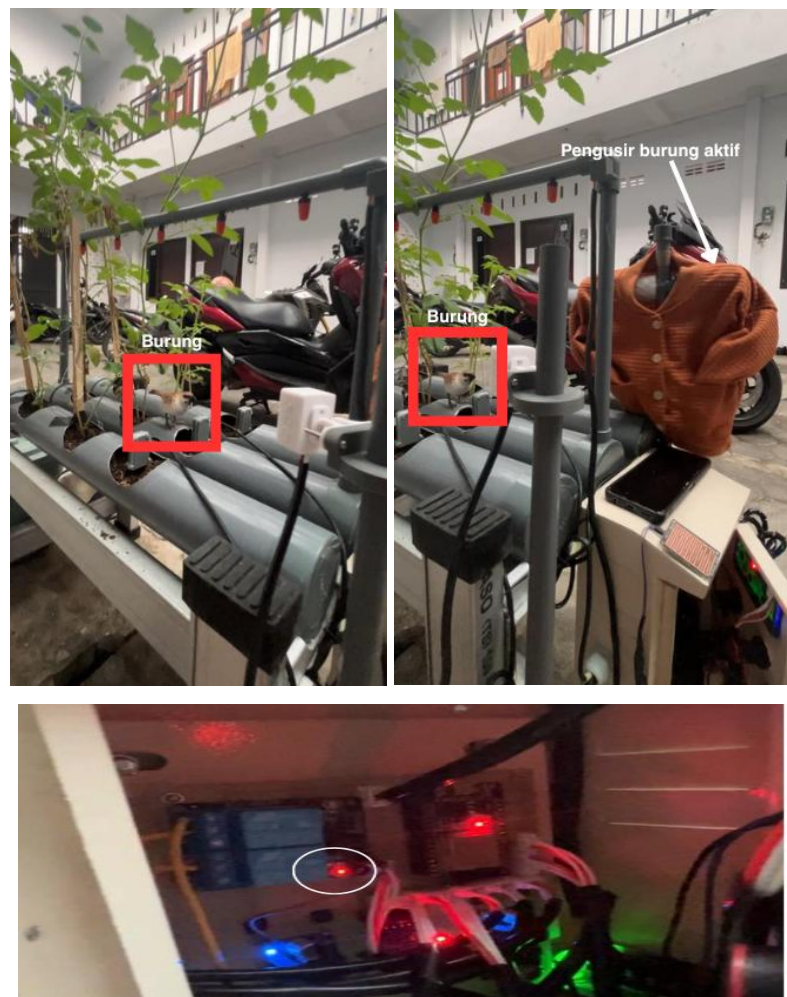
Pada Gambar 4.21, sistem tidak memberikan respons ketika tidak terdapat burung di area pengamatan, yang ditandai dengan motor servo tetap pada posisi diam dan buzzer dalam kondisi tidak aktif. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem mampu mengenali keadaan tanpa objek target dengan baik. Namun, pada beberapa kondisi pengujian lainnya, sistem masih mengalami false positive, yaitu mendeteksi keberadaan burung meskipun objek tersebut sebenarnya tidak ada.

False positive yang terjadi berada dalam batas wajar dan umumnya dipengaruhi oleh faktor lingkungan, seperti perubahan intensitas cahaya,

bayangan, atau objek lain yang memiliki kemiripan visual dengan burung. Keberadaan false positive ini tidak menunjukkan bahwa sistem memiliki kinerja yang buruk, karena aktivasi aktuator yang terjadi bersifat sementara dan tidak menimbulkan dampak negatif yang signifikan terhadap kondisi tanaman.

Sebaliknya, kegagalan mendeteksi burung yang benar-benar ada (false negative) berpotensi menyebabkan kerusakan tanaman. Oleh karena itu, sistem dirancang dengan tingkat sensitivitas yang lebih tinggi untuk meminimalkan kemungkinan false negative, meskipun konsekuensinya adalah munculnya false positive dalam jumlah terbatas. Pendekatan ini menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat keandalan yang baik dalam membedakan kondisi adanya dan tidak adanya burung di area pengamatan.

4.2.2.3 Pengujian Kamera Mendeteksi Burung



Gambar 4.22 Kondisi *Buzzer* dan *Servo* Ketika Terdeteksi Burung

Pada Gambar 4.22, terlihat bahwa ketika kamera mendeteksi keberadaan burung, sistem secara otomatis memberikan respons dengan mengaktifkan motor servo dan buzzer. Motor servo bergerak dari posisi 0° menuju 180° kemudian kembali ke posisi awal, sedangkan buzzer aktif pada tegangan 12 V dan menghasilkan suara dengan tingkat kebisingan yang cukup tinggi sebagai mekanisme pengusiran hama burung. Kedua aktuator tersebut akan tetap aktif selama kamera masih mendeteksi keberadaan objek burung di area tanaman.

Ketika burung tidak lagi terdeteksi, motor servo dan buzzer kembali ke kondisi normal. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme kontrol, proses validasi deteksi, serta komunikasi antara modul ESP32-CAM dan ESP32 utama berjalan dengan baik dan stabil. Respons sistem yang cepat juga menandakan bahwa algoritma deteksi objek mampu bekerja dengan latensi yang rendah, sehingga sistem dapat memberikan respons segera terhadap keberadaan burung di area pengamatan.

Berdasarkan hasil pengujian tersebut, tidak ditemukan kondisi false negative, yaitu keadaan ketika burung sebenarnya berada di area tanaman tetapi tidak terdeteksi oleh sistem. Tidak terjadinya false negative menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat sensitivitas yang baik dalam mengenali keberadaan burung, sehingga risiko kegagalan fungsi pengusiran hama dapat diminimalkan. Dengan demikian, sistem dapat disimpulkan memiliki tingkat keandalan yang baik dalam mendeteksi dan merespons gangguan burung sesuai dengan tujuan perancangan pada aplikasi smart farming.

Pada sistem ini, proses deteksi objek tetap berjalan dengan baik meskipun pompa sedang melakukan penyiraman. Hal ini disebabkan oleh proses *looping* sistem yang berlangsung sangat cepat, sehingga tugas pembacaan kamera, pemrosesan deteksi objek, serta pengendalian aktuator dapat dijalankan secara berulang tanpa saling mengganggu. Dengan demikian, aktivitas penyiraman tidak menghentikan maupun memperlambat proses pendeteksian objek burung.

Selain itu, pemisahan fungsi antara proses deteksi dan kontrol aktuator memungkinkan sistem tetap responsif dalam kondisi multitasking. Selama pompa aktif, modul ESP32-CAM tetap mengirimkan hasil deteksi secara real-

time ke ESP32 utama, sehingga sistem masih mampu mengenali keberadaan burung secara konsisten. Hal ini menunjukkan bahwa arsitektur sistem dirancang dengan baik dan mampu menjaga kestabilan kinerja deteksi meskipun terdapat beban kerja tambahan dari proses penyiraman.



Gambar 4.23 Tampilan Notifikasi Ketika Mendeteksi Burung

Pada gambar 4.23 ditunjukkan bahwa ketika sistem mendeteksi keberadaan burung, *dashboard* secara otomatis menampilkan notifikasi peringatan. Sistem tidak hanya mengirim perintah ke aktuator, tetapi juga memberikan informasi jarak jauh kepada pengguna bahwa terdapat potensi hama yang dapat merusak tanaman. Melalui *dashboard*, pengguna dapat menekan tombol “OK, Saya Mengerti” untuk menonaktifkan *buzzer* dan servo secara manual. Fitur ini membuktikan bahwa sistem memiliki kendali dua arah (*bidirectional control*), di mana pengguna tetap memiliki kontrol penuh terhadap kondisi lapangan meskipun *monitoring* dilakukan dari jarak jauh. Integrasi ini meningkatkan keandalan sistem keamanan tanaman dan memastikan tidak terjadi aktivasi aktuator yang berkepanjangan ketika kondisi sudah aman.