

BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISA

5.1 Pengukuran dan Pengujian

Untuk memastikan sistem kontrol dan monitoring suhu serta kelembapan pada inkubator jamur tiram berbasis PID dengan mikrokontroler ESP32 berfungsi sesuai tujuan yang telah dirancang, dilakukan rangkaian pengukuran dan pengujian. Pengujian ini mencakup beberapa aspek penting seperti fungsionalitas, perbandingan sensor, dan konsistensi data. Setiap pengujian dirancang untuk menilai parameter-parameter penting yang menggambarkan keberhasilan pelaksanaan sistem, sekaligus mengidentifikasi potensi kekurangan alat yang perlu diperbaiki.

5.2 Tujuan dan Parameter Pengujian

Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa sistem kontrol dan monitoring suhu serta kelembapan pada inkubator jamur tiram berbasis ESP32 dengan metode PID bekerja sesuai rancangan. Fokus utama dari pengujian ini adalah untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam menjaga kondisi suhu dan kelembapan inkubator mendekati nilai setpoint yang telah ditentukan, serta memastikan respon otomatis aktuator seperti yang terhubung dengan nozzle kabut terhadap perubahan lingkungan. Selain itu, pengujian bertujuan untuk menilai efektivitas kontrol PID dibandingkan metode on-off, serta memastikan data yang ditampilkan pada aplikasi Blynk sesuai dengan kondisi aktual inkubator jamur secara real-time.

Adapun parameter-parameter yang diuji dalam pengujian ini, diantaranya:

1. Parameter Suhu

Mengetahui apakah suhu dalam inkubator yang dibaca sensor DHT22 memiliki tingkat akurasi yang baik dengan melakukan pembandingan menggunakan termometer digital.

2. Parameter Kelembapan Udara

Memastikan kelembapan udara yang dibaca sensor DHT22 sesuai dengan nilai sebenarnya dengan membandingkan hasil pengukuran menggunakan alat ukur standar (Thermo Hygrometer).

3. Kinerja Aktuator (Kipas dan Peltier)

Untuk mengetahui respon aktuator terhadap sinyal kendali dari ESP32 berbasis PID, apakah kipas dapat menurunkan suhu berlebih dan peltier dapat menurunkan suhu dengan waktu yang lebih cepat.

4. Parameter Waktu Respon PID

Untuk mengetahui seberapa cepat sistem dapat merespon perubahan suhu dan kelembapan terhadap setpoint berdasarkan nilai K_p , K_i , dan K_d yang telah ditentukan, serta kestabilan sistem dalam mengurangi error steady-state.

5. Monitoring Data pada Blynk

Untuk memastikan data sensor dapat dikirim dan ditampilkan pada aplikasi Blynk dengan baik, tanpa adanya keterlambatan yang signifikan, sehingga pengguna dapat memantau kondisi inkubator jamur secara real-time.

5.3 Prosedur dan Lingkungan Pengujian

Pengujian dilakukan pada lingkungan inkubator jamur tiram skala kecil yang dirancang menyerupai kondisi sebenarnya dengan pengaruh suhu dan kelembapan alami di sekitar ruangan. Sistem menggunakan ESP32 yang memiliki modul WiFi bawaan, sehingga pengujian dapat dilakukan dengan dukungan jaringan internet untuk menampilkan data secara real-time melalui aplikasi Blynk. Walaupun begitu, sistem tetap dapat berjalan secara mandiri tanpa koneksi internet, karena fungsi utama pengendalian suhu dan kelembapan berbasis PID tetap bekerja secara lokal pada ESP32.

Adapun pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem mulai dari proses aktivasi alat, penerimaan data sensor, pengendalian aktuator (exhaust fan, peltier dan pompa air dengan nozzle kabut), hingga pemantauan respon suhu dan kelembapan baik secara langsung melalui alat maupun aplikasi Blynk.

Adapun langkah-langkah pengujian disusun dengan mengacu pada alur penggunaan sistem secara langsung, dari proses aktivasi alat, hingga pemantauan hasil akhir tuning PID. Berikut adalah langkah-langkah pengujian dilakukan sebagai berikut:

1. Pastikan seluruh perangkat keras telah terpasang sesuai rancangan wiring, meliputi ESP32, sensor DHT22, exhaust fan, pompa air 12V, adaptor AC to DC, serta nozzle kabut.
2. Menyalakan sistem dengan menghubungkan adaptor AC to DC ke sumber listrik. Indikasi ESP32 aktif dapat terlihat dari LED internal yang menyala.
3. Sistem secara otomatis akan melakukan inisialisasi sensor, kemudian menampilkan pembacaan awal suhu dan kelembapan. Pada saat yang sama, data juga mulai terkirim ke aplikasi Blynk.
4. Masukkan nilai setpoint suhu dan kelembapan yang diinginkan melalui aplikasi blynk (setpoint awal: 24 °C untuk suhu dan 80% RH untuk kelembapan).
5. Sistem PID akan mengendalikan aktuator:
 - a. Jika suhu lebih tinggi dari setpoint, exhaust fan dan peltier aktif hingga suhu turun mendekati nilai yang ditentukan.
 - b. Jika kelembapan lebih rendah dari setpoint, pompa air + nozzle kabut aktif untuk menambah kelembapan di dalam inkubator dan mati ketika pompa sudah mencapai setpoint.
6. Lakukan pemantauan hasil melalui aplikasi Blynk yang menampilkan parameter suhu, kelembapan, dan status aktuator secara real-time.
7. Amati respon sistem terhadap perubahan lingkungan dengan beberapa kali mengubah setpoint suhu dan kelembapan. Perhatikan apakah sistem mampu mencapai kondisi stabil sesuai nilai setpoint.
8. Catat hasil pengujian berupa selisih pembacaan sensor dengan alat ukur pembanding (thermo-hygrometer), waktu respon sistem, serta kestabilan suhu dan kelembapan yang dicapai.
9. Setelah selesai, matikan sistem dengan melepas sumber daya listrik dari adaptor.

5.4 Pengujian Alat

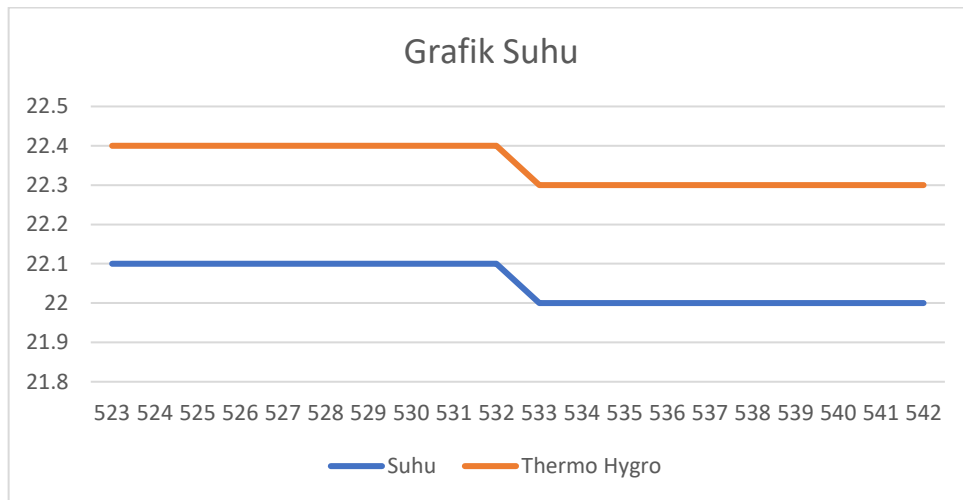
5.4.1 Pengujian Sensor DHT22

5.4.1.1 Suhu

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi tingkat akurasi pembacaan suhu dari sensor DHT22 yang digunakan dalam sistem. Data pembandingan diambil dari alat Thermo-Hygrometer sebagai referensi. Pengukuran dilakukan sebanyak 16 kali dalam rentang waktu tertentu, dan setiap data dicatat dalam satuan derajat Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Dari hasil tersebut diperoleh selisih nilai antara sensor DHT22 dan Thermo-Hygrometer untuk kemudian dihitung error relatif (E_r) dari setiap pengukuran.

Tabel 5. 1 Hasil Pengujian Perbandingan Data Suhu

Time	DHT22	Thermo Hygro	Ea= Selisih	Er
523	22.1	22.4	0.3	1.34
524	22.1	22.4	0.3	1.34
525	22.1	22.4	0.3	1.34
526	22.1	22.4	0.3	1.34
527	22.1	22.4	0.3	1.34
528	22.1	22.4	0.3	1.34
529	22.1	22.4	0.3	1.34
530	22.1	22.4	0.3	1.34
531	22.1	22.4	0.3	1.34
532	22.1	22.4	0.3	1.34
533	22	22.3	0.3	1.35
534	22	22.3	0.3	1.35
535	22	22.3	0.3	1.35
536	22	22.3	0.3	1.35
537	22	22.3	0.3	1.35
538	22	22.3	0.3	1.35
539	22	22.3	0.3	1.35
540	22	22.3	0.3	1.35
541	22	22.3	0.3	1.35
542	22	22.3	0.3	1.35
Rata Rata				1.34



Gambar 5. 1 Grafik Perbandingan Suhu

Berdasarkan hasil pengujian sensor DHT22 setelah dilakukan perbandingan dengan alat Thermo-Hygrometer. Mengenai hal perhitungan presentase *error* dari Tabel 5-1 mendapatkan perhitungan sebagaimana berikut:

Dengan hasil seperti Tabel 5-1, Adapun rumus yang digunakan untuk menghitung galat dapat dilihat pada Rumus (2.1).

Deketahui bahwa:

$$X_i = 22,1$$

$$X_p = 22,4$$

$$E_a = |22,1 - 22,4| = 0,3$$

$$E_r = \frac{0,3}{22,4} \times 100 = 1,34$$

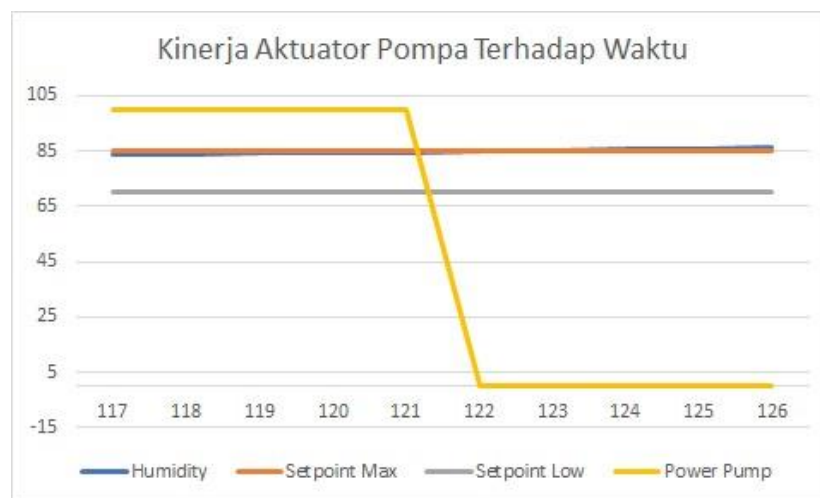
Berdasarkan data pengujian, nilai rata-rata *error* relatif (E_r) dari sensor DHT22 terhadap Thermo-Hygrometer adalah sebesar 1,34, yang masih dalam kategori tingkat kesalahan rendah dan dapat diterima untuk kebutuhan sistem kontrol dan monitoring suhu serta kelembapan pada inkubator jamur.

5.4.1.2 Kelembapan Udara

Pengujian kelembapan udara bertujuan untuk memastikan bahwa sistem pengendalian yang dirancang mampu menjaga kondisi lingkungan inkubator jamur sesuai dengan setpoint yang telah ditentukan. Parameter kelembapan udara memiliki peranan penting dalam proses pertumbuhan jamur tiram, khususnya pada fase fruktifikasi, di mana kebutuhan kelembapan harus dijaga pada kisaran optimal agar pertumbuhan tubuh buah tidak terganggu. Pada pengujian ini, sensor DHT22 digunakan sebagai perangkat utama untuk mendeteksi kelembapan udara secara real-time. Proses pengendalian dilakukan dengan menerapkan logika kontrol dua posisi (histeresis), yaitu pompa pengabutan akan menyala ketika nilai kelembapan turun di bawah batas minimum setpoint, dan akan mati kembali apabila kelembapan telah mencapai atau melebihi batas maksimum setpoint. Dengan cara ini, sistem mampu menjaga kestabilan kelembapan udara sekaligus mengurangi frekuensi switching pada pompa agar kinerja alat lebih efisien dan tahan lama.

Tabel 5. 2 Hasil Pengujian Data Kelembapan Udara

Time	Humidity	Setpoint Max	Setpoint Low	Power Pump
117	83,9	85	70	100
118	83,9	85	70	100
119	84,5	85	70	100
120	84,5	85	70	100
121	84,3	85	70	100
122	85,2	85	70	0
123	85,2	85	70	0
124	85,5	85	70	0
125	85,8	85	70	0
126	86,3	85	70	0



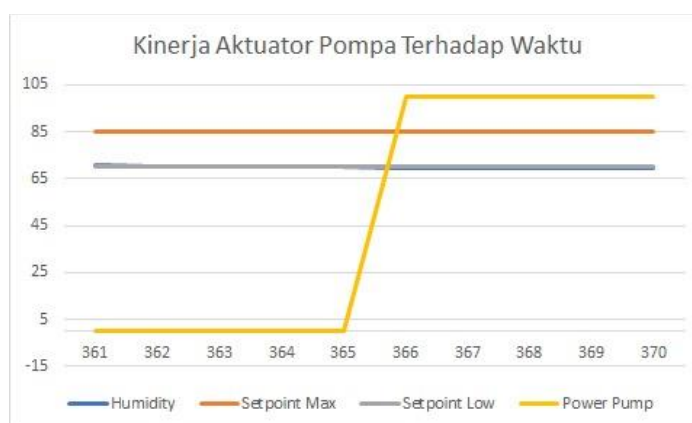
Gambar 5. 2 Grafik Kinerja Aktuator

Berdasarkan hasil pengujian, sistem kontrol 2 posisi dengan setpoint batas bawah 70% dan batas atas 85% menunjukkan kinerja yang sesuai dengan logika yang dirancang. Pada awal pengujian, kelembapan udara berada di bawah batas atas sehingga pompa pengabutan menyala dengan daya 100%. Kondisi ini membuat kelembapan perlahan meningkat dari 83,9% hingga 84,3%. Ketika nilai kelembapan mencapai 85,2%, yaitu berada pada atau melebihi setpoint atas, pompa secara otomatis berhenti bekerja. Setelah pompa berhenti, kelembapan tetap mengalami kenaikan alami hingga mencapai 86,3%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu merespons perubahan kondisi dengan baik, menyalakan pompa ketika kelembapan berada di bawah setpoint atas, dan mematikannya ketika kelembapan telah mencapai nilai yang ditentukan. Pola ini menegaskan bahwa logika kontrol 2 posisi berjalan dengan stabil tanpa adanya switching yang berlebihan, sehingga kelembapan dapat dipertahankan dalam rentang yang sesuai dengan kebutuhan pertumbuhan jamur.

Tabel 5. 3 Hasil Pengujian Data Kelembapan Udara

Time	Humidity	Setpoint Max	Setpoint Low	Power Pump
361	70,8	85	70	0
362	70,4	85	70	0
363	70,4	85	70	0
364	70	85	70	0

Time	Humidity	Setpoint Max	Setpoint Low	Power Pump
365	70	85	70	0
366	69,9	85	70	100
367	69,8	85	70	100
368	69,8	85	70	100
369	69,7	85	70	100
370	69,7	85	70	100



Gambar 5. 3 Grafik Kinerja Aktuator

Berdasarkan hasil pengujian kedua yang ditampilkan pada tabel dan grafik, dapat diamati bahwa nilai kelembapan udara awal berada pada kisaran 70,8% dan terus mengalami penurunan hingga mencapai 69,7%. Selama kelembapan berada di atas atau sama dengan nilai setpoint minimum yaitu 70%, pompa tetap dalam kondisi tidak aktif (0%). Namun, ketika kelembapan turun melewati batas setpoint minimum pada menit ke-366, sistem kontrol dua posisi secara otomatis mengaktifkan pompa dengan daya penuh (100%) untuk menyalakan nozzle spray kabut. Aktivasi pompa ini bertujuan menambah kelembapan di dalam inkubator agar tetap berada dalam rentang yang sesuai untuk kebutuhan pertumbuhan jamur. Dari data dan grafik terlihat bahwa logika kontrol dua posisi bekerja dengan baik, yaitu pompa hanya aktif ketika kelembapan jatuh di bawah batas yang ditentukan, sehingga dapat menjaga kestabilan kelembapan inkubator tanpa bekerja secara berlebihan. Hal ini membuktikan bahwa sistem mampu memberikan respons cepat terhadap kondisi penurunan kelembapan yang terjadi.

5.4.2 Pengujian Kinerja Aktuator

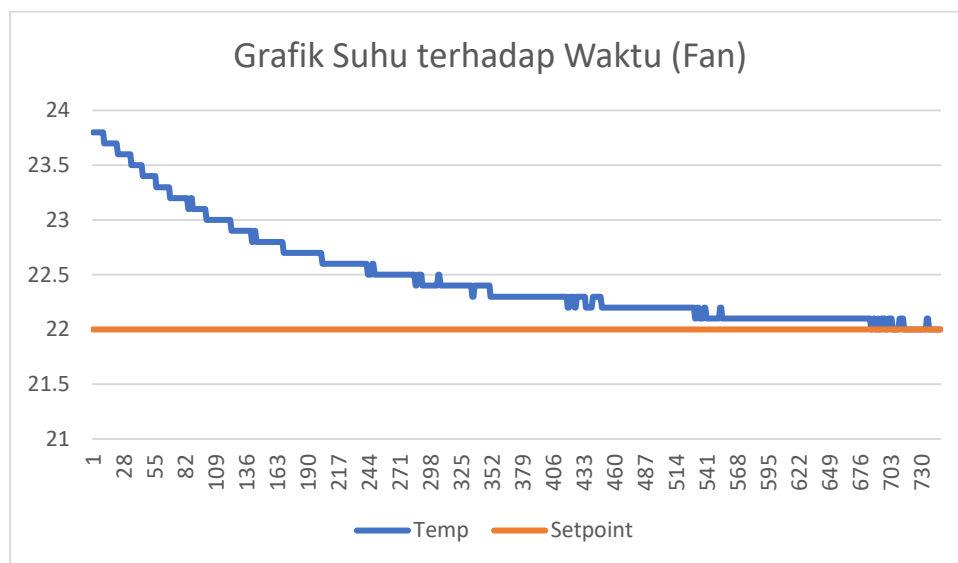
Pengujian kinerja aktuator dilakukan untuk memastikan bahwa perangkat eksekusi dalam sistem, yaitu Fan, Peltier, dan Pompa, dapat bekerja sesuai dengan instruksi yang diberikan oleh mikrokontroler ESP32 berdasarkan hasil pembacaan sensor. Aktuator ini memiliki peran utama dalam menjaga kestabilan suhu dan kelembapan pada ruang inkubasi jamur agar sesuai dengan nilai setpoint.

5.4.3.1 Fan

Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa Fan dapat bekerja sesuai fungsi utamanya yaitu sebagai penurun suhu ketika kondisi inkubator melebihi nilai setpoint. Fan dikendalikan langsung oleh mikrokontroler ESP32 berdasarkan data sensor suhu DHT22.

Tabel 5. 4 Hasil Pengujian Fan Terhadap Waktu

Time	Suhu	Setpoint	Output
684	22.1	22	255.00
685	22.1	22	255.00
686	22	22	0.00
687	22	22	0.00
688	22.1	22	255.00
689	22.1	22	255.00
690	22	22	0.00
691	22	22	0.00
692	22.1	22	255.00
693	22	22	0.00
Tanpa Peltier			



Gambar 5. 4 Grafik Fan Terhadap Waktu

Hasil pengujian kecepatan respon sistem dalam mengaktifkan Fan ketika suhu melebihi setpoint sangat responsif. Melalui pengujian ini dapat dipastikan bahwa Fan bekerja dengan baik, serta sistem mampu menjaga suhu inkubator agar tetap stabil sesuai kebutuhan pertumbuhan jamur.

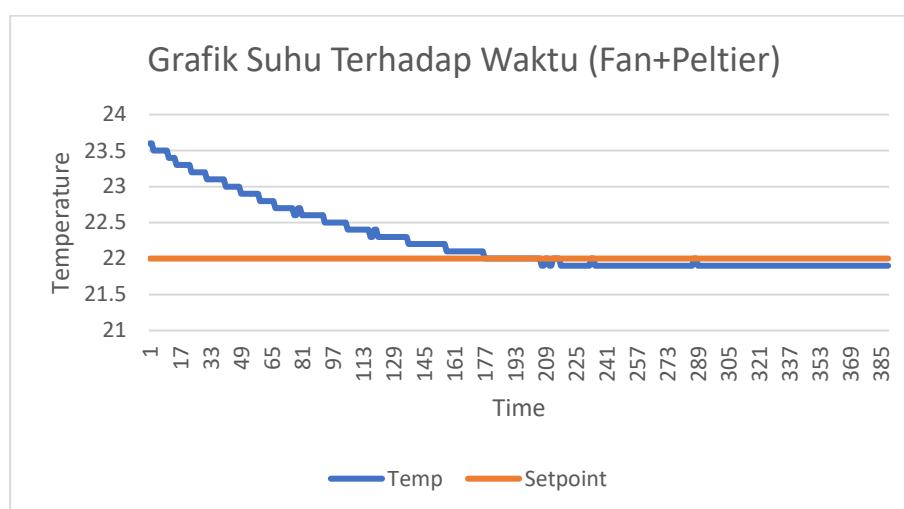
5.4.3.2 Peltier

Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa modul Peltier dapat berfungsi sebagai aktuator pendingin utama ketika suhu inkubator melebihi nilai setpoint yang telah ditentukan. Peltier dikendalikan langsung oleh mikrokontroler ESP32 berdasarkan data sensor suhu DHT22.

Tabel 5. 5 Hasil Pengujian Peltier dan Kipas Terhadap Waktu

Time	Suhu	Setpoint	Output
172	22.1	22	255
173	22.1	22	255
174	22.1	22	255
175	22.1	22	255

Time	Suhu	Setpoint	Output
176	22.1	22	255
177	22	22	0
178	22	22	0
179	22	22	0
180	22	22	0
181	22	22	0
Dengan Peltier			



Gambar 5. 5 Grafik Suhu Terhadap Waktu Menggunakan Fan dan Peltier

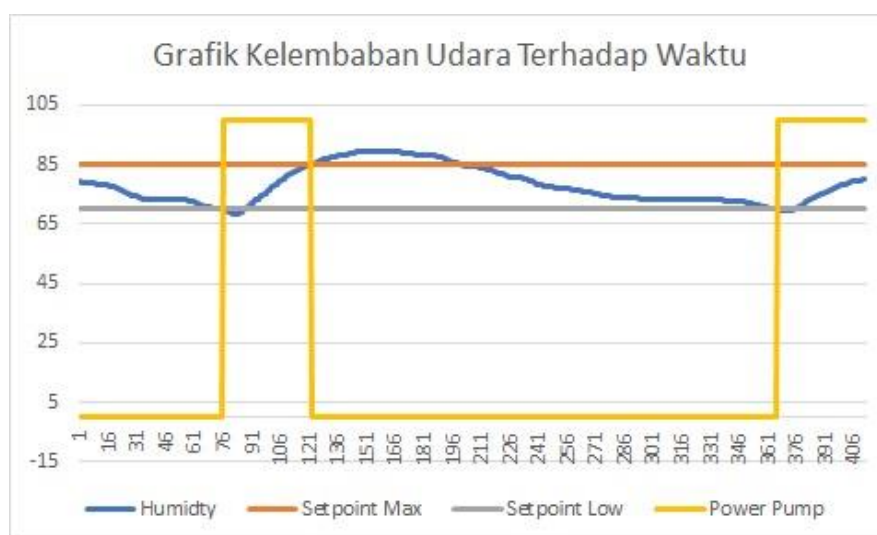
Hasil pengujian kecepatan respon sistem dalam mengaktifkan Peltier ketika suhu melebihi setpoint sangat responsif. Melalui pengujian ini dapat dipastikan bahwa Peltier bekerja dengan baik, serta sistem mampu menjaga suhu inkubator agar tetap stabil sesuai kebutuhan pertumbuhan jamur.

5.4.3.3 Pompa

Pengujian pompa dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem dalam mengendalikan kelembapan udara pada inkubator jamur menggunakan logika kontrol dua posisi. Sensor DHT22 digunakan sebagai input utama untuk membaca

nilai kelembapan secara real-time, sementara aktuator berupa pompa 12V DC dengan nozzle kabut berfungsi menambah kelembapan di dalam ruang inkubasi.

Logika kontrol yang digunakan adalah sistem dua posisi dengan mekanisme histeresis. Pompa akan menyala apabila kelembapan udara turun di bawah batas minimum setpoint (humidSetpointMin), dan akan mati secara otomatis ketika kelembapan telah mencapai atau melebihi batas maksimum setpoint (humidSetpointMax). Dengan demikian, sistem tidak hanya menjaga kelembapan tetap berada dalam rentang optimal, tetapi juga mencegah switching yang terlalu sering pada pompa, sehingga umur perangkat menjadi lebih panjang dan penggunaan energi lebih efisien.



Gambar 5. 6 Grafik Kelembapan Udara Terhadap Waktu

Berdasarkan grafik hasil pengujian, terlihat bahwa ketika nilai kelembapan turun hingga berada di bawah batas minimum setpoint, pompa secara otomatis aktif dengan daya penuh (100%). Aktivasi ini membuat kelembapan meningkat secara bertahap hingga mencapai atau melebihi setpoint maksimum, kemudian pompa otomatis mati. Setelah pompa berhenti, kelembapan cenderung mengalami penurunan secara perlahan seiring waktu. Pola ini kembali berulang saat kelembapan turun ke bawah setpoint minimum, yang ditandai dengan pompa kembali aktif.

Dari pola tersebut dapat disimpulkan bahwa sistem kontrol dua posisi pada pompa telah bekerja dengan baik. Pompa hanya aktif ketika diperlukan, sehingga kelembapan tetap berada pada rentang yang diinginkan tanpa menimbulkan switching berlebihan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga stabilitas lingkungan inkubator secara otomatis, efisien, dan sesuai dengan kebutuhan pertumbuhan jamur tiram.

5.4.3 Pengujian Parameter Waktu Respon PID

Pengujian ini dilakukan untuk membandingkan performa sistem kontrol suhu berbasis PID dengan menggunakan Peltier dan tanpa Peltier. Parameter yang diuji meliputi Fall Time (Waktu Turun), Undershoot, Settling Time (Waktu Mapan), dan Steady-State Error (Error Akhir).

Tabel 5. 6 Hasil Pengujian Data Parameter Tanpa Peltier

Parameter	Nilai Hasil Analisis
Fall Time (Waktu Turun)	~502 detik
Undershoot (%)	0 % (Tidak pernah mencapai Setpoint)
Settling Time (Waktu Mapan)	Tidak Tercapai
Steady-State Error	+0.1°C (Error sisa, tidak pernah stabil)

Tanpa Peltier, sistem tidak mampu mencapai target suhu (setpoint). Waktu turun sangat lambat (~502 detik), tidak terdapat undershoot, namun hal ini bukan kelebihan melainkan karena sistem gagal menyentuh setpoint. Selain itu, settling time tidak pernah tercapai sehingga sistem tidak stabil. Error akhir positif (+0.1°C) menunjukkan adanya deviasi yang tidak terkoreksi.

Tabel 5. 7 Hasil Pengujian Parameter Menggunakan Peltier

Parameter	Nilai Hasil Analisis
Fall Time (Waktu Turun)	~38 detik

Parameter	Nilai Hasil Analisis
Undershoot (%)	0.91 % (Suhu terendah ~21.8°C)
Settling Time (Waktu Mapan)	~53 detik
Steady-State Error	-0.1°C (Stabil di ~21.9°C)

Dengan Peltier, sistem menunjukkan kinerja yang jauh lebih baik. Waktu turun menjadi sangat cepat (~38 detik), terdapat undershoot kecil sebesar 0.91% namun masih dalam batas toleransi. Sistem mampu mencapai setpoint dengan settling time ~53 detik. Steady-state error sangat kecil (-0.1°C) sehingga sistem dianggap stabil dan akurat dalam menjaga suhu.

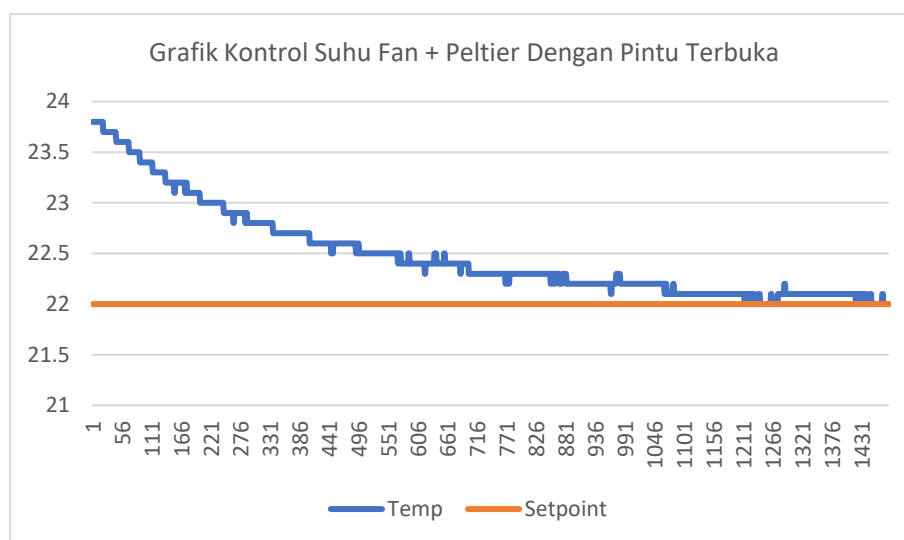
Tabel 5. 8 Tabel Perbandingan Menggunakan dan Tanpa Peltier

Parameter Respon PID	Dengan Peltier	Tanpa Peltier	Kesimpulan
Waktu Respon (Fall Time)	~38 detik	~502 detik	Jauh Lebih Cepat
Kemampuan Mencapai Target	Berhasil	Gagal	Jauh Lebih Efektif
Waktu Stabil (Settling Time)	~53 detik	Tidak Tercapai	Jauh Lebih Stabil
Error Akhir	-0.1°C	+0.1°C	Mampu Mengatasi Beban

Penggunaan Peltier yang dikontrol dengan PID memberikan peningkatan signifikan terhadap performa sistem. Sistem mampu merespon dengan cepat, mencapai target suhu dengan akurat, serta menjaga kestabilan suhu dengan error yang sangat kecil. Sementara itu, tanpa Peltier sistem gagal mencapai setpoint, tidak stabil, dan memiliki respon yang sangat lambat.

5.4.4 Pengujian Inkubator Dengan Gangguan

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam menjaga kestabilan suhu inkubator ketika terjadi gangguan berupa pintu inkubator yang dibiarkan terbuka. Kondisi ini mensimulasikan adanya kebocoran panas dari dalam ruang inkubasi ke lingkungan luar, sehingga sistem kendali harus bekerja lebih keras untuk mempertahankan suhu sesuai setpoint yang telah ditentukan.



Gambar 5. 7 Grafik Kontrol Suhu Fan + Peltier Dengan Gangguan

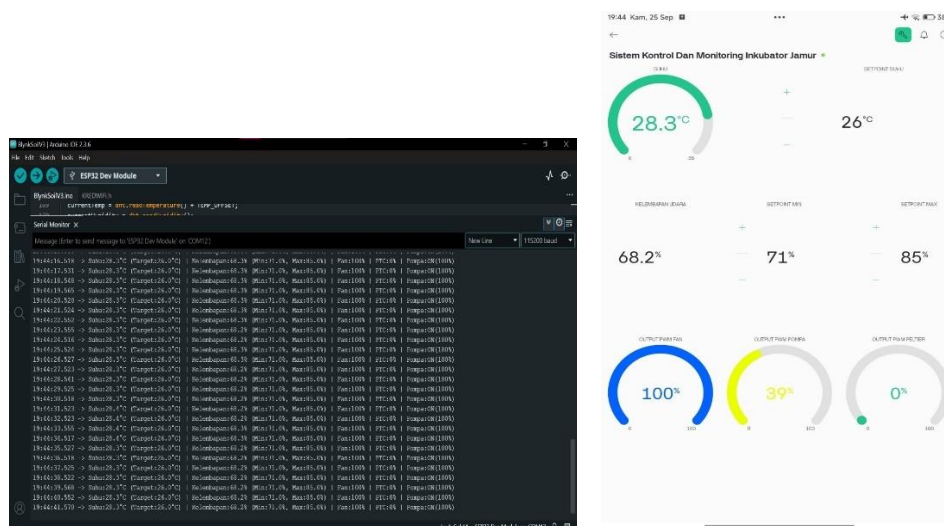
Berdasarkan grafik hasil pengujian, terlihat bahwa suhu awal inkubator berada pada kisaran 23,9 °C, sedangkan setpoint suhu ditetapkan pada 22 °C. Setelah pintu inkubator dibuka, suhu cenderung menurun secara bertahap seiring dengan kinerja gabungan antara exhaust fan dan peltier cooler yang diaktifkan oleh sistem kendali. Proses penurunan suhu berlangsung secara terkontrol, hingga akhirnya suhu dapat stabil mendekati nilai setpoint 22 °C pada kisaran waktu 1000–1100 detik atau sekitar 16–18 menit sejak awal pengujian.

Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa sistem kontrol mampu memberikan respons yang baik terhadap gangguan eksternal. Meskipun terdapat fluktuasi kecil pada saat mendekati setpoint, secara umum suhu dapat dipertahankan pada kisaran yang diinginkan. Hal ini membuktikan bahwa kombinasi fan dan peltier yang

dikendalikan oleh ESP32 dengan algoritma PID dapat menjaga kestabilan suhu inkubator, bahkan pada kondisi lingkungan yang tidak ideal.

5.4.5 Pengujian Monitoring Data pada Blynk

Pengujian monitoring data pada aplikasi Blynk dilakukan untuk memastikan bahwa data yang dikirimkan oleh sensor dapat ditampilkan secara real-time pada platform monitoring berbasis IoT. Parameter yang diuji meliputi data suhu, kelembapan udara yang dikirim melalui modul ESP32. Pada saat pengujian, seluruh sensor dihubungkan dengan sistem dan hasil pengukuran dibandingkan antara nilai pada serial monitor di program Arduino IDE dengan data yang muncul di dashboard Blynk.



Gambar 5. 8 Hasil Pengujian Melalui Serial Monitor Pada Arduino IDE

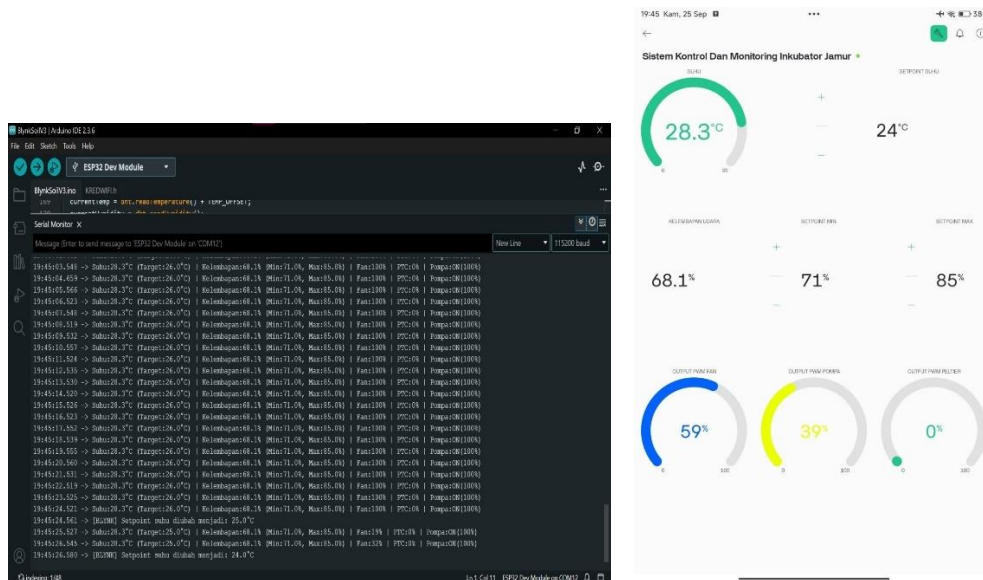
Tahap awal dilakukan dengan mengamati hasil keluaran data sensor yang ditampilkan pada Serial Monitor Arduino IDE. Data yang ditampilkan meliputi suhu, kelembapan udara, serta status aktuator (fan, pompa, dan peltier). Tampilan hasil pengujian pada Serial Monitor ditunjukkan pada Gambar 5. 8 Hasil Pengujian Melalui Serial Monitor Pada Arduino IDE.

Dari hasil pengujian, Serial Monitor menampilkan:

- Suhu: 28,3 °C

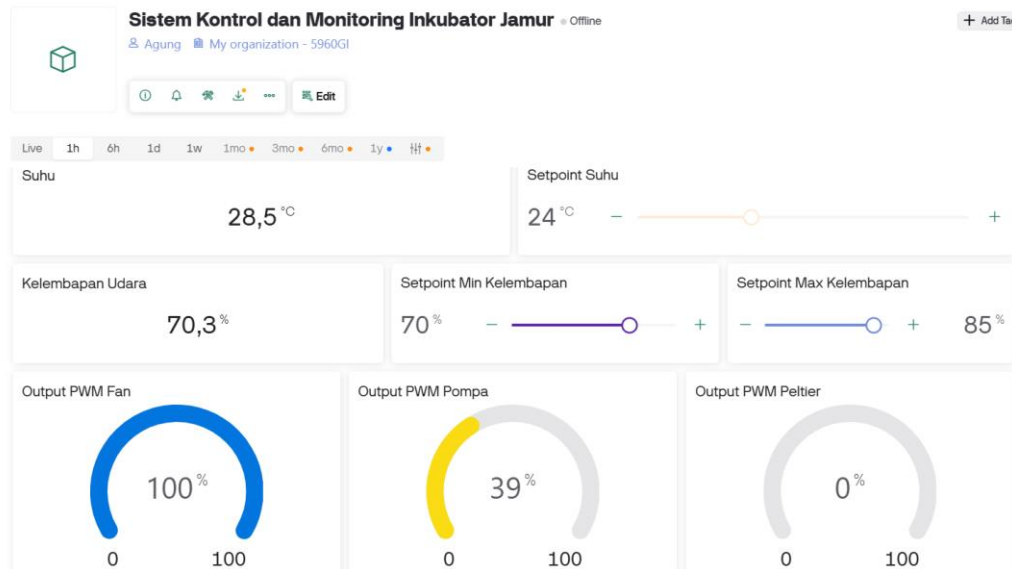
- Kelembapan udara: 68,2 %RH
- Status aktuator: Fan = aktif, Pompa = aktif, Peltier = nonaktif

Data ini menunjukkan bahwa pembacaan sensor bekerja dengan baik dan dapat dikirimkan oleh ESP32.



Gambar 5. 9 Tampilan Perubahan Setpoint Pada Serial Monitor

Berdasarkan hasil pengujian pada Serial Monitor, sistem menunjukkan adanya perubahan setpoint sesuai dengan keinginan pengguna dengan notifikasi [Blynk] Setpoint Suhu diubah menjadi: 24.0°C.



Gambar 5. 10 Hasil Pengujian Melalui Blynk

Pengujian monitoring data pada aplikasi Blynk dilakukan untuk memastikan bahwa setiap data hasil pembacaan sensor dan status aktuator dapat ditampilkan secara real-time pada dashboard. Tampilan monitoring pada Blynk dapat dilihat pada Gambar 5. 10. Pada pengujian ini, beberapa parameter utama berhasil ditampilkan dengan baik. Data suhu yang dibaca dari sensor DHT22 ditampilkan dalam bentuk label dengan hasil 28,5 °C, sesuai dengan pembacaan langsung dari sensor dan serial monitor sehingga membuktikan bahwa pengiriman data dari ESP32 ke Blynk berjalan normal, kemudian terdapat setpoint suhu yang ditampilkan dalam bentuk slider yang memudahkan pengguna mengatur setpoint melalui aplikasi blynk. Kelembapan udara juga ditampilkan dalam bentuk label dengan nilai 70,3% RH serta setpoint min dan setpoint max juga ditampilkan dalam bentuk slider.

Selain parameter sensor, status aktuator juga ditampilkan pada dashboard. Pompa ditunjukkan dalam kondisi aktif melalui indikator yang menyala, kipas ditampilkan dalam bentuk persentase kerja dengan hasil pengujian sebesar 100% yang berasal dari nilai PWM ESP32, dan modul peltier ditampilkan dengan persentase 0% yang menunjukkan kondisi tidak aktif.

5.5 Analisis Sistem

5.5.1 Analisis Sensor DHT22

Berdasarkan hasil pengujian sensor DHT22 terhadap alat ukur Thermo Hygrometer sebagai pembanding, diperoleh rata-rata error relatif sebesar 1,34%. Nilai ini masih berada dalam rentang toleransi yang dapat diterima, mengingat sensor DHT22 memiliki spesifikasi akurasi $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ menurut datasheet resminya. Dengan nilai selisih suhu rata-rata sekitar $0,3^{\circ}\text{C}$, sensor DHT22 dapat dikatakan cukup akurat dan layak digunakan dalam sistem. Selain itu, hasil pembacaan sensor menunjukkan kestabilan yang baik dan tidak terdapat fluktuasi ekstrem yang dapat mengganggu proses kendali, yang mengindikasikan bahwa DHT22 mampu memberikan pembacaan suhu secara konsisten dari waktu ke waktu. Kecepatan respon sensor terhadap perubahan suhu juga terbilang memadai untuk aplikasi monitoring lingkungan secara real-time, meskipun tidak secepat sensor industri.

5.5.2 Analisis Kinerja Aktuator

5.5.3.1 Fan

Berdasarkan hasil pengujian pada table 5. 4 dan Gambar 5. 4 dapat dilihat bahwa fan bekerja secara aktif untuk menjaga suhu tetap stabil pada nilai setpoint 22°C . Pada awal pengujian, suhu ruang berada di atas setpoint, yaitu sekitar $23,9^{\circ}\text{C}$, kemudian mengalami penurunan secara bertahap seiring dengan aktifnya fan. Nilai output fan sebesar 255 menunjukkan bahwa fan beroperasi pada kondisi maksimum untuk mempercepat penurunan suhu hingga mendekati setpoint.

Ketika suhu telah mencapai $22,1^{\circ}\text{C}$ hingga $22,0^{\circ}\text{C}$, output fan diturunkan menjadi 0, menandakan bahwa sistem kontrol berhenti mengaktifkan fan karena suhu sudah berada pada titik setpoint. Siklus kerja fan yang aktif dan nonaktif ini terus berulang sesuai dengan perubahan suhu yang terdeteksi oleh sensor. Grafik menunjukkan pola penurunan suhu yang konsisten hingga mencapai kestabilan di sekitar 22°C .

Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa aktuator fan berfungsi dengan baik dalam menjaga kestabilan suhu pada ruang inkubator jamur. Sistem mampu merespons kenaikan suhu dengan cepat melalui pengaktifan fan pada kecepatan

maksimum, dan mematikan fan ketika suhu sesuai setpoint. Pola ini membuktikan bahwa pengendalian suhu berbasis fan sudah berjalan efektif, meskipun masih terdapat fluktuasi kecil di sekitar setpoint yang wajar pada sistem kontrol berbasis PWM.

5.5.3.2 Peltier

Hasil pengujian aktuator Peltier menunjukkan bahwa sistem mampu merespons perubahan suhu secara cepat dan akurat. Berdasarkan data pada Tabel 5.5, ketika suhu terdeteksi berada sedikit di atas setpoint ($22,1\text{ }^{\circ}\text{C}$), sistem segera mengaktifkan Peltier dengan output PWM maksimum sebesar 255 untuk menurunkan suhu. Setelah beberapa waktu, suhu berhasil mencapai setpoint $22\text{ }^{\circ}\text{C}$, sehingga output langsung turun menjadi 0. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme kontrol bekerja dengan baik dalam menjaga suhu tetap stabil di sekitar nilai setpoint. Grafik pada Gambar 5.5 juga memperlihatkan penurunan suhu secara bertahap dari kondisi awal sekitar $23,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga stabil di titik setpoint $22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Respon cepat ini mengindikasikan bahwa Peltier mampu bekerja secara efektif bersama kipas dalam mengontrol suhu inkubator, sehingga lingkungan tumbuh jamur dapat dipertahankan sesuai kebutuhan. Dengan demikian, kinerja aktuator Peltier dapat dikatakan optimal karena mampu menjaga kestabilan suhu tanpa terjadi overshoot yang signifikan

5.5.3.3 Pompa

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar grafik 5. 6, Grafik menunjukkan pola perubahan kelembapan udara yang dikendalikan menggunakan pompa dengan logika kontrol dua posisi. Pada awal pengamatan, kelembapan berada di sekitar setpoint namun cenderung menurun hingga melewati batas bawah (setpoint minimum). Ketika kondisi ini terjadi, pompa langsung aktif dengan daya penuh (100%), yang ditunjukkan oleh garis kuning pada grafik. Akibatnya, kelembapan udara (garis biru) meningkat secara bertahap hingga melampaui setpoint maksimum. Pada titik tersebut, pompa otomatis dimatikan dan kelembapan tetap berada di kisaran atas untuk beberapa waktu.

Setelah pompa berhenti, kelembapan mulai menurun perlahan karena tidak ada tambahan uap air dari pompa. Penurunan ini terus berlangsung hingga kembali mendekati batas bawah setpoint. Siklus ini berulang, ditandai dengan pompa yang kembali menyala saat kelembapan berada di bawah ambang batas, kemudian menaikkan kembali nilai kelembapan ke atas setpoint maksimum sebelum akhirnya dimatikan.

Dari pola tersebut dapat disimpulkan bahwa sistem kontrol dua posisi dengan mekanisme histeresis bekerja dengan baik. Pompa hanya aktif ketika diperlukan dan langsung berhenti saat kondisi telah mencapai setpoint, sehingga kelembapan udara tetap berada dalam rentang yang sesuai dengan kebutuhan inkubator. Meskipun terdapat sedikit fluktuasi antara batas minimum dan maksimum, kestabilan kelembapan tetap terjaga secara otomatis, dan sistem dapat menghindari switching berlebihan pada pompa.