

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISIS

Setelah alat pengering cabai selesai dibuat, sistem kontrol suhu diuji untuk melihat kesesuaiannya dengan rancangan. Pengujian mencakup catu daya, pembacaan sensor DHT22, pengaturan heater melalui AC light dimmer, serta respons suhu pada beberapa setpoint. Hasil pengukuran kemudian dianalisis untuk menilai kemampuan pengendali Fuzzy Logic Sugeno dalam mencapai dan mempertahankan suhu yang ditentukan, sekaligus menjelaskan kendala yang ditemukan selama pengujian.

4.1 Realisasi Pembuatan Alat dan Sistem Kontrol Suhu

Perancangan alat pengering cabai telah direalisasikan menjadi satu unit *Chilli Dehydrator* dengan ruang pengering dan sistem kontrol suhu. Tampilan fisik alat setelah dirakit diperlihatkan pada Gambar 4.1.



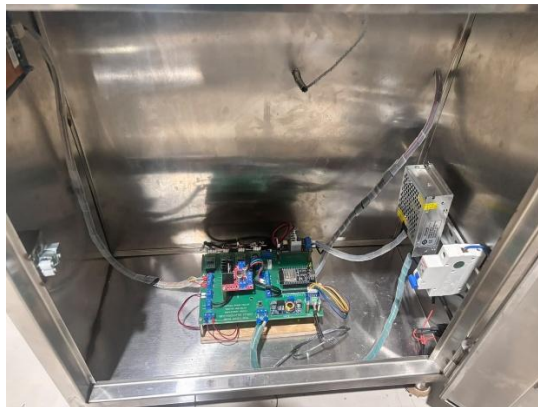
Gambar 4. 1 Hasil Pembuatan Alat *Chilli Dehydrator*

Pada bagian depan alat terdapat pintu, jendela pengamatan, dan HMI Nextion. Pintu digunakan untuk memasukkan serta mengeluarkan cabai, sedangkan jendela memudahkan pengamatan kondisi di dalam ruang pengering tanpa membuka pintu. Bagian dalam ruang pengering ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Ruang Pengering dan Penempatan Heater

Heater halogen dipasang di dalam ruang pengering sebagai sumber panas. Sensor DHT22 berada di sisi kanan ruang, sementara kipas dipasang di bagian atas. Dinding bagian dalam dilapisi bahan insulasi untuk mengurangi perpindahan panas ke lingkungan. Pembacaan suhu dari DHT22 menjadi umpan balik bagi pengendali Fuzzy Logic Sugeno. Berdasarkan pembacaan tersebut, ESP32 menentukan perintah ke modul AC light dimmer untuk mengatur heater.



Gambar 4. 3 Realisasi Pemasangan Rangkaian pada Kompartemen Elektrikal

Pada Gambar 4.3 terlihat papan rangkaian kontrol, power supply, MCB, dan kabel penghubung yang terpasang di kompartemen elektrikal. Papan rangkaian tersebut memuat ESP32 serta modul pendukung subsistem alat. Sesuai ruang lingkup penelitian, bagian yang dibahas meliputi catu daya kontrol, pembacaan suhu DHT22, proses kendali fuzzy, dan pengaturan heater melalui AC light dimmer. Setelah perakitan, bagian-bagian tersebut

diuji untuk mengetahui ketepatan pembacaan sensor dan respons pengendalian suhu.

4.2 Pengujian Catu Daya

Pengujian catu daya bertujuan memastikan tegangan yang disalurkan ke rangkaian kontrol sesuai dengan kebutuhan. Tegangan pada sisi masukan dan keluaran power supply maupun modul step-down XL4005 diukur memakai multimeter. Hasil pembacaan dibandingkan dengan nilai nominal atau target pengaturan untuk mengetahui selisih, persentase error, dan persentase kesesuaiannya.

4.2.1 Pengujian Power Supply

Power supply pada alat mengubah tegangan jaringan PLN menjadi keluaran nominal 12 VDC. Untuk memeriksa kerjanya, tegangan pada terminal masukan dan keluaran diukur menggunakan multimeter. Dokumentasi kedua pengukuran disajikan pada Gambar 4.4.



(a)

(b)

Gambar 4. 4 (a) Pengukuran Tegangan Input Power Supply, (b) Pengukuran Tegangan Output Power Supply

Tegangan masukan dievaluasi terhadap acuan 220 VAC, sedangkan tegangan keluaran dibandingkan dengan nilai nominal 12 VDC. Angka pembacaan dan hasil perbandingannya tercantum pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Hasil Pengujian Tegangan Power Supply

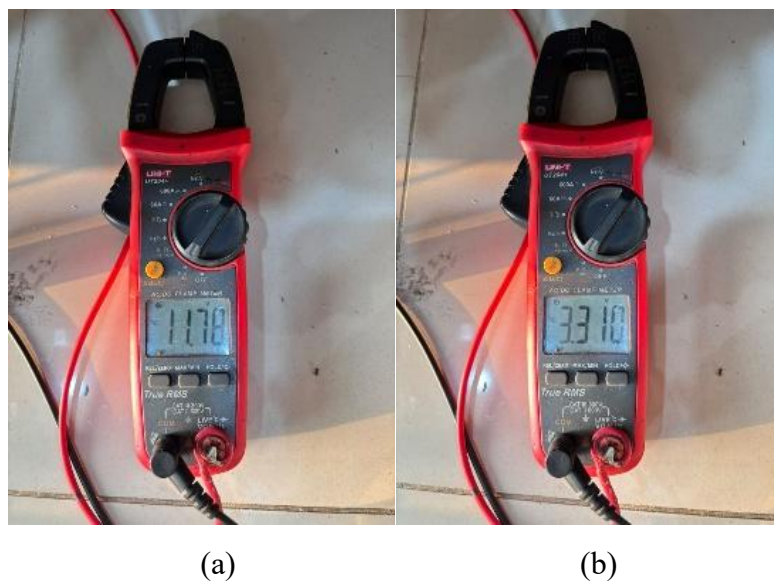
Keterangan	Spesifikasi	Tegangan Terukur	Error (V)	Error (%)	Akurasi (%)
------------	-------------	------------------	-----------	-----------	-------------

Tegangan Input	220VAC	233,0 VAC	13,00	5,91	94,09
Tegangan Output	12VDC	11,79 VDC	0,21	1,75	98,25

Tegangan masukan terukur 233,0 VAC, atau 13,00 V (5,91%) lebih tinggi dari acuan 220 VAC. Di sisi keluaran, power supply menghasilkan 11,79 VDC, yaitu 0,21 V di bawah nilai nominal 12 VDC. Selisih keluaran tersebut setara dengan error 1,75% dan persentase kesesuaian 98,25%. Dengan demikian, tegangan keluaran power supply mendekati nilai nominal pada kondisi pengukuran ini.

4.2.2 Pengujian Stepdown XL4005

Modul step-down XL4005 menerima tegangan dari power supply dan menurunkannya untuk rangkaian kontrol. Potensiometer pada modul diatur hingga tegangan keluarannya mendekati target 3,3 VDC. Pengukuran pada sisi masukan dan keluaran ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4. 5 (a) Pengukuran Tegangan Input Stepdown XL4005, (b) Pengukuran Tegangan Output Input Stepdown XL4005

Tegangan pada kedua terminal diukur dengan multimeter. Selama pengambilan data, posisi potensiometer dipertahankan setelah keluaran disetel. Hasil pembacaan beserta perbandingannya terhadap nilai acuan disajikan pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Tegangan Step-Down XL4005

Keterangan	Spesifikasi	Tegangan Terukur	Error (V)	Error (%)	Akurasi (%)
------------	-------------	---------------------	--------------	--------------	----------------

Tegangan Input	12 VDC	11,78 VDC	0,22	1,83	98,17
Tegangan Output	3,3 VDC	3,310 VDC	0,010	0,30	99,70

Masukan modul terukur 11,78 VDC, yaitu 0,22 V di bawah acuan 12 VDC. Tegangan keluarannya sebesar 3,310 VDC, hanya berbeda 0,010 V dari target 3,3 VDC. Nilai tersebut menghasilkan error keluaran 0,30% dan persentase kesesuaian 99,70%. Pada saat pengujian, setelan keluaran XL4005 sudah mendekati target yang ditentukan.

4.3 Pengujian Pembacaan Sensor DHT22

Pembacaan suhu DHT22 diperiksa dengan membandingkannya terhadap thermogun. Saat pengujian, thermogun diarahkan ke area di dekat sensor di dalam ruang pengering. Nilai dari kedua alat dicatat pada waktu yang sama untuk beberapa kondisi suhu, kemudian selisihnya dihitung. Hasil pengukuran disajikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Sensor DHT22

No.	Suhu DHT22 (°C)	Suhu Thermogun (°C)	Error Absolut (°C)	Error (%)	Akurasi (%)
1.	26,8	29,6	2,8	9,46	90,54
2.	49,8	54,3	4,5	8,29	91,71
3.	59,9	63,1	3,2	5,07	94,93
4.	57,2	59,6	2,4	4,03	95,97
5.	58,3	54,9	3,4	6,19	93,81
6.	55,5	60,5	5,0	8,26	91,74
7.	54,5	61,1	6,6	10,80	89,20
8.	54,9	61,5	6,6	10,73	89,27
9.	55,6	64,9	9,3	14,33	85,67
No.	Suhu DHT22 (°C)	Suhu Thermogun (°C)	Error Absolut (°C)	Error (%)	Akurasi (%)
10.	55,9	72,0	16,1	22,36	77,64
Rata-Rata			5,99	9,95	90,05

Rata-rata selisih absolut antara kedua alat adalah 5,99 °C, setara dengan error 9,95% dan akurasi 90,05% berdasarkan perhitungan pada tabel. Selisih paling kecil terjadi pada pengukuran ke-4, yaitu 2,4 °C dengan akurasi 95,97%.

Selisih paling besar terjadi pada pengukuran ke-10, yaitu 16,1 °C dengan akurasi 77,64%. Dari sepuluh data, sembilan pembacaan DHT22 lebih rendah daripada thermogun. Hanya pada pengukuran ke-5 DHT22 menunjukkan suhu 3,4 °C lebih tinggi.

Pada empat pengukuran dengan suhu pembanding hingga 60 °C, rata-rata error sebesar 3,28 °C atau 6,99%, dengan akurasi 93,01%. Pada enam pengukuran di atas 60 °C, rata-rata error meningkat menjadi 7,80 °C atau 11,93%, sementara akurasinya turun menjadi 88,07%. Perbedaan paling jelas tampak pada pengukuran ke-6 sampai ke-10. Thermogun menunjukkan kenaikan dari 60,5 °C ke 72,0 °C, sedangkan angka DHT22 tetap berada antara 54,5 °C dan 55,9 °C. Pada rentang ini, pembacaan DHT22 tidak mengikuti kenaikan hasil pembanding dengan baik.

Pengendali Fuzzy Sugeno memakai pembacaan DHT22 sebagai umpan balik. Karena itu, suhu yang dinyatakan mencapai setpoint adalah suhu menurut sensor tersebut. Selisih terhadap thermogun yang membesar pada suhu tinggi perlu diperhatikan ketika menilai kinerja pengendali, karena suhu di ruang pengering dapat berbeda dari angka yang ditampilkan.

4.4 Pengujian Pengaturan Heater melalui AC Light Dimmer

Pengaturan AC light dimmer diuji dengan memberi perintah dari 10% hingga 100% pada interval 10%. Pada setiap tingkat pengaturan, tegangan, arus, dan daya heater dicatat untuk melihat hubungan antara nilai perintah dan keluaran listrik pemanas. Data pengukuran tersebut disajikan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Hasil Pengujian AC Light Dimmer

Dimmer (%)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
10	36,7	1,12	41,1
20	75	1,54	115,5
30	111,5	1,92	214,08
40	146,3	2,19	320,4
50	177,7	2,42	430,03
60	201,7	2,63	530,47

70	217,1	2,68	581,83
80	226,1	2,74	619,51
90	228,4	2,75	628,1
100	229,1	2,75	630,02

Dari Tabel 4.4 terlihat bahwa tegangan, arus, dan daya heater meningkat ketika perintah dimmer dinaikkan. Pada setelan 10%, terukur tegangan 36,7 V, arus 1,12 A, dan daya 41,1 W. Pada setelan 50%, ketiganya menjadi 177,7 V, 2,42 A, dan 430,03 W. Nilai tertinggi tercatat pada perintah 100%, dengan tegangan 229,1 V, arus 2,75 A, dan daya 630,02 W.

Kenaikan daya tidak sama pada setiap perubahan perintah sebesar 10 poin persentase. Ketika dimmer dinaikkan dari 10% ke 20%, daya bertambah 74,40 W. Kenaikan dari 40% ke 50% justru mencapai 109,63 W. Pada perintah 50%, daya heater sudah sebesar 430,03 W atau sekitar 68,26% dari daya pada setelan 100%. Jadi, persentase perintah dimmer tidak berbanding lurus dengan persentase daya heater.

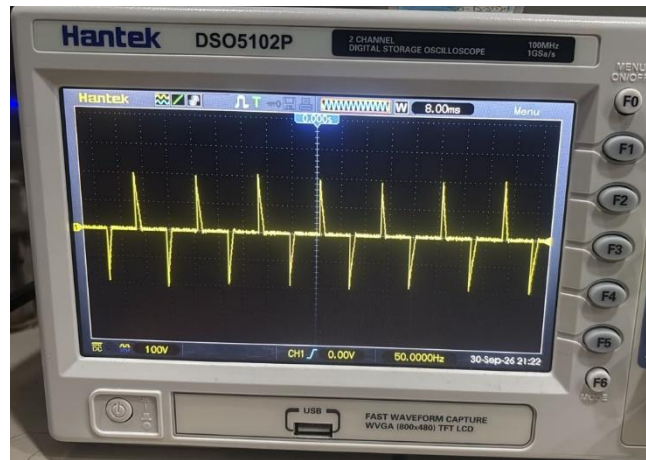
Perubahan keluaran semakin kecil di bagian atas rentang pengaturan. Daya pada setelan 80%, 90%, dan 100% berturut-turut sebesar 619,51 W, 628,10 W, dan 630,02 W. Dari 80% ke 100%, penambahannya hanya 10,51 W atau sekitar 1,70% dibandingkan daya pada setelan 80%. Pada rentang yang sama, tegangan naik dari 226,1 V menjadi 229,1 V, sedangkan arus berubah dari 2,74 A menjadi 2,75 A. Artinya, pada setelan 80% keluaran heater sudah mendekati nilai tertinggi yang tercatat dalam pengujian.

Hubungan perintah dan daya yang tidak linier perlu diperhatikan dalam pengendalian Fuzzy Logic Sugeno. Di dekat setelan maksimum, penambahan perintah hanya sedikit menaikkan daya heater. Namun, dimmer tetap dapat mengubah daya secara bertahap. Dampaknya terhadap pencapaian setpoint dan kestabilan suhu dibahas pada pengujian respons pengendali berikutnya.

4.4.1 Hasil Sinyal Output Pengaturan Heater

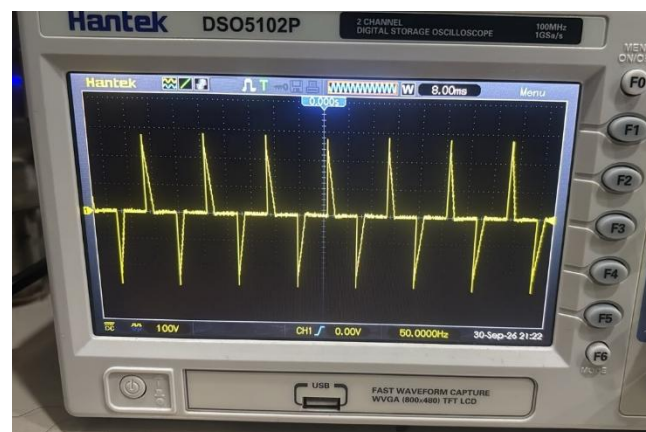
Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa perintah pengaturan daya dari ESP32 diterjemahkan dengan benar oleh modul AC light dimmer menjadi sinyal tegangan pada heater. AC light dimmer bekerja dengan metode phase-angle control. Modul mendeteksi titik zero-crossing tegangan jala-jala, lalu menyalakan

TRIAC setelah jeda waktu tertentu (firing angle) pada setiap setengah siklus. Sinyal pengaturan heater 10% ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Bentuk gelombang tegangan heater pada pengaturan 10%

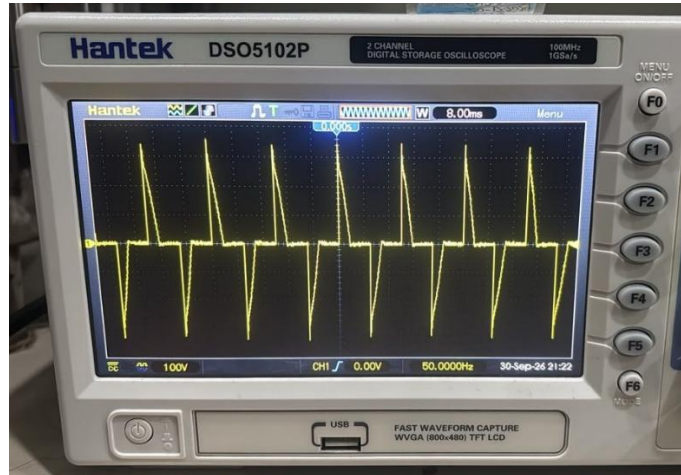
Gambar 4.6 menunjukkan bentuk gelombang tegangan pada heater saat pengaturan 10%. Gelombang yang terbentuk tidak berupa sinus utuh, melainkan pulsa sempit yang muncul bergantian positif dan negatif dengan frekuensi 50 Hz, sesuai frekuensi jala-jala. Pada setiap setengah siklus, tegangan bernilai nol hampir sepanjang siklus, kemudian naik tajam menjelang akhir setengah siklus dan turun kembali ke nol pada titik zero-crossing berikutnya. Pola ini menunjukkan bahwa TRIAC baru dinyalakan pada sudut penyalan (firing angle) yang besar, sehingga hanya sebagian kecil gelombang sinus yang diteruskan ke heater. Sinyal pengaturan heater 20% ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4. 7 Bentuk gelombang tegangan heater pada pengaturan 20%

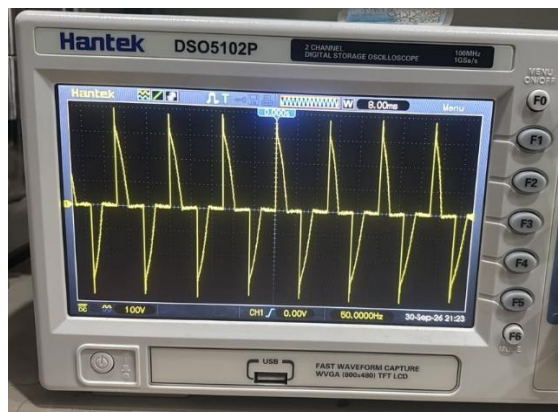
Gambar 4.7 menunjukkan bentuk gelombang tegangan pada heater saat pengaturan 20%. Pola gelombangnya masih sama dengan pengaturan 10%, yaitu

pulsa positif dan negatif yang muncul bergantian dengan frekuensi 50 Hz. Perbedaanannya, TRIAC dinyalakan lebih awal pada setiap setengah siklus sehingga bagian gelombang sinus yang diteruskan ke heater lebih lebar. Sinyal pengaturan heater 30% ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4. 8 Bentuk gelombang tegangan heater pada pengaturan 30%

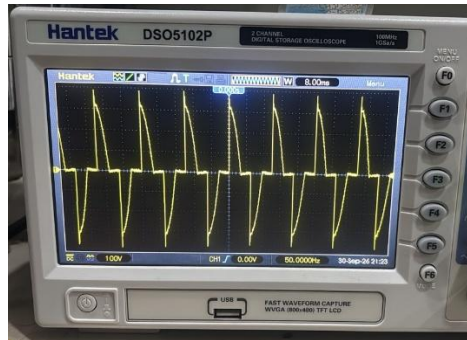
Gambar 4.8 menunjukkan bentuk gelombang tegangan pada heater saat pengaturan 30%. Seperti pada pengaturan sebelumnya, gelombang terdiri atas pulsa positif dan negatif yang muncul bergantian dengan frekuensi 50 Hz. Pada pengaturan ini, TRIAC dinyalakan lebih awal lagi sehingga bagian gelombang yang diteruskan ke heater semakin lebar. Sinyal pengaturan heater 40% ditunjukkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4. 9 Bentuk gelombang tegangan heater pada pengaturan 40%

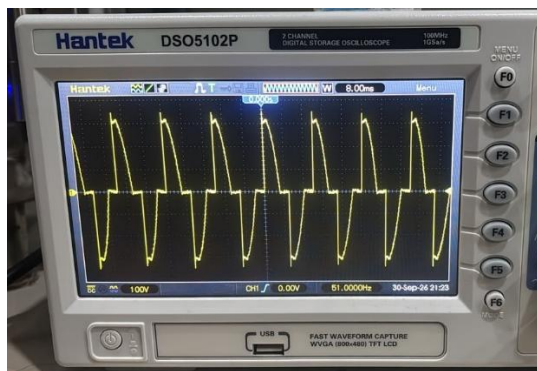
Gambar 4.9 menunjukkan bentuk gelombang tegangan pada heater saat pengaturan 40%. Gelombang masih berupa potongan sinus positif dan negatif yang bergantian dengan frekuensi 50 Hz. Dibandingkan dengan pengaturan 30%, bagian

gelombang yang diteruskan ke heater tampak lebih lebar dan sisi turunnya lebih landai, sedangkan bagian yang bernilai nol semakin pendek. Puncak tegangan relatif sama dengan pengaturan 30%, yaitu mendekati tegangan puncak jala-jala. Hal ini menunjukkan bahwa TRIAC sudah menyala di sekitar atau sebelum puncak gelombang sinus. Sinyal pengaturan heater 50% ditunjukkan pada Gambar 4.10.



Gambar 4. 10 Bentuk gelombang tegangan heater pada pengaturan 50%

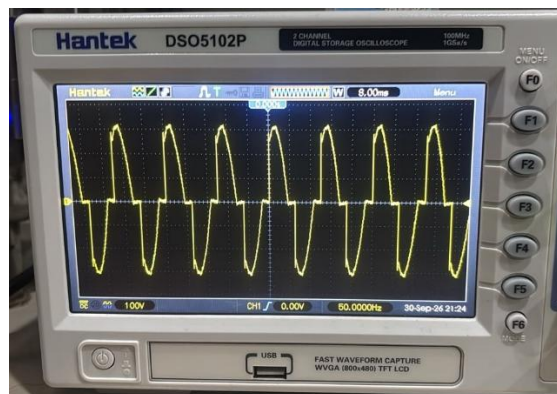
Gambar 4.10 menunjukkan bentuk gelombang tegangan pada heater saat pengaturan 50%. Bagian gelombang yang diteruskan ke heater semakin lebar dibandingkan pengaturan 40%, dan sisi turunnya kini tampak melengkung mengikuti bentuk sinus. Sebaliknya, bagian yang bernilai nol pada awal setiap setengah siklus semakin pendek. Puncak tegangan tetap mendekati tegangan puncak jala-jala, sama seperti pada pengaturan 30% dan 40%. Pola ini menunjukkan bahwa TRIAC dinyalakan lebih awal lagi pada setiap setengah siklus. Akibatnya, porsi gelombang sinus yang diteruskan ke heater bertambah, demikian pula daya yang diterimanya. Sinyal pengaturan heater 60% ditunjukkan pada Gambar 4.11.



Gambar 4. 11 Bentuk gelombang tegangan heater pada pengaturan 60%

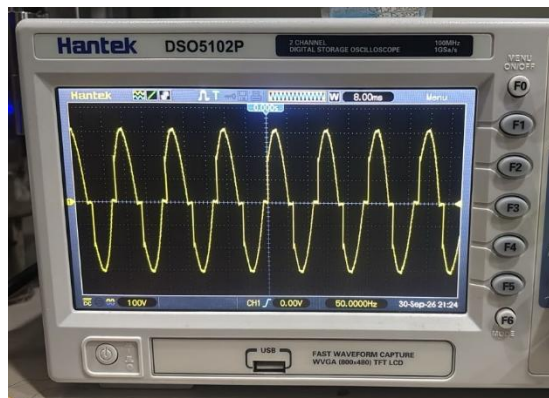
Gambar 4.11 menunjukkan bentuk gelombang tegangan pada heater saat pengaturan 60%. Bagian gelombang yang diteruskan ke heater semakin lebar, dan

bagian yang bernilai nol pada awal setiap setengah siklus semakin pendek. Berbeda dengan pengaturan sebelumnya, bagian atas gelombang kini tampak membulat seperti puncak sinus. Artinya, TRIAC sudah dinyalakan sebelum gelombang mencapai puncaknya, sehingga puncak sinus ikut diteruskan ke heater. Bentuk gelombang yang semakin mendekati sinus utuh ini menunjukkan bahwa daya yang diterima heater semakin besar. Sinyal pengaturan heater 70% ditunjukkan pada Gambar 4.12.



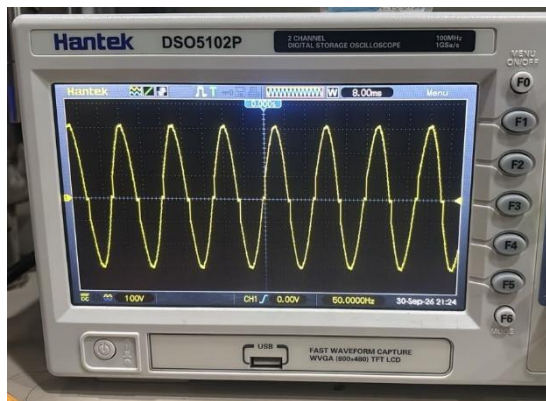
Gambar 4. 12 Bentuk gelombang tegangan heater pada pengaturan 70%

Gambar 4.12 menunjukkan bentuk gelombang tegangan pada heater saat pengaturan 70%. Gelombang sudah menyerupai sinus. Bagian yang terpotong hanya tersisa sebagai segmen datar yang pendek di sekitar titik zero-crossing pada awal setiap setengah siklus. TRIAC dinyalakan jauh sebelum gelombang mencapai puncak, sehingga sebagian besar gelombang sinus, termasuk bagian puncaknya, diteruskan ke heater. Dibandingkan dengan pengaturan 60%, porsi gelombang yang diteruskan bertambah lebar, sehingga daya yang diterima heater juga semakin besar. Sinyal pengaturan heater 80% ditunjukkan pada Gambar 4.13.



Gambar 4. 13 Bentuk gelombang tegangan heater pada pengaturan 80%

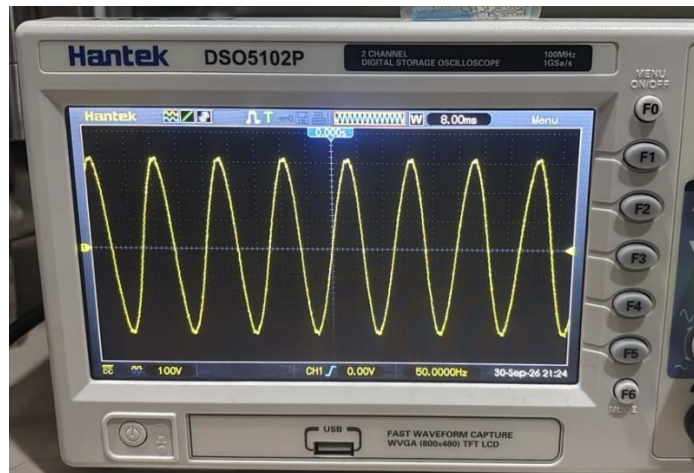
Gambar 4.13 menunjukkan bentuk gelombang tegangan pada heater saat pengaturan 80%. Gelombang sudah hampir berbentuk sinus utuh. Bagian yang terpotong hanya tersisa sebagai segmen datar yang sangat pendek di sekitar titik zero-crossing, disertai lonjakan kecil saat TRIAC mulai menyala. Segmen datar ini lebih pendek dibandingkan pengaturan 70%. Hal ini menunjukkan bahwa TRIAC dinyalakan sangat awal pada setiap setengah siklus, sehingga hampir seluruh gelombang sinus diteruskan ke heater dan daya yang diterimanya mendekati daya penuh. Sinyal pengaturan heater 90% ditunjukkan pada Gambar 4.14.



Gambar 4. 14 Bentuk gelombang tegangan heater pada pengaturan 90%

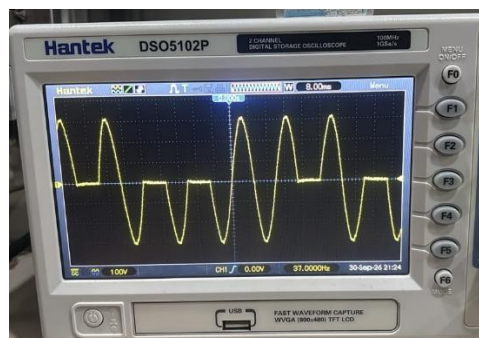
Gambar 4.14 menunjukkan bentuk gelombang tegangan pada heater saat pengaturan 90%. Gelombang sudah hampir berbentuk sinus utuh. Sisa potongan hanya tampak sebagai segmen datar yang sangat singkat di sekitar titik zero-crossing, dan segmen ini lebih pendek dibandingkan pengaturan 80%. Hal ini menunjukkan bahwa TRIAC dinyalakan sangat dekat dengan awal setiap setengah siklus, sehingga hampir seluruh gelombang tegangan jala-jala diteruskan ke heater

dan daya yang diterimanya mendekati daya penuh. Sinyal pengaturan heater 98% ditunjukkan pada Gambar 4.15.



Gambar 4. 15 Bentuk gelombang tegangan heater pada pengaturan 98%

Gambar 4.15 menunjukkan bentuk gelombang tegangan pada heater saat pengaturan 98%, yaitu nilai pengaturan maksimum pada sistem. Gelombang yang terbentuk sudah berupa sinus utuh tanpa potongan yang terlihat di sekitar titik zero-crossing. Artinya, TRIAC dinyalakan hampir tepat pada awal setiap setengah siklus, sehingga seluruh gelombang tegangan jala-jala diteruskan ke heater. Pada kondisi ini heater bekerja dengan daya yang praktis penuh. Rangkaian hasil pengujian dari pengaturan 10% sampai 98% menunjukkan bahwa makin besar nilai pengaturan, makin awal TRIAC dinyalakan dan makin besar porsi gelombang yang diteruskan ke heater. Hasil ini membuktikan bahwa AC light dimmer mampu mengatur daya heater sesuai perintah dari ESP32. Sinyal pengaturan heater 100% ditunjukkan pada Gambar 4.16.



Gambar 4. 16 Bentuk gelombang tegangan heater pada pengaturan 100%

Gambar 4.16 menunjukkan bentuk gelombang tegangan pada heater saat pengaturan 100%. Hasilnya berbeda dari pengaturan lainnya. Gelombang tidak lagi berupa sinus utuh. Beberapa setengah siklus hilang sepenuhnya dan tampak sebagai segmen datar bernilai nol, sedangkan setengah siklus lainnya tetap diteruskan secara penuh. Pola ini juga tidak beraturan, sehingga osiloskop membaca frekuensi sekitar 37 Hz, bukan 50 Hz. Kondisi ini terjadi karena pada pengaturan 100% delay penyalan bernilai nol atau terlalu dekat dengan titik zero-crossing. Pada saat itu tegangan dan arus beban masih terlalu kecil, sehingga TRIAC gagal menyala (*misfire*) pada sebagian setengah siklus. Akibatnya, daya yang diterima heater justru lebih kecil dan tidak stabil dibandingkan pengaturan 98%. Karena itu, nilai pengaturan maksimum pada sistem dibatasi pada 98%.

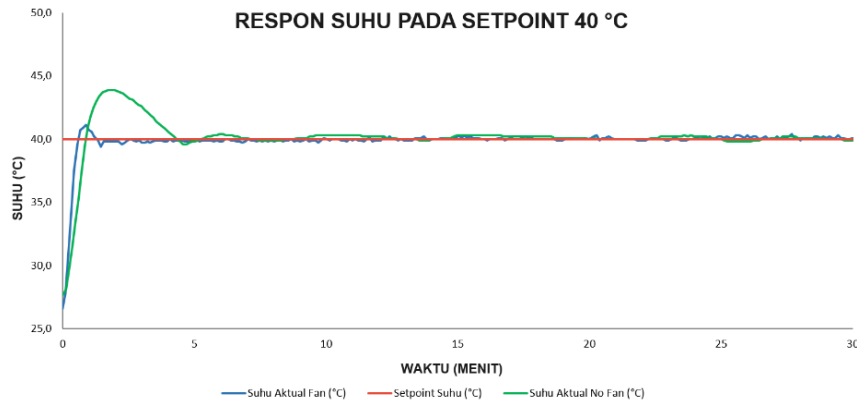
Pada pengaturan 100%, bentuk gelombang tegangan heater tidak sesuai dengan yang diharapkan. Seharusnya gelombang berupa sinus utuh, tetapi sebagian setengah siklus hilang sepenuhnya dan pola kemunculannya tidak beraturan. Osiloskop pun membaca frekuensi sekitar 37 Hz, bukan 50 Hz. Kondisi ini disebabkan oleh kegagalan penyalan TRIAC (*misfire*), yang dapat dijelaskan melalui prinsip kerja AC light dimmer.

4.5 Pengujian Respon Fuzzy Logic Sugeno

Kinerja pengendali Fuzzy Sugeno dinilai dari perubahan suhu ruang pengering ketika heater diatur melalui AC light dimmer. Pengujian dilakukan pada setpoint 40 sampai 100 °C, masing-masing dengan kipas exhaust menyala (*fan*) dan mati (*no fan*). Parameter yang dibahas meliputi rise time, overshoot, settling time, error steady state, dan perintah daya heater. Kurva suhu yang ditampilkan merupakan pembacaan sensor DHT22.

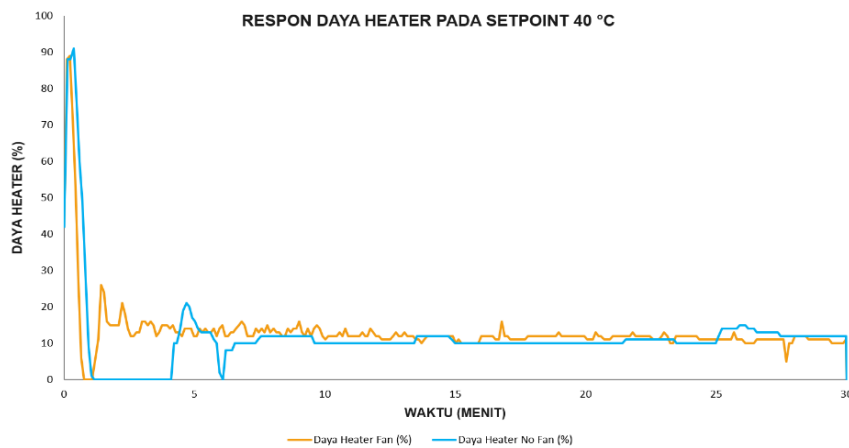
4.5.1 Pengujian Respon Suhu dan Daya Heater pada Setpoint 40 °C

Pada pengujian pertama, setpoint ditetapkan 40 °C untuk mengamati kenaikan suhu ruang pengering hingga mendekati target dan kestabilannya setelah itu. Pengamatan dilakukan saat kipas exhaust menyala (*fan*) dan mati (*no fan*). Grafik respons suhu keduanya ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 17 Grafik Respon Suhu pada Setpoint 40 °C

Pada kedua kondisi, suhu terbaca meningkat cepat menuju setpoint. Ketika kipas menyala (fan), suhu sempat mencapai 41,1 °C, kemudian turun dan segera berada di sekitar 40 °C. Tanpa kipas (no fan), suhu terus naik hingga 43,9 °C dan memerlukan waktu lebih lama untuk kembali ke target. Setelah sekitar menit ke-5, kedua kurva bertahan di sekitar 40 °C. Perubahan perintah daya heater yang menyertai respons ini diperlihatkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4. 18 Grafik Respon Daya Heater pada Setpoint 40 °C

Pada awal pemanasan, pengendali memberi perintah daya sekitar 88% sampai 91% karena selisih suhu masih besar. Perintah itu berkurang saat suhu mendekati setpoint. Dalam kondisi no fan, daya turun ke 0% selama sekitar tiga menit ketika suhu masih di atas target. Setelah suhu stabil, perintah daya kedua kondisi berada di sekitar 10% sampai 12% untuk mempertahankan pemanasan. Parameter responsnya tercantum pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Parameter Respon Sistem pada Setpoint 40 °C

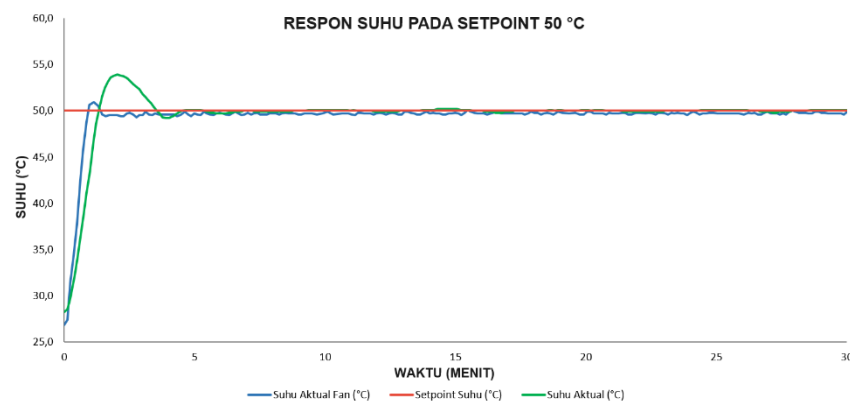
Parameter	Fan	No Fan
-----------	-----	--------

<i>Rise Time</i> (menit)	0,33	0,54
Suhu Puncak (°C)	41,1	43,9
<i>Overshoot</i> (%)	2,75	9,75
<i>Settling Time</i> (menit)	0,98	3,75
Suhu Steady State (%)	40,08	40,04
<i>Error steady state</i> (%)	0,20	0,09
Daya Heater Steady State (%)	11,1	10,5

Kipas mempercepat respons pada fase awal: overshoot tercatat 2,75% dan settling time 0,98 menit, sedangkan tanpa kipas nilainya 9,75% dan 3,75 menit. Rise time juga lebih singkat pada kondisi fan, yaitu 0,33 menit dibanding 0,54 menit. Setelah stabil, error kedua kondisi masih di bawah 0,5%. Rata-rata perintah daya pada kondisi fan sebesar 11,1%, sedikit di atas kondisi no fan sebesar 10,5%. Hasil ini menunjukkan bahwa kipas terutama memengaruhi lonjakan dan waktu penstabilan suhu pada setpoint 40 °C.

4.5.2 Pengujian Respon Suhu dan Daya Heater pada Setpoint 50 °C

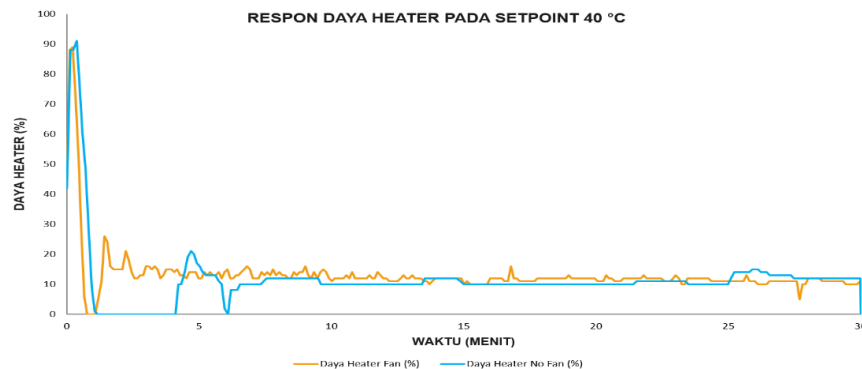
Pada pengujian kedua, setpoint dinaikkan menjadi 50 °C untuk mengamati kenaikan suhu hingga mencapai target dan perubahannya setelah itu. Data diambil selama 30 menit, baik saat kipas exhaust menyala (*fan*) maupun mati (*no fan*). Hasil pembacaan suhu kedua kondisi diperlihatkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4. 19 Grafik Respon Suhu pada Setpoint 50 °C

Dengan kipas menyala, suhu berawal dari 26,8 °C dan mencapai 50 °C dalam waktu kurang dari satu menit. Suhu sempat mencapai 50,9 °C, lalu berada di sekitar 49,5 sampai 50,0 °C. Tanpa kipas, kenaikan suhu lebih lambat tetapi berlanjut hingga puncak 53,9 °C pada menit ke-2,3. Suhu kemudian turun dan

kembali mendekati target sekitar menit ke-4. Keduanya stabil hingga akhir pengujian; respons daya heater terlihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4. 20 Grafik Respon Daya Heater pada Setpoint 50 °C

Pada permulaan pengujian, daya heater di kedua kondisi berada di sekitar 89% sampai 91%. Saat suhu mendekati target, perintah daya pada kondisi fan segera turun, lalu berubah-ubah antara 12% dan 28% untuk mengimbangi pembuangan panas oleh kipas. Pada kondisi no fan, daya menjadi 0% dari menit ke-1,7 sampai 3,8 selama suhu melebihi setpoint. Setelah itu daya meningkat lagi dan bertahan di sekitar 14% sampai 15%. Ringkasan parameter responsnya ditampilkan pada Tabel 4.6.

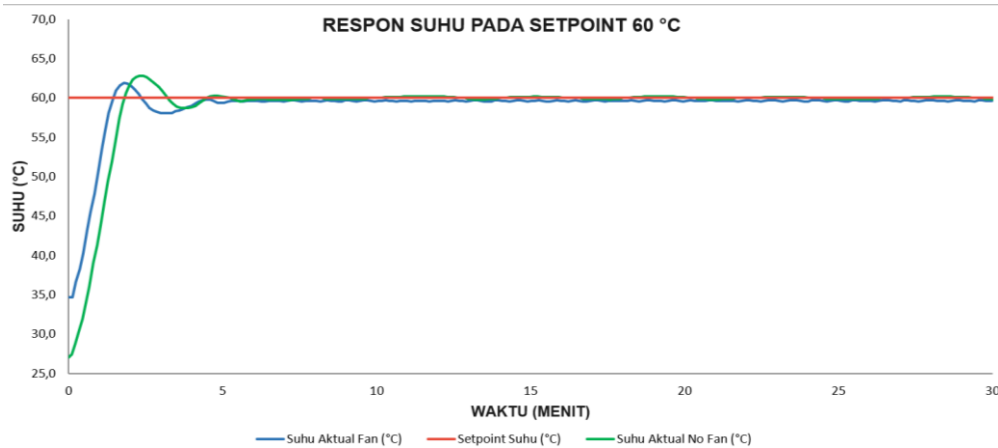
Tabel 4. 6 Parameter Respon Sistem pada Setpoint 50 °C

Parameter	Fan	No Fan
<i>Rise Time</i> (menit)	0,61	0,94
Suhu Puncak (°C)	50,9	53,9
<i>Overshoot</i> (%)	1,80	7,80
<i>Settling Time</i> (menit)	0,97	3,64
Suhu Steady State (%)	49,74	50,01
<i>Error steady state</i> (%)	0,52	0,03
Daya Heater Steady State (%)	16,4	14,8

Kondisi fan menghasilkan overshoot 1,80% dan settling time 0,97 menit, lebih kecil daripada no fan yang mencapai 7,80% dan 3,64 menit. Namun, setelah stabil, suhu no fan lebih dekat ke setpoint dengan error 0,03%. Rata-rata suhu fan Adalah 49,74 °C atau 0,52% di bawah target. Perintah daya rata-rata fan 16,4%, sedangkan no fan 14,8%, sejalan dengan tambahan panas yang terbuang saat kipas bekerja. Kedua error steady state tetap di bawah 1%. Dibanding pengujian 40 °C, kebutuhan daya pada kondisi stabil juga lebih besar.

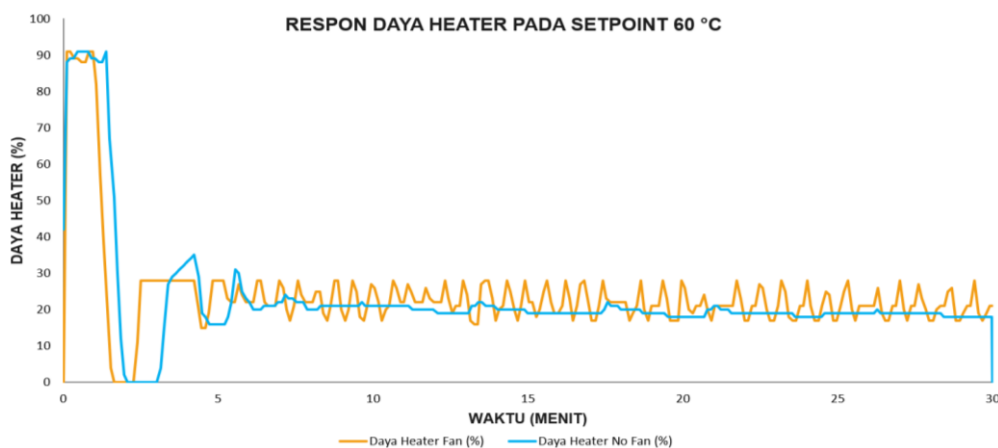
4.5.3 Pengujian Respon Suhu dan Daya Heater pada Setpoint 60 °C

Pada pengujian ketiga, setpoint dinaikkan menjadi 60 °C untuk mengamati kemampuan pengendali mencapai target dan menjaga suhu setelah fase pemanasan awal. Data diambil selama 30 menit saat kipas exhaust menyala (*fan*) maupun mati (*no fan*). Perbandingan respons suhu kedua kondisi ditunjukkan pada Gambar 4.10.



Gambar 4. 21 Grafik Respon Suhu pada Setpoint 60 °C

Dalam kondisi fan, suhu naik dari 34,7 °C dan mencapai setpoint pada menit ke-1,5. Setelah mencapai puncak 61,9 °C, suhu turun ke 58,1 °C sebelum stabil di sekitar 59,5 sampai 59,7 °C mulai menit ke-4. Pada kondisi no fan, suhu berawal dari 27,0 °C, mencapai target sekitar menit ke-1,9, lalu naik hingga 62,8 °C. Suhu sempat turun ke 58,7 °C dan akhirnya menetap di sekitar 60 °C. Kedua kondisi mengalami lonjakan di atas target, disusul penurunan di bawah target. Respons daya yang menyertainya tampak pada Gambar 4.11.



Gambar 4. 22 Grafik Respon Daya Heater pada Setpoint 60 °C

Perintah daya awal berada di sekitar 88% sampai 91% dan bertahan lebih lama daripada pada setpoint 50 °C. Sesudah suhu melewati target, daya fan turun

ke 0% pada menit ke-1,7 sampai 2,3, sedangkan daya no fan 0% pada menit ke-2,1 sampai 3,1. Ketika suhu kembali berada di bawah setpoint, daya meningkat: kondisi fan sempat bertahan pada 28% hampir dua menit dan no fan mencapai 35%. Pada fase stabil, daya fan bergerak sekitar 17% sampai 28%, sementara no fan sekitar 18% sampai 21%. Nilai parameter respons dirangkum dalam Tabel 4.7.

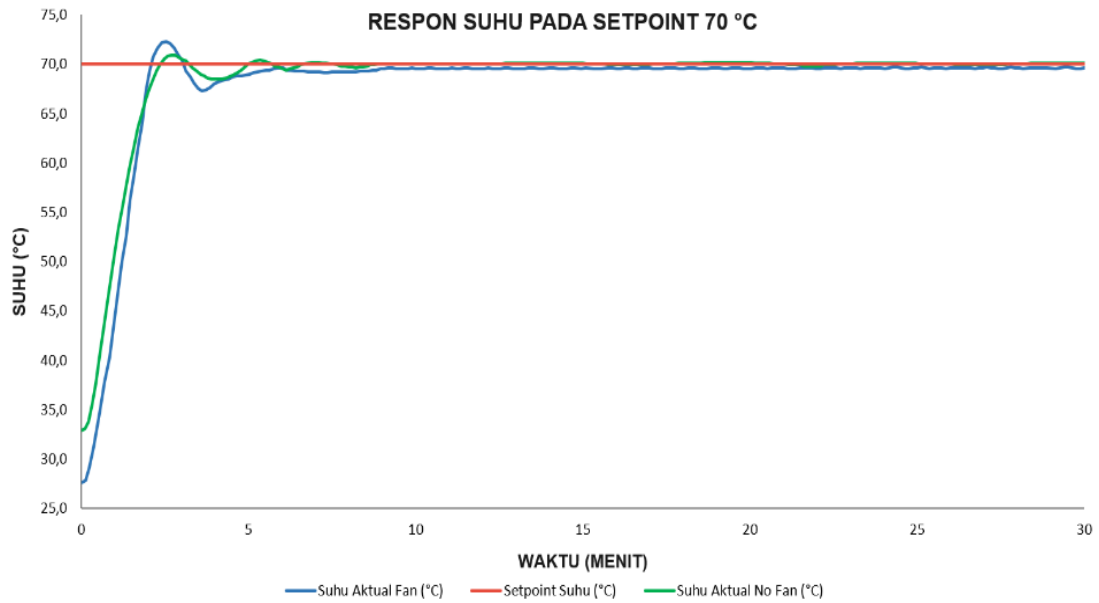
Tabel 4. 7 Parameter Respon Sistem pada Setpoint 60 °C

Parameter	Fan	No Fan
<i>Rise Time</i> (menit)	0,94	1,18
Suhu Puncak (°C)	61,9	62,8
<i>Overshoot</i> (%)	3,17	4,67
Suhu Terendah Setelah Puncak (°C)	58,1	58,7
<i>Settling Time</i> (menit)	3,99	4,22
Suhu Steady State (%)	59,62	60,01
<i>Error steady state</i> (%)	0,63	0,02
Daya Heater Steady State (%)	21,0	18,8

Overshoot fan sebesar 3,17%, lebih rendah daripada no fan sebesar 4,67%. Settling time masing-masing 3,99 dan 4,22 menit karena keduanya sempat mengalami penurunan suhu setelah puncak. Pada keadaan stabil, no fan berada di sekitar 60,01 °C dengan error 0,02%, sedangkan fan rata-rata 59,62 °C dengan error 0,63%. Suhu fan yang sedikit tertahan di bawah setpoint juga terlihat pada pengujian 50 °C. Salah satu kemungkinan ialah perintah daya ketika error kecil belum cukup untuk mengganti panas yang dibuang kipas. Walaupun demikian, error kedua kondisi masih di bawah 1%.

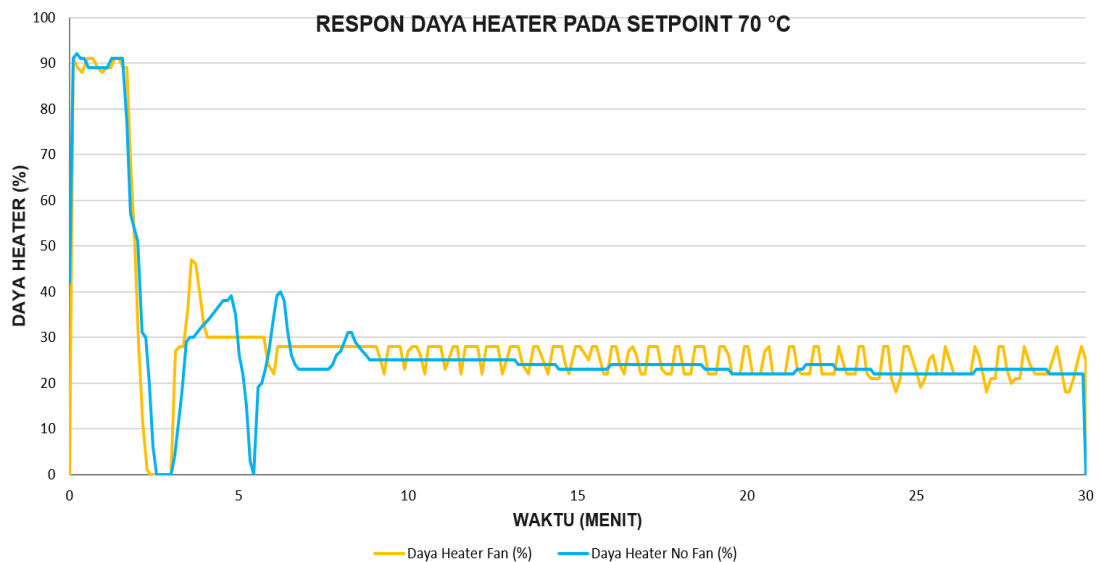
4.5.4 Pengujian Respon Suhu dan Daya Heater pada Setpoint 70 °C

Pengujian keempat menggunakan setpoint 70 °C selama 30 menit untuk menilai respons sistem pada target suhu yang lebih tinggi. Kipas exhaust diuji dalam kondisi menyala (*fan*) dan mati (*no fan*). Grafik pada Gambar 4.12 memperlihatkan perbandingan kenaikan dan penstabilan suhu kedua kondisi.



Gambar 4. 23 Grafik Respon Suhu pada Setpoint 70 °C

Pada kondisi fan, suhu berawal dari 27,6 °C dan mencapai setpoint sekitar menit ke-2,2. Suhu kemudian naik hingga 72,3 °C, turun ke 67,3 °C, lalu kembali mendekati target dan stabil sekitar 69,5 sampai 69,7 °C. Pada kondisi no fan, suhu awal 32,9 °C dan setpoint tercapai sekitar menit ke-2,7. Puncaknya hanya 70,9 °C; setelah turun ke 68,5 °C, suhu menetap di sekitar 70 °C mulai menit ke-5. Respons daya heater untuk kedua kondisi ditunjukkan pada Gambar 4.13.



Gambar 4. 24 Grafik Respon Daya Heater pada Setpoint 70 °C

Selama hampir dua menit pertama, perintah daya berada di kisaran 88% sampai 92%. Setelah suhu melampaui target, daya menjadi 0% dari menit ke-2,4 sampai 3,0 pada kondisi fan dan dari menit ke-2,9 sampai 3,4 pada no fan. Ketika

suhu turun di bawah target, daya kembali naik; puncak sesaatnya mencapai 47% untuk fan dan 39% untuk no fan. Pada keadaan stabil, fan umumnya membutuhkan 22% sampai 28%, sedangkan no fan sekitar 22% sampai 24%. Tabel 4.8 memuat parameter respons kuantitatifnya.

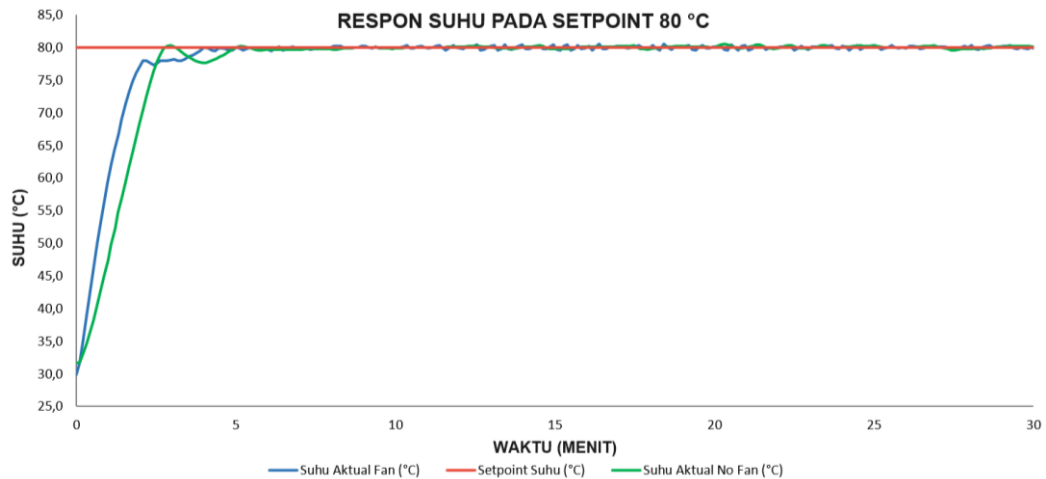
Tabel 4. 8 Parameter Respon Sistem pada Setpoint 70 °C

Parameter	Fan	No Fan
<i>Rise Time</i> (menit)	1,39	1,74
Suhu Puncak (°C)	72,3	70,9
<i>Overshoot</i> (%)	3,29	1,29
Suhu Terendah Setelah Puncak (°C)	67,3	68,5
<i>Settling Time</i> (menit)	4,53	5,03
Suhu Steady State (%)	69,58	70,04
<i>Error steady state</i> (%)	0,60	0,05
Daya Heater Steady State (%)	23,2	22,7

Berbeda dari setpoint sebelumnya, overshoot kondisi fan (3,29%) lebih besar daripada no fan (1,29%). Suhu awal no fan yang lebih tinggi, 32,9 °C dibanding 27,6 °C, perlu diperhatikan ketika membandingkan bentuk kenaikan kedua kurva. Fan juga mengalami penurunan sampai 67,3 °C setelah puncak. Walaupun demikian, settling time fan 4,53 menit masih sedikit lebih cepat daripada no fan 5,03 menit. Setelah stabil, no fan rata-rata 70,04 °C dengan error 0,05%, sedangkan fan rata-rata 69,58 °C dengan error 0,60%. Pola suhu fan yang sedikit berada di bawah target kembali terlihat, tetapi error keduanya tetap di bawah 1%.

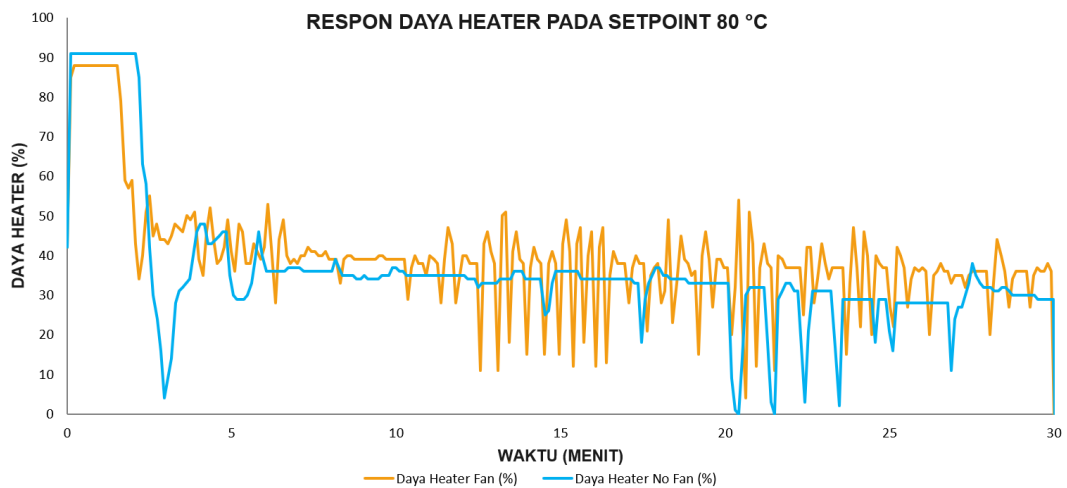
4.5.5 Pengujian Respon Suhu dan Daya Heater pada Setpoint 80 °C

Pengujian kelima menggunakan setpoint 80 °C selama 30 menit untuk melihat kemampuan sistem mencapai target suhu yang lebih tinggi dan mempertahankannya setelah stabil. Respons diamati saat kipas exhaust menyala (fan) dan mati (no fan). Perbandingan kenaikan dan perubahan suhu kedua kondisi disajikan pada Gambar 4.14.



Gambar 4. 25 Grafik Respon Suhu pada Setpoint 80 °C

Pada kondisi fan, suhu naik dari 29,8 °C hingga sekitar 78 °C dalam dua menit pertama. Kenaikannya lalu melambat dan suhu bertahan antara 77,3 °C dan 78,2 °C selama kurang lebih 1,5 menit, sebelum mencapai setpoint pada menit ke-4 tanpa lonjakan di atas target. Pada kondisi no fan, suhu awal 31,6 °C dan setpoint tercapai sekitar menit ke-2,8. Suhu sempat naik hingga 80,3 °C, turun ke 77,6 °C, lalu kembali stabil mendekati 80 °C mulai menit ke-5. Setelah fase tersebut, pembacaan kedua kondisi berada sekitar 79,5 sampai 80,5 °C. Perubahan daya heater ditunjukkan pada Gambar 4.15.



Gambar 4. 26 Grafik Respon Daya Heater pada Setpoint 80 °C

Dengan kipas menyala, perintah daya sekitar 88% bertahan sampai menit ke-1,3, lalu turun ke kisaran 34% sampai 59% ketika suhu mendekati target. Daya tidak mencapai 0% pada fase awal karena suhu fan tidak melewati setpoint. Pada no fan, daya sekitar 91% hingga menit ke-2, lalu turun sampai 4% setelah suhu

melewati target dan naik kembali sampai 48% saat suhu menurun. Pada keadaan stabil, daya fan umumnya 33% sampai 38%, sedangkan no fan 28% sampai 31%. Perintah no fan sesekali turun ke 0% saat suhu menyentuh 80,4 sampai 80,5 °C. Parameter responsnya ditampilkan pada Tabel 4.9.

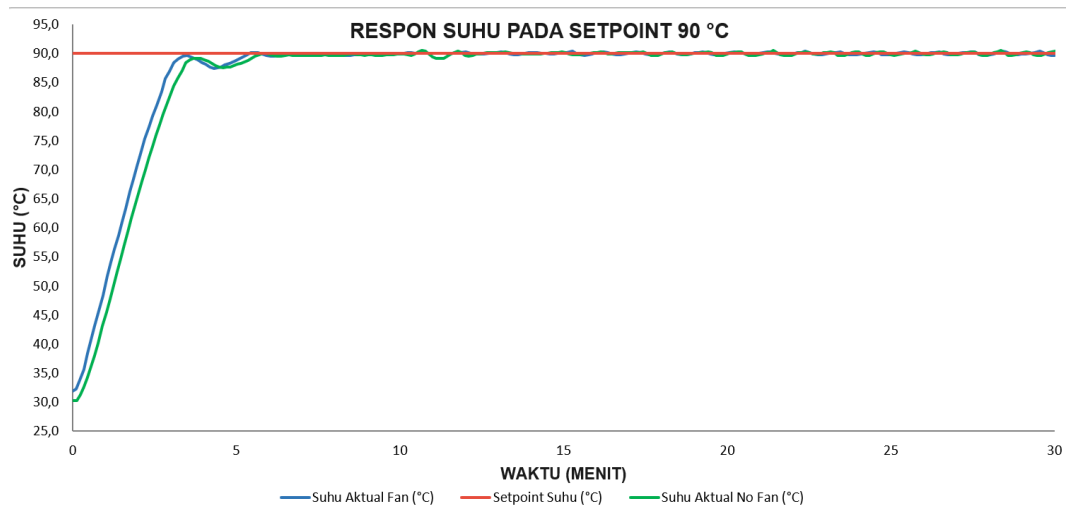
Tabel 4. 9 Parameter Respon Sistem pada Setpoint 80 °C

Parameter	Fan	No Fan
<i>Rise Time</i> (menit)	1,64	1,86
Suhu Puncak (°C)	80,0	80,3
<i>Overshoot</i> (%)	0	0,38
Suhu Terendah Setelah Puncak (°C)	79,4	77,6
<i>Settling Time</i> (menit)	3,51	4,56
Suhu Steady State (%)	80,02	80,07
<i>Error steady state</i> (%)	0,02	0,08
Daya Heater Steady State (%)	34,5	26,6

Overshoot pada kondisi fan 0%, sedangkan pada no fan hanya 0,38%. Fan mencapai setpoint lebih lambat, sekitar 4,00 menit dibanding 2,84 menit, tetapi settling time-nya lebih singkat, yaitu 3,51 menit dibanding 4,56 menit. Kondisi no fan memerlukan waktu pulih setelah suhu turun hingga 77,6 °C. Pada fase stabil, error kedua kondisi di bawah 0,1%, dengan rata-rata suhu fan 80,02 °C dan no fan 80,07 °C. Tidak tampak lagi offset di bawah setpoint pada kondisi fan seperti di setpoint 50 sampai 70 °C. Rata-rata perintah daya fan 34,5%, lebih tinggi daripada no fan 26,6%, sejalan dengan pembuangan panas oleh kipas.

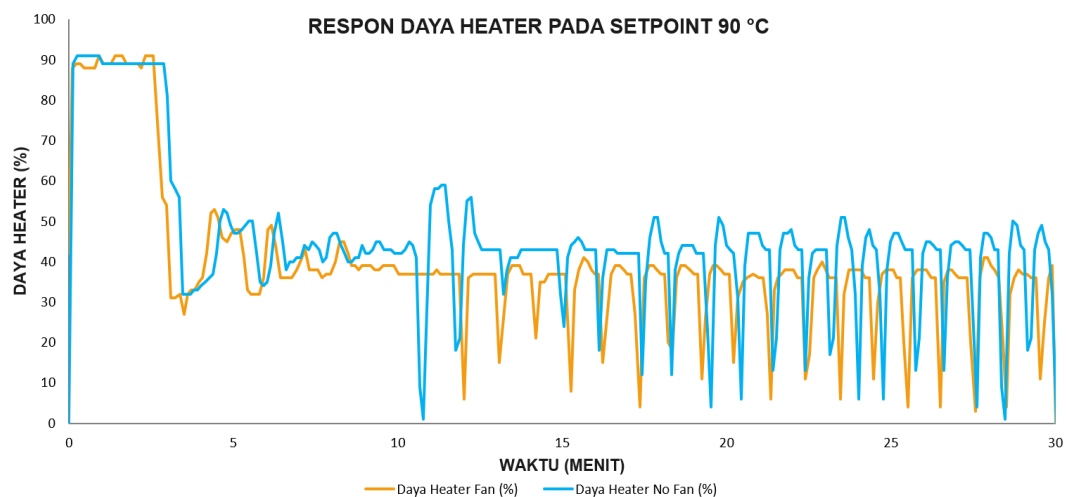
4.5.6 Pengujian Respon Suhu dan Daya Heater pada Setpoint 90 °C

Pada pengujian keenam, setpoint dinaikkan menjadi 90 °C dan sistem diamati selama 30 menit. Pengujian dilakukan dengan kipas exhaust menyala (fan) dan mati (no fan) untuk membandingkan kenaikan suhu serta kestabilannya di sekitar target. Respons suhu dari kedua kondisi tersebut ditampilkan pada Gambar 4.16.



Gambar 4. 27 Grafik Respon Suhu pada Setpoint 90 °C

Pada kondisi fan, suhu berawal dari 31,9 °C dan mendekati target pada menit ke-3,2 dengan pembacaan 89,0 °C. Suhu sempat turun ke 87,4 °C, kemudian naik lagi hingga mencapai setpoint sekitar menit ke-5,4 dan puncak 90,2 °C. Pada no fan, suhu awal 30,3 °C dan mendekati target sekitar menit ke-4 pada 89,1 °C. Setelah turun ke 87,6 °C, suhu mencapai setpoint sekitar menit ke-6,3 tanpa melampauinya. Selanjutnya kedua kondisi berkisar 89,6 sampai 90,5 °C. Grafik daya heater ada pada Gambar 4.17.



Gambar 4. 28 Grafik Respon Daya Heater pada Setpoint 90 °C

Selama kenaikan suhu, perintah daya bertahan sekitar 88% sampai 91% hingga menit ke-2,4 pada fan dan menit ke-3,2 pada no fan. Saat suhu mendekati target, daya turun menjadi sekitar 31% sampai 35%. Daya kemudian naik lagi hingga sekitar 50% ketika suhu sempat berada di bawah setpoint. Pada fase awal, keduanya tidak memerlukan perintah 0% karena suhu tidak melampaui target

secara berarti. Setelah stabil, daya fan umumnya 36% sampai 39%, sedangkan no fan 40% sampai 47%. Tabel 4.10 merangkum parameter responsnya.

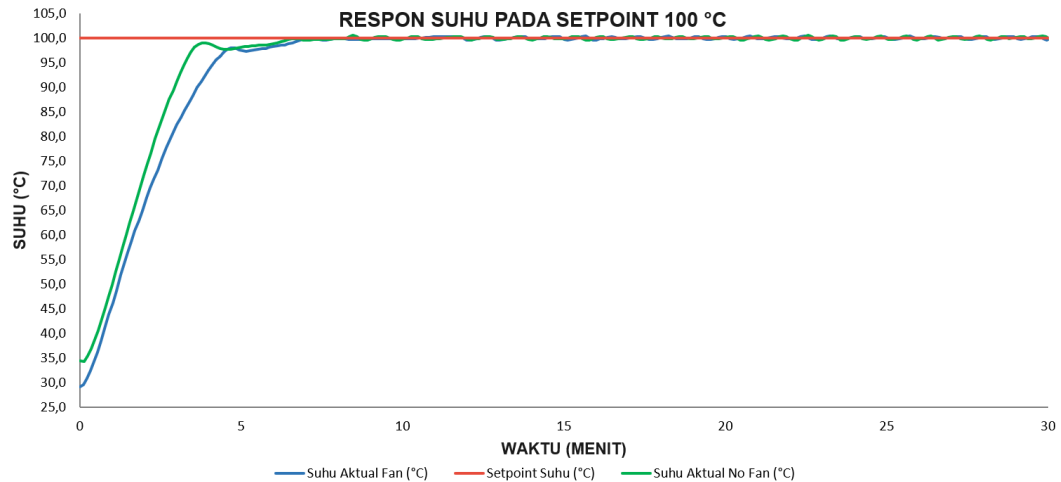
Tabel 4. 10 Parameter Respon Sistem pada Setpoint 90 °C

Parameter	Fan	No Fan
<i>Rise Time</i> (menit)	2,38	2,69
Suhu Puncak (°C)	90,2	90,0
<i>Overshoot</i> (%)	0,22	0
Suhu Terendah Setelah Puncak (°C)	87,4	87,6
<i>Settling Time</i> (menit)	4,80	5,54
Suhu Steady State (%)	90,01	89,99
<i>Error steady state</i> (%)	0,02	0,02
Daya Heater Steady State (%)	31,9	38,7

Overshoot sangat kecil pada kedua kondisi, yaitu 0,22% untuk fan dan 0% untuk no fan. Settling time fan sebesar 4,80 menit, lebih cepat daripada no fan 5,54 menit. Suhu rata-rata setelah stabil masing-masing 90,01 °C dan 89,99 °C, dengan error steady state 0,02% pada keduanya. Berdasarkan pembacaan sensor, pengendali mempertahankan suhu dekat setpoint 90 °C setelah fase awal terlewati.

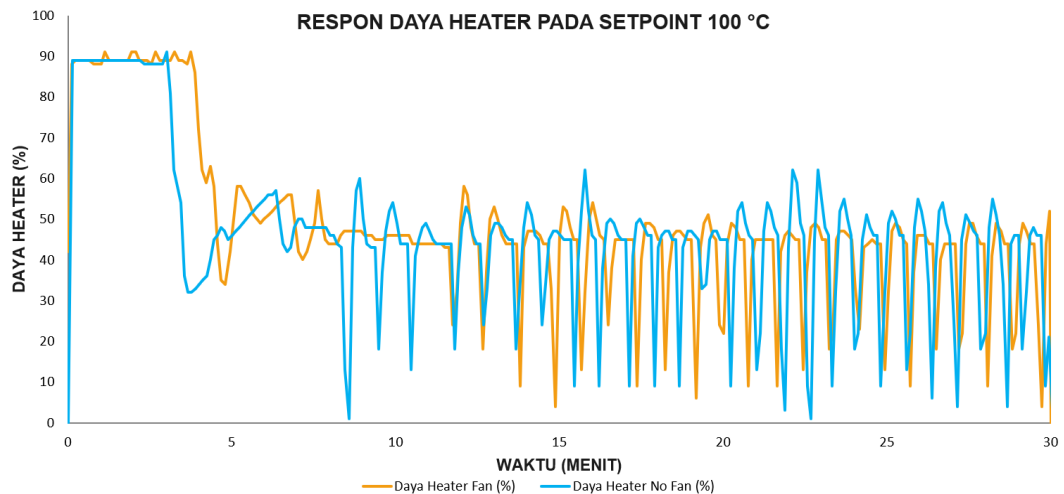
4.5.7 Pengujian Respon Suhu dan Daya Heater pada Setpoint 100 °C

Pengujian terakhir dilakukan pada setpoint 100 °C selama 30 menit untuk melihat respons sistem pada target suhu tertinggi dalam rangkaian pengujian. Suhu diamati saat kipas exhaust menyala (fan) dan mati (no fan), mulai dari proses pemanasan hingga mendekati kondisi stabil. Perbandingan respons suhu kedua kondisi ditunjukkan pada Gambar 4.18.



Gambar 4. 29 Grafik Respon Suhu pada Setpoint 100 °C

Pada kondisi fan, suhu berawal dari 29,2 °C dan meningkat hingga 98,0 °C sekitar menit ke-4,7. Suhu sempat turun ke 97,3 °C, lalu naik perlahan dan pertama kali mencapai 100 °C pada menit ke-10,5. Pada kondisi no fan, suhu awal 34,4 °C naik lebih cepat hingga 99,0 °C sekitar menit ke-3,8. Setelah turun ke 97,7 °C, suhu kembali mendekati setpoint dan melewati 100 °C pada menit ke-8,3. Sejak sekitar menit ke-7, pembacaan kedua kondisi umumnya berada pada rentang 99,5 sampai 100,5 °C. Perubahan perintah daya heater diperlihatkan pada Gambar 4.19.



Gambar 4. 30 Grafik Respon Daya Heater pada Setpoint 100 °C

Pada awal pengujian, perintah daya heater pada kedua kondisi berkisar 88% sampai 91% saat suhu masih jauh dari target. Daya mulai menurun sekitar menit ke-3,9 pada kondisi fan dan menit ke-3,1 pada no fan. Sesudahnya, perintah daya berubah mengikuti suhu: daya meningkat kembali ketika suhu sempat turun dan

berkurang saat suhu mendekati atau sedikit melampaui setpoint. Selama menit ke-15 sampai sebelum menit ke-30, rata-rata perintah daya kedua kondisi sekitar 40,0%, meskipun nilainya sesaat tetap naik dan turun. Parameter respons pengujian ini dirangkum dalam Tabel 4.11.

Tabel 4. 11 Parameter Respon Sistem pada Setpoint 100 °C

Parameter	Fan	No Fan
<i>Rise Time</i> (menit)	3,32	2,55
Suhu Puncak (°C)	100,4	100,5
<i>Overshoot</i> (%)	0,40	0,50
Suhu Terendah Setelah Puncak (°C)	97,3	97,7
<i>Settling Time</i> (menit)	5,89	4,90
Suhu Steady State (%)	99,99	100,00
<i>Error steady state</i> (%)	0,01	<0,01
Daya Heater Steady State (%)	40,0	40,0

Berdasarkan Tabel 4.11, kondisi no fan memiliki rise time 2,55 menit, lebih singkat daripada fan 3,32 menit. Suhu no fan juga menetap dalam rentang $\pm 2\%$ setpoint lebih cepat, yakni pada menit ke-4,90 dibanding menit ke-5,89 pada fan. Puncak suhu selama pengujian mencapai 100,4 °C (fan) dan 100,5 °C (no fan), setara overshoot 0,40% dan 0,50%. Pada fase stabil, suhu rata-rata berada dekat 100 °C dengan rata-rata perintah daya heater sekitar 40,0% pada keduanya. Pengendali menjaga suhu di sekitar target, sedangkan kondisi no fan lebih cepat pada fase awal.