

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Sistem Secara Keseluruhan

Pengujian sistem dilakukan untuk mengetahui kinerja alat monitoring dan pengendalian suhu air yang menggunakan metode kontrol PID berbasis PLC Mitsubishi FX-3U. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mencapai serta mempertahankan suhu air pada nilai *set point* yang telah ditentukan.

Pada sistem yang dirancang, sensor suhu berfungsi untuk membaca nilai temperatur air di dalam tangki secara kontinu. Data suhu yang diperoleh dari sensor kemudian dikirimkan ke PLC sebagai masukan sistem. PLC selanjutnya memproses data tersebut menggunakan algoritma kontrol PID yang telah diprogram sebelumnya. Hasil keluaran dari kontrol PID digunakan untuk mengatur kerja *heater* sehingga suhu air dapat meningkat hingga mencapai nilai *set point* yang diinginkan.

Pengujian dilakukan dengan memberikan nilai *set point* suhu tertentu, kemudian mengamati respons sistem terhadap perubahan suhu mulai dari kondisi awal hingga mencapai kondisi stabil. Dari hasil pengujian tersebut dapat diketahui karakteristik respons sistem, seperti waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai *set point* serta kestabilan suhu yang dihasilkan.

Parameter PID yang digunakan pada penelitian ini diperoleh melalui proses penalaan (*tuning*) menggunakan metode *trial and error* hingga diperoleh respons sistem yang relatif stabil dan mampu mencapai *set point* dengan waktu yang cukup cepat.

4.1.1 Pengujian Sensor

1. HC-SR04

Pengujian sensor level air dilakukan untuk mengetahui kemampuan sensor dalam membaca ketinggian air pada tangki. Sensor yang digunakan pada sistem ini

adalah HC-SR04 yang berfungsi untuk mendeteksi jarak antara sensor dengan permukaan air di dalam tangki.



Gambar 4.1 Pengambilan Data Ketinggian

Sensor HC-SR04 bekerja dengan memancarkan gelombang ultrasonik menuju permukaan air, kemudian gelombang tersebut dipantulkan kembali dan diterima oleh sensor. Berdasarkan waktu tempuh gelombang ultrasonik tersebut, sensor dapat menentukan jarak antara sensor dan permukaan air sehingga ketinggian air pada tangki dapat diketahui.



Gambar 4.2 Pengambilan Data HCSR ketika ON

Pengujian sensor HC-SR04 dilakukan dengan cara mengukur ketinggian air pada tangki menggunakan alat ukur sebagai referensi, kemudian hasil pengukuran tersebut dibandingkan dengan nilai yang terbaca oleh sensor. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa sensor mampu membaca ketinggian air dengan baik sehingga dapat digunakan dalam proses monitoring level air pada sistem.

Hasil pengujian sensor HC-SR04 ditunjukkan pada tabel berikut.



Gambar 4.3 Pengambilan Data HCSR ketika OFF



Gambar 4.4 Pengambilan Data Arus HCSR

Tabel 4.1 Pengujian Sensor HCSR

Jarak Sebenarnya (cm)	Hasil Pembacaan (cm)	Error (cm)	Tegangan (V)	Arus (I)	Daya (W)	Keterangan
5	5,1	0,1	5,05	0,003	0,0151	Berhasil
10	10,2	0,2	5,05	0,003	0,0151	Berhasil

15	14,9	0,1	5,05	0,003	0,0151	Berhasil
20	20,1	0,1	5,05	0,003	0,0151	Berhasil
25	24,8	0,2	5,05	0,003	0,0151	Berhasil
30	30,1	0,1	5,05	0,003	0,0151	Berhasil

2. Pengujian Sensor DS18B20

Pengujian sensor suhu dilakukan untuk memastikan bahwa sensor mampu membaca suhu air dengan baik dan menghasilkan data yang akurat sebelum digunakan dalam sistem kontrol PID.



Gambar 4.5 Pengambilan data DS18B20 ketika ON

Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor dengan alat ukur suhu referensi yaitu termometer digital. Pengukuran dilakukan pada beberapa kondisi suhu air yang berbeda.



Gambar 4.6 Pengambilan data DS18B20 ketika OFF



Gambar 4.7 Pengambilan Data DS18B20

Tabel 4.2 Pengujian Sensor Suhu

Suhu Referensi (°C)	Pembacaan Sensor (°C)	Error (°C)	Tegangan (V)	Arus (I)	Daya (W)	Keterangan
30	30,1	0,1	5,0	0,01	0,05	Berhasil
32	31,9	0,1	5,0	0,01	0,05	Berhasil
34	34,2	0,2	5,0	0,01	0,05	Berhasil
36	36,1	0,1	5,0	0,01	0,05	Berhasil
38	38,0	0,0	5,0	0,01	0,05	Berhasil
40	39,9	0,1	5,0	0,01	0,05	Berhasil

Berdasarkan hasil pengujian tersebut dapat diketahui bahwa selisih antara pembacaan sensor dengan termometer referensi relatif kecil yaitu sekitar 0.1°C hingga 0.3°C . Selisih tersebut masih berada dalam batas toleransi sehingga sensor suhu yang digunakan dinilai cukup akurat untuk digunakan pada sistem monitoring dan pengendalian suhu air.

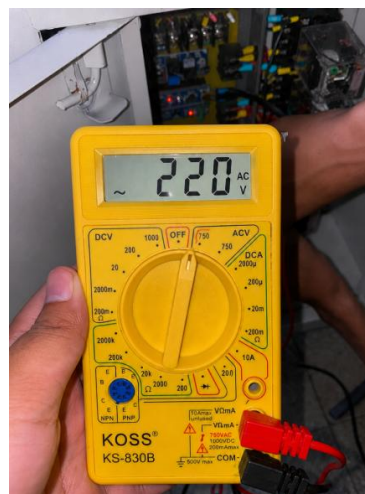
4.1.2 Pengujian Aktuator

Pengujian aktuator dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh perangkat keluaran pada sistem dapat bekerja dengan baik sesuai dengan perintah yang diberikan oleh sistem kontrol. Aktuator yang digunakan pada sistem ini meliputi heater, cooler, pompa air, dan solenoid valve. Pengujian dilakukan dengan memberikan perintah aktif dan nonaktif pada masing-masing aktuator untuk mengetahui apakah perangkat tersebut dapat berfungsi dengan baik.

Selanjutnya pengujian dilakukan pada masing-masing aktuator sebagai berikut.

1. Pengujian Heater

Pengujian heater dilakukan untuk mengetahui kemampuan heater dalam meningkatkan suhu air pada tangki. Pada pengujian ini heater diaktifkan melalui sistem kontrol sehingga elemen pemanas bekerja untuk menaikkan suhu air secara bertahap.



Gambar 4.8 Pengambilan data Heater ketika ON



Gambar 4.9 Pengambilan data Heater ketika OFF



Gambar 4.10 Pengambilan Arus Heater

Tabel 4.3 Pengujian Heater

Suhu Awal (°C)	Suhu Akhir (°C)	Tegangan (V)	Arus (I)	Daya Terukur (W)	Error (%)	Hasil Pengujian
28	28,2	220	0,17	37,4	1,00	Heater bekerja normal
28	28,6	220	0,16	35,2	0,33	Suhu meningkat dengan baik
29	29,3	220	0,17	37,4	0,33	Pemanasan stabil
29	29,8	220	0,17	37,4	0,33	Heater bekerja normal
30	30,2	220	0,16	35,2	1,00	Tidak terdapat gangguan
30	30,7	220	0,17	37,4	0,33	Mencapai set point

1. Perhitungan Massa Air

Berdasarkan persamaan massa jenis pada Persamaan (2.12), massa air dihitung dari hasil perkalian antara volume air dan massa jenisnya. Dengan volume air sebesar 1,5 liter dan massa jenis air 1 kg/liter, maka diperoleh massa air sebesar 1,5 kg.

2. Perhitungan Perubahan Suhu

Berdasarkan persamaan perubahan suhu air dihitung antara selisih antara suhu akhir dan suhu awal. Dari hasil pengujian diperoleh suhu awal sebesar 28°C dan suhu akhir sebesar 35°C, sehingga perubahan suhu (ΔT) adalah sebesar 7°C.

3. Perhitungan Energi Panas

Berdasarkan persamaan kalor pada Persamaan (2.12), energi panas yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu air dihitung menggunakan massa air, kalor jenis air, dan perubahan suhu. Dari perhitungan diperoleh energi panas sebesar 43.953 J atau setara dengan 43,95 kJ.

4. Perhitungan Waktu Pemanasan Teoritis

Berdasarkan daya heater yang digunakan sebesar 300 Watt, waktu pemanasan teoritis dapat dihitung menggunakan perbandingan antara energi panas dan daya. Dari hasil perhitungan diperoleh waktu pemanasan sebesar 146,5 detik atau sekitar 2,4 menit.

5. Perhitungan Daya yang Dibutuhkan

Untuk mengetahui daya yang dibutuhkan dalam mencapai waktu pemanasan tertentu, digunakan perbandingan antara energi panas dan waktu yang diinginkan. Perhitungan ini merupakan estimasi teoritis sebesar 366 Watt.

6. Perhitungan Suhu 63% (Konstanta Waktu τ)

Pada sistem orde satu, konstanta waktu (τ) ditentukan berdasarkan saat sistem mencapai 63% dari perubahan suhu total. Berdasarkan perhitungan, pada sistem orde satu, konstanta waktu (τ) ditentukan saat sistem mencapai 63% dari perubahan suhu total. Berdasarkan perhitungan, suhu pada kondisi

tersebut adalah sebesar $32,4^{\circ}\text{C}$. Penentuan Konstanta Waktu (τ) Berdasarkan grafik hasil pengujian, suhu sebesar $32,4^{\circ}\text{C}$ dicapai pada waktu sekitar 140 detik. Oleh karena itu, nilai tersebut diperoleh dari grafik respon sistem, yaitu saat suhu mencapai $32,4^{\circ}\text{C}$.

2. Pengujian Cooler

Pengujian cooler dilakukan untuk mengetahui kemampuan perangkat pendingin dalam menurunkan suhu air apabila suhu melebihi nilai *set point*. Cooler diaktifkan melalui sistem kontrol sehingga proses pendinginan dapat terjadi.



Gambar 4.11 Pengambilan data cooler ketika ON



Gambar 4.12 Pengambilan data Cooler ketika OFF



Gambar 4.13 Pengambilan Data Arus Cooler

Tabel 4.4 Pengujian Cooler

Suhu Awal (°C)	Suhu Akhir (°C)	Tegangan (V)	Arus (I)	Daya Terukur (W)	Error (%)	Hasil Pengujian
37,0	35,2	22,9	0,06	1,37	0,83	Pendinginan bekerja normal
36,8	34,8	23,6	0,08	1,88	0,00	Suhu menurun stabil
36,5	34,5	24	0,12	2,88	0,50	Pendinginan berlangsung baik
35,9	33,9	24	0,12	2,88	0,33	Peltier bekerja normal
35,5	33,6	23,9	0,11	2,629	0,17	Pendinginan stabil
34,8	32,9	23,9	0,11	2,629	1,00	Suhu turun sesuai program

1. Perhitungan Perubahan Suhu

Perubahan suhu air dihitung berdasarkan selisih antara suhu awal dan suhu akhir. Pada proses pendinginan, suhu air mengalami penurunan dari 38°C menjadi 30°C, sehingga diperoleh perubahan suhu (ΔT) sebesar 8°C.

2. Perhitungan Energi Panas yang Dilepas

Berdasarkan persamaan kalor pada Persamaan (2.12), energi panas yang dilepaskan selama proses pendinginan dihitung menggunakan massa air, kalor jenis air, dan perubahan suhu. Dari hasil perhitungan diperoleh energi panas sebesar 50.232 J atau setara dengan 50,23 kJ.

3. Perhitungan Daya Pendinginan Aktual

Pada sistem ini tidak digunakan pompa, sehingga aliran air relatif kecil dan proses pendinginan lebih dipengaruhi oleh perpindahan panas secara konveksi alami. Oleh karena itu, daya pendinginan dihitung berdasarkan waktu pendinginan hasil pengujian. Berdasarkan data, waktu yang dibutuhkan untuk menurunkan suhu dari 38°C menjadi 30°C adalah 400 detik, berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh daya pendinginan sebesar 125 Watt. Nilai ini merupakan daya aktual berdasarkan waktu pendinginan hasil pengujian. Perhitungan Konstanta Waktu (τ)

Sistem pendinginan dapat dimodelkan sebagai sistem orde satu, di mana konstanta waktu (τ) ditentukan pada saat sistem mencapai 63% dari perubahan suhu total. Berdasarkan perhitungan, suhu pada kondisi tersebut adalah sebesar 32,96°C.

4. Penentuan Konstanta Waktu (τ)

Berdasarkan hasil pengujian, suhu sebesar 32,96°C dicapai pada waktu sekitar 250 detik. Dengan demikian, konstanta waktu (τ) sistem pendinginan diperoleh sebesar 250 detik.

3. Pengujian Pompa Air

Pengujian pompa air dilakukan untuk mengetahui kemampuan pompa dalam mengalirkan air menuju tangki sistem. Pada pengujian ini pompa diberikan perintah aktif dan nonaktif melalui sistem kontrol untuk melihat apakah pompa dapat bekerja sesuai dengan perintah yang diberikan.



Gambar 4.14 Pengambilan data PompaAir ketika ON



Gambar 4.15 Pengambilan data Pompa Air ketika OFF



Gambar 4.16 Pengambilan Data Arus Pompa

Tabel 4.5 Pengujian Pompa Air

Tegangan (V)	Arus (I)	Daya (W)	Kondisi Output Y2	Hasil Pengujian
12,0	0,20	2,4	ON	Pompa bekerja normal
12,0	0,20	2,4	ON	Debit air stabil
12,1	0,24	2,42	ON	Aliran air lancar
12,0	0,20	2,4	ON	Tidak ada getaran berlebih
12,0	0,20	2,4	ON	Pompa bekerja stabil
12,1	0,24	2,42	ON	Pompa beroperasi sesuai program

Ketika pompa diberikan perintah aktif (ON), pompa akan menyala dan mengalirkan air menuju tangki. Sebaliknya, ketika pompa diberikan perintah nonaktif (OFF), pompa akan berhenti bekerja sehingga aliran air menuju tangki

juga berhenti. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa pompa air dapat berfungsi dengan baik dalam proses pengisian air pada tangki sistem.

4. Pengujian Solenoid Valve

Pengujian solenoid valve dilakukan untuk mengetahui kemampuan katup dalam mengatur aliran air pada sistem. Solenoid valve bekerja dengan prinsip elektromagnetik yang memungkinkan katup untuk membuka dan menutup aliran air ketika diberikan perintah oleh sistem kontrol.



Gambar 4.17 Pengambilan data Solenoid ketika ON



Gambar 4.18 Pengambilan data Solenoid ketika OFF



Gambar 4.19 Pengambilan Data Arus Solenoid

Tabel 4.6 Pengujian Valve

Tegangan (V)	Arus (I)	Daya (W)	Kondisi Output Y1	Hasil Pengujian
220	0,10	22	ON	Katup membuka normal
220	0,10	22	ON	Air mengalir dengan baik
220	0,10	22	ON	Solenoid bekerja normal
220	0,10	22	ON	Tidak ada hambatan
220	0,10	22	ON	Katup membuka sempurna
220	0,10	22	ON	Sistem bekerja normal

Pada pengujian ini solenoid valve diberikan perintah aktif dan nonaktif melalui sistem kontrol. Ketika solenoid valve diberikan perintah aktif (ON), katup akan terbuka sehingga air dapat mengalir melalui saluran pipa. Sebaliknya, ketika perintah dimatikan (OFF), katup akan menutup sehingga aliran air akan terhenti. Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa solenoid valve dapat bekerja dengan baik dalam mengontrol aliran air pada sistem.

4.1.3 Pengujian Sistem Kontrol PID tanpa Gangguan

Berdasarkan hasil percobaan parameter PID menggunakan metode trial and error, diperoleh beberapa kombinasi nilai Kp, Ki, dan Kd yang menghasilkan karakteristik respon sistem yang berbeda. Hasil pengujian tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.7

Tabel 4.7 Pengujian Sistem Kontrol PID

Kp	Ki	Kd	Hasil
130	1	15	Respon mulai cepat, sedikit error steady state

150	1	15	Respon cepat, overshoot kecil, stabil (optimal)
190	2	20	Respon sangat cepat, overshoot besar, kurang stabil

Parameter PID mempengaruhi kecepatan respon, overshoot, dan kestabilan sistem. Nilai K_p kecil menghasilkan respon lambat, sedangkan K_p besar mempercepat respon namun meningkatkan overshoot. Parameter K_i mengurangi error steady state, dan K_d membantu meredam overshoot. Berdasarkan pengujian, kombinasi $K_p = 150$, $K_i = 1$, dan $K_d = 15$ dipilih sebagai yang optimal karena memberikan respon cepat, stabil, dan overshoot kecil.

4.1.4 Pengujian Sistem Kontrol PID dengan Gangguan

Berdasarkan hasil percobaan parameter PID menggunakan metode *trial and error* pada kondisi dengan gangguan, dilakukan pengujian dengan memberikan gangguan berupa penambahan tiga buah es batu kristal ke dalam tangki air. Pemberian gangguan ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan sistem kontrol PID dalam mempertahankan kestabilan suhu dan mengembalikan temperatur menuju nilai *set point* setelah terjadi penurunan suhu akibat pengaruh eksternal. Hasil pengujian tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.8 Pengujian Sistem Kontrol PID dengan Gangguan

Kp	Ki	Kd	Hasil
130	1	15	Respon pemulihan suhu cenderung lambat setelah penambahan es batu, sehingga membutuhkan waktu lebih lama untuk kembali ke <i>set point</i>
150	1	15	Respon pemulihan cepat, <i>overshoot</i> kecil, dan sistem kembali stabil menuju <i>set point</i> (optimal)
190	2	20	Respon sangat cepat namun terjadi <i>overshoot</i> yang lebih

besar dan sistem cenderung
kurang stabil

Pada kondisi dengan gangguan, parameter PID mempengaruhi kemampuan sistem dalam merespon perubahan suhu akibat penambahan es batu kristal. Nilai K_p yang kecil menghasilkan respon pemulihan suhu yang lebih lambat, sedangkan nilai K_p yang terlalu besar mempercepat proses pemulihan namun dapat meningkatkan *overshoot* dan menyebabkan respon sistem menjadi kurang stabil. Parameter K_i membantu mengurangi *steady state error* agar suhu dapat kembali mendekati nilai *set point*, sedangkan K_d berfungsi meredam perubahan respon yang terlalu cepat akibat gangguan sehingga kestabilan sistem dapat dipertahankan.

Berdasarkan hasil pengujian, kombinasi parameter $K_p = 150$, $K_i = 1$, dan $K_d = 15$ dipilih sebagai parameter optimal karena mampu memberikan respon pemulihan suhu yang cepat, stabil, serta menghasilkan *overshoot* yang kecil setelah sistem diberikan gangguan berupa penambahan tiga buah es batu kristal.

4.2 Analisis Data dan Grafik Respon Sistem

Data respon sistem diperoleh dari hasil pengukuran suhu air terhadap waktu selama proses pemanasan berlangsung. Berdasarkan hasil tersebut, suhu air meningkat secara bertahap dari kondisi awal 29°C hingga mencapai setpoint 35°C pada sekitar detik ke-500. Setelah mencapai setpoint, suhu masih mengalami kenaikan (*overshoot*) hingga kurang lebih 37°C sebelum akhirnya menurun dan berada pada kondisi stabil di kisaran $35\text{--}36^{\circ}\text{C}$.

Secara umum, respon sistem menunjukkan karakteristik yang cukup baik dengan kenaikan suhu yang relatif halus dan minim fluktuasi. Sistem juga mampu mencapai dan mempertahankan nilai setpoint dengan kestabilan yang cukup terjaga. Meskipun demikian, masih terdapat ruang untuk peningkatan pada kecepatan pencapaian setpoint serta pengurangan *overshoot* agar performa sistem dapat menjadi lebih optimal.

Oleh karena itu, dilakukan pengujian lebih lanjut dengan beberapa variasi parameter PID untuk memperoleh respon sistem yang lebih cepat, stabil, dan terkontrol.

4.3.1 Kombinasi Stabil

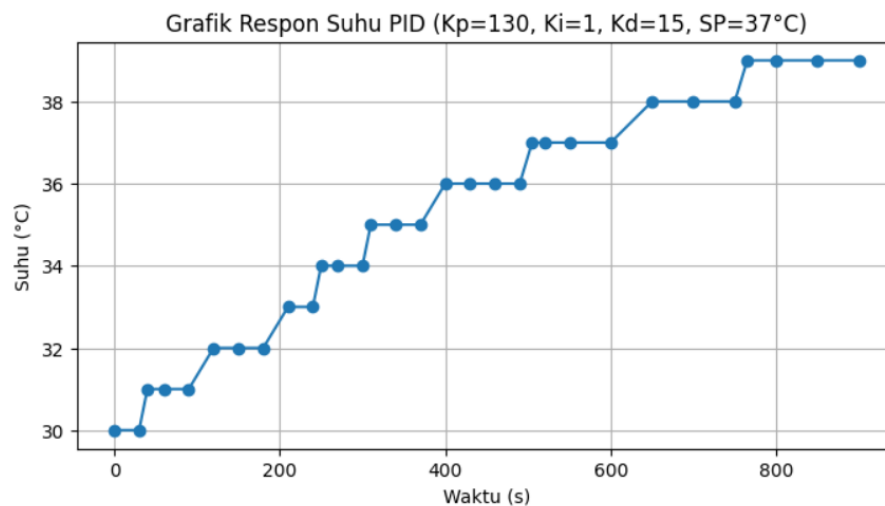
Pada pengujian pertama dilakukan penalaan parameter PID menggunakan kombinasi nilai $K_p = 130$, $K_i = 1$, dan $K_d = 15$ untuk mengetahui respon awal sistem terhadap perubahan parameter. Tabel 4.9 Data Pengujian Sistem Kontrol PID

Tabel 4.9 Kombinasi Stabil

Waktu (s)	K_p	K_i	K_d	SP (°C)	Suhu (°C)
0	130	1	15	37	30
30	130	1	15	37	30
40	130	1	15	37	31
60	130	1	15	37	31
90	130	1	15	37	31
120	130	1	15	37	32
150	130	1	15	37	32
180	130	1	15	37	32
210	130	1	15	37	33
240	130	1	15	37	33
250	130	1	15	37	34
270	130	1	15	37	34
300	130	1	15	37	34
310	130	1	15	37	35
340	130	1	15	37	35
370	130	1	15	37	35
400	130	1	15	37	36
430	130	1	15	37	36
460	130	1	15	37	36
490	130	1	15	37	36
505	130	1	15	37	37
520	130	1	15	37	37
550	130	1	15	37	37
600	130	1	15	37	37

650	130	1	15	37	38
700	130	1	15	37	38
750	130	1	15	37	38
765	130	1	15	37	39
800	130	1	15	37	39
850	130	1	15	37	39

Berdasarkan hasil pengujian, sistem menunjukkan respon yang stabil dengan frekuensi ON-OFF yang rendah, namun waktu yang dibutuhkan untuk mencapai setpoint masih relatif lama sehingga performa sistem belum optimal.



Gambar 4.20 Grafik Kombinasi Stabil

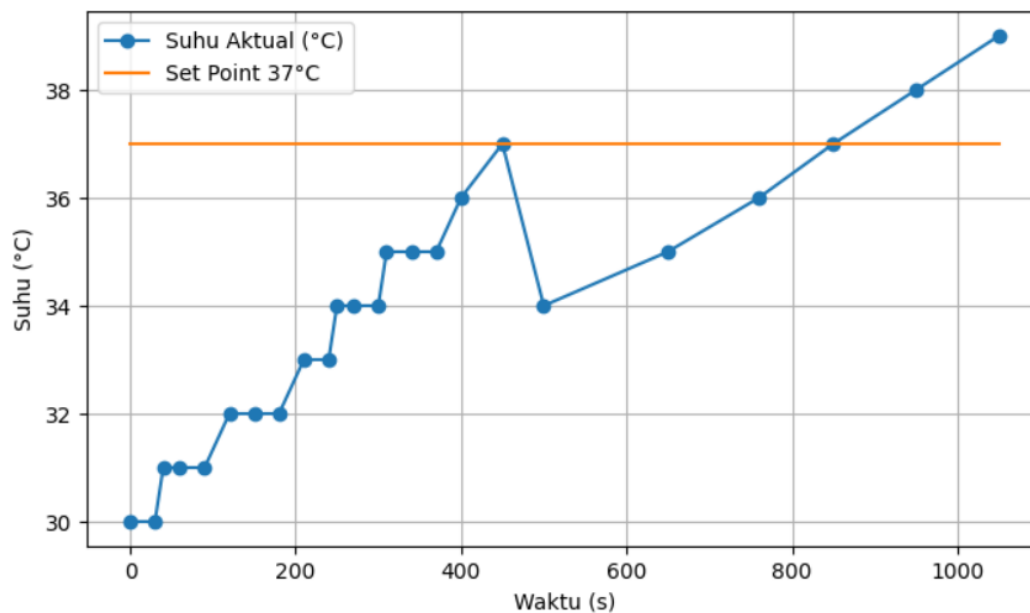
Pada pengujian ini dilakukan percobaan dengan menambahkan gangguan berupa penambahan air dengan hasil data sebagai berikut

Tabel 4.10 Kombinasi Stabil

Waktu (s)	K_p	K_i	K_d	SP ($^\circ\text{C}$)	Suhu ($^\circ\text{C}$)
0	130	1	15	37	30
30	130	1	15	37	30
40	130	1	15	37	31
60	130	1	15	37	31
90	130	1	15	37	31
120	130	1	15	37	32

150	130	1	15	37	32
180	130	1	15	37	32
210	130	1	15	37	33
240	130	1	15	37	33
250	130	1	15	37	34
270	130	1	15	37	34
300	130	1	15	37	34
310	130	1	15	37	35
340	130	1	15	37	35
370	130	1	15	37	35
400	130	1	15	37	36
450	130	1	15	37	37
500	130	1	15	37	34
650	130	1	15	37	35
760	130	1	15	37	36
850	130	1	15	37	37
950	130	1	15	37	38
1050	130	1	15	37	39

Berdasarkan hasil pengujian yang ditambahkan gangguan berupa penambahan volume air 20% (200ml) didapatkan grafik berikut



Gambar 4.21 Grafik Kombinasi Stabil

Pada pengujian pertama, sistem PID bekerja tanpa adanya gangguan eksternal. Suhu awal sebesar 30°C meningkat secara bertahap hingga mencapai

setpoint 37°C pada detik ke-505. Setelah mencapai setpoint, suhu tidak berhenti pada 37°C tetapi terus meningkat hingga mencapai 39°C pada detik ke-765.

Tabel 4.11 Analisis Kombinasi Stabil

Waktu	Suhu
500 s	34°C
650 s	35°C
760 s	36°C
850 s	37°C

Berdasarkan data pengujian dan grafik respon sistem, analisis dilakukan dengan mengacu pada parameter karakteristik respon sistem yang telah dijelaskan pada Persamaan (2.3.2).

Tabel 4.12 Kombinasi Stabil

Parameter	Tanpa Gangguan	Dengan Gangguan 300 mL
Kp	130	130
Ki	1	1
Kd	15	15
Setpoint	37°C	37°C
Suhu Awal	30°C	30°C
Waktu Mencapai Setpoint Pertama	505 s	450 s
Penurunan Suhu Akibat Gangguan Besar	Tidak ada	37°C → 34°C
Penurunan	0°C	3°C
Waktu Pemulihan ke Setpoint	Tidak ada	±350 s
Suhu Maksimum	39°C	39°C
Overshoot	2°C	2°C
Overshoot (%)	5,4%	5,4%
Error Steady State Akhir	+2°C	+2°C
Stabilitas Sistem	Stabil tetapi overshoot	Mampu pulih setelah gangguan

1. Dari hasil pengujian, diperoleh nilai rise time (t_r) sebesar 505 detik, yang menunjukkan bahwa sistem membutuhkan waktu yang cukup lama untuk mencapai set point dari kondisi awal. Hal ini menandakan bahwa respon sistem tergolong lambat.
2. Pada pengujian kedua diberikan gangguan berupa penambahan volume air sebesar 200ml ketika suhu berada di sekitar setpoint ($\pm 95\%$ dari 37°C).
3. Berdasarkan Persamaan (2.3.2), nilai overshoot (M_p) yang terjadi adalah sebesar 5,41%, Hal ini menunjukkan bahwa parameter PID yang digunakan masih menghasilkan respon yang cukup agresif sehingga suhu melewati nilai setpoint.
4. Selanjutnya, nilai settling time (t_s) diperoleh sebesar 850 detik, yang menunjukkan bahwa sistem membutuhkan waktu yang cukup lama untuk mencapai kondisi stabil dalam rentang $\pm 5\%$ terhadap set point.
5. Sedangkan nilai steady-state error (ess) sebesar 1°C , yang menunjukkan bahwa sistem masih memiliki selisih kecil terhadap nilai set point pada kondisi akhir. Dengan demikian, kombinasi parameter ini menghasilkan sistem yang memiliki kestabilan yang baik dan minim fluktuasi, namun respon sistem masih tergolong lambat sehingga kurang optimal untuk aplikasi yang membutuhkan respon cepat.
6. Pada percobaan dengan penambahan volume air 200ml suhu turun mencapai 3°C , dan mengalami waktu pemulihan sebesar 350 detik

Kesimpulan:

Berdasarkan hasil pengujian tanpa gangguan dan dengan gangguan penambahan air sebesar 200ml, sistem PID mampu mempertahankan performa pengendalian suhu dengan baik. Gangguan yang diberikan menyebabkan suhu turun sebesar 3°C dari 37°C menjadi 34°C . Meskipun demikian, sistem mampu mengembalikan suhu menuju setpoint dalam waktu sekitar 350 detik tanpa terjadi osilasi yang berlebihan. Hasil ini menunjukkan bahwa kontrol PID yang diterapkan memiliki kemampuan disturbance rejection yang baik serta mampu menjaga

kestabilan sistem terhadap perubahan beban termal yang terjadi pada tangki pemanas.

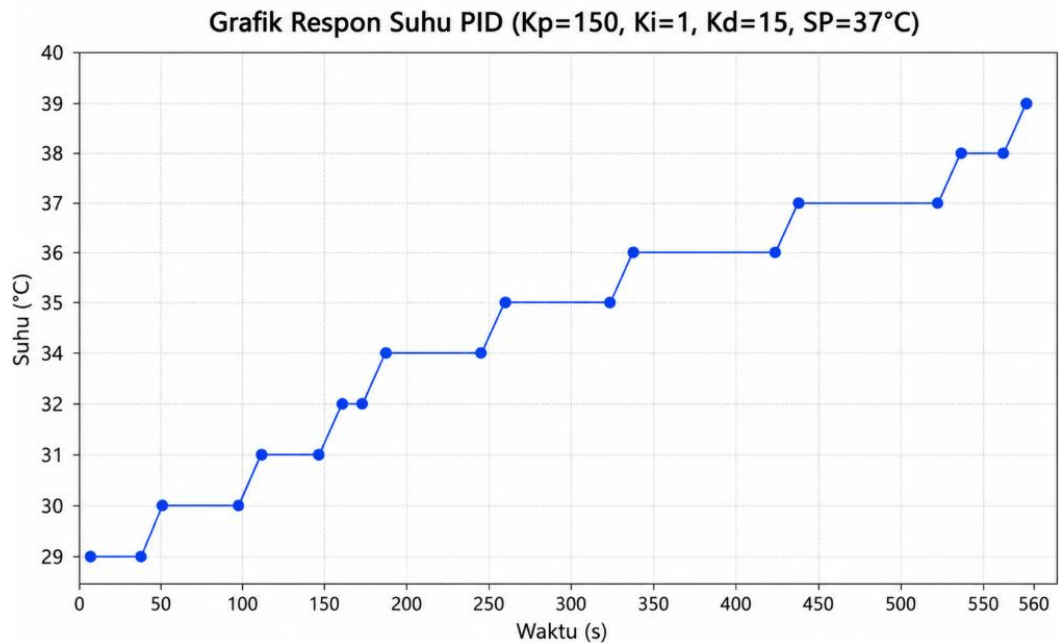
4.3.3 Kombinasi Optimal

Pada pengujian kedua dilakukan perubahan parameter PID menjadi $K_p = 150$, $K_i = 1$, dan $K_d = 15$ guna meningkatkan kecepatan respon sistem.

Tabel 4.13 Kombinasi Optimal

Waktu (s)	Set Point	Suhu Aktual (°C)	K_p	K_i	K_d
0	37	30	150	1	15
20	37	30	150	1	15
40	37	30	150	1	15
60	37	31	150	1	15
80	37	31	150	1	15
100	37	31	150	1	15
120	37	32	150	1	15
140	37	32	150	1	15
160	37	33	150	1	15
180	37	34	150	1	15
200	37	34	150	1	15
220	37	34	150	1	15
240	37	35	150	1	15
260	37	35	150	1	15
280	37	35	150	1	15
300	37	35	150	1	15
320	37	36	150	1	15
340	37	36	150	1	15
360	37	36	150	1	15
380	37	36	150	1	15
400	37	36	150	1	15
420	37	36	150	1	15
440	37	37	150	1	15
460	37	37	150	1	15
500	37	37	150	1	15
520	37	37	150	1	15
540	37	38	150	1	15
560	37	39	150	1	15

Berdasarkan hasil pengujian, sistem mampu mencapai setpoint dengan waktu yang lebih cepat serta tetap stabil dengan frekuensi ON-OFF yang lebih terkendali, sehingga kombinasi ini dinilai sebagai parameter yang paling optimal.



Gambar 4.22 Grafik Kombinasi Optimal

Pada pengujian ini dilakukan percobaan dengan menambahkan gangguan berupa penambahan air dengan hasil data sebagai berikut

Tabel 4.14 Kombinasi Optimal

Waktu (detik)	Suhu (°C)	Setpoint Suhu (°C)	K_p	K_i	K_d
0	30	37	150	1	15
30	31	37	150	1	15
50	32	37	150	1	15
70	33	37	150	1	15
100	34	37	150	1	15
120	35	37	150	1	15
150	36	37	150	1	15
200	37	37	150	1	15
220	35	37	150	1	15
230	33	37	150	1	15
250	34	37	150	1	15

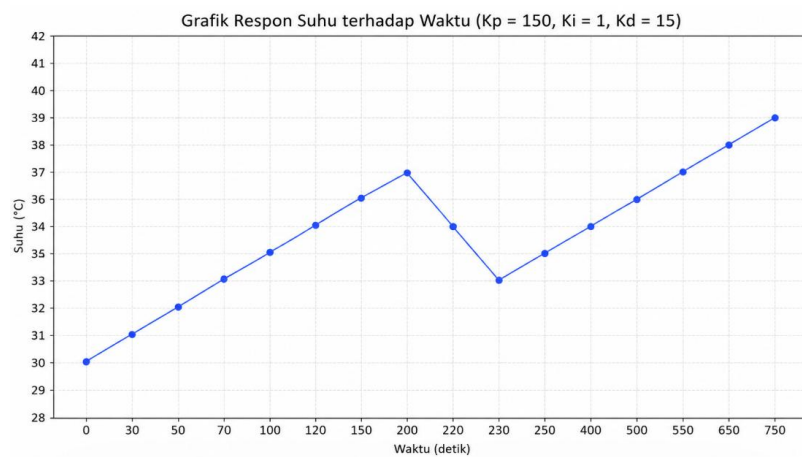
400	35	37	150	1	15
500	36	37	150	1	15
550	37	37	150	1	15
650	38	37	150	1	15
750	39	37	150	1	15

Pada pengujian kedua diberikan gangguan berupa penambahan air sebanyak 200ml ketika suhu telah mencapai setpoint 37°C pada detik ke-200, yang dimana setelah gangguan diberikan terdapat penurunan suhu sebagai berikut

Tabel 4.15 Analisis Kombinasi Optimal

Waktu	Suhu
200 s	37°C
220 s	35°C
230 s	33°C

Berikut adalah grafik dari data gangguan pada kombinasi optimal dengan gangguan sebesar 20% (200ml)



Gambar 4.23 Grafik Kombinasi Optimal

Pada pengujian ini dilakukan peningkatan parameter untuk mempercepat Berdasarkan data pengujian dan grafik respon sistem, analisis dilakukan dengan mengacu pada parameter karakteristik respon sistem yang telah dijelaskan pada Persamaan (2.3.2).

Tabel 4.16 Kombinasi Optimal

Parameter	Tanpa Gangguan	Dengan Gangguan 200 mL
Kp	150	150
Ki	1	1
Kd	15	15
Setpoint	37°C	37°C
Suhu Awal	30°C	30°C
Waktu Mencapai Setpoint Pertama	440 s	200 s
Penurunan Suhu Akibat Gangguan	Tidak ada	37°C → 33°C
Besar Penurunan Suhu	0°C	4°C
Waktu Pemulihan ke Setpoint	Tidak ada	±320 s
Suhu Maksimum	39°C	39°C
Overshoot	2°C	2°C
Overshoot (%)	5,4%	5,4%
Error Steady State Akhir	+2°C	+2°C
Kemampuan Recovery	Tidak diuji	Baik

1. Dari hasil pengujian, diperoleh nilai rise time (tr) sebesar 560 detik, yang menunjukkan bahwa sistem mampu mencapai set point lebih cepat dibandingkan kombinasi sebelumnya.
2. Ketika sistem diberi gangguan nilai rise time (tr) naik sebesar 750 detik yang menunjukkan bahwa sistem mampu mencapai set point lebih cepat 300 detik dari kombinasi sebelumnya

3. Nilai overshoot (M_p) yang diperoleh berdasarkan Persamaan (2.3.2) adalah sebesar 5,41%, yang menunjukkan bahwa sistem masih mengalami kelebihan respon, namun tetap dalam batas toleransi yang dapat diterima.
4. Selanjutnya, nilai settling time (t_s) diperoleh sebesar 650 detik, yang menunjukkan bahwa sistem mampu mencapai kondisi stabil dalam waktu yang lebih cepat dibandingkan kombinasi sebelumnya.
5. Sedangkan nilai steady-state error (e_{ss}) mendekati 0°C , yang menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat akurasi yang sangat baik dalam mempertahankan suhu pada nilai set point.

Tabel 4.17 Kombinasi Optimal

Aspek	Tanpa Gangguan	Dengan Gangguan
Pencapaian Setpoint	Berhasil	Berhasil
Penurunan Suhu	Tidak ada	4°C
Recovery	Tidak diperlukan	Berhasil
Overshoot	5,4%	5,4%
Stabilitas Sistem	Baik	Baik
Kemampuan Disturbance Rejection	Tidak diuji	Terbukti baik

Berdasarkan hasil pengujian dengan gangguan penambahan air sebesar 200ml, suhu sistem mengalami penurunan dari 37°C menjadi 33°C atau sebesar 4°C . Meskipun terjadi perubahan beban termal yang cukup signifikan, sistem pengendalian PID mampu mengembalikan suhu menuju setpoint dalam waktu sekitar 320 detik. Hasil ini menunjukkan bahwa parameter PID yang digunakan ($K_p = 150$, $K_i = 1$, dan $K_d = 15$) memiliki kemampuan disturbance rejection yang baik sehingga sistem tetap mampu mempertahankan kestabilan suhu meskipun terjadi perubahan kondisi operasi.

4.3.5 Kombinasi Cepat Terkontrol

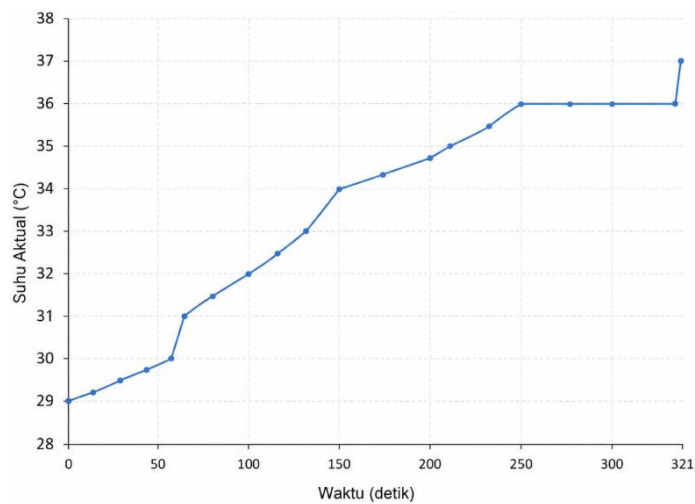
Pada pengujian keempat dilakukan peningkatan nilai K_p menjadi 190 serta penyesuaian K_d menjadi 20 untuk mempercepat respon sistem tanpa mengurangi kestabilan.

Tabel 4.18 Kombinasi Cepat Terkontrol

Waktu	Suhu Aktual (°C)	KP	KI	KD	SP Suhu
0	29	190	2	20	37
10	29,13	190	2	20	37
20	29,25	190	2	20	37
30	29,38	190	2	20	37
40	29,5	190	2	20	37
50	29,63	190	2	20	37
60	29,75	190	2	20	37
70	29,88	190	2	20	37
80	30	190	2	20	37
90	31	190	2	20	37
100	31,33	190	2	20	37
110	31,67	190	2	20	37
120	32	190	2	20	37
130	32,5	190	2	20	37
140	33	190	2	20	37
150	34	190	2	20	37
160	34,22	190	2	20	37
170	34,44	190	2	20	37
180	34,67	190	2	20	37
190	34,89	190	2	20	37
195	35	190	2	20	37
200	35,09	190	2	20	37
210	35,27	190	2	20	37
220	35,45	190	2	20	37

230	35,64	190	2	20	37
240	35,82	190	2	20	37
250	36	190	2	20	37
260	36	190	2	20	37
280	36	190	2	20	37
300	36	190	2	20	37
320	36	190	2	20	37
321	37	190	2	20	37

Hasil pengujian menunjukkan bahwa respon sistem menjadi lebih cepat, namun mulai terjadi peningkatan frekuensi switching pada aktuator, sehingga kestabilan sistem sedikit menurun dibandingkan kombinasi sebelumnya.



Gambar 4.24 Grafik Kombinasi Cepat Terkontrol

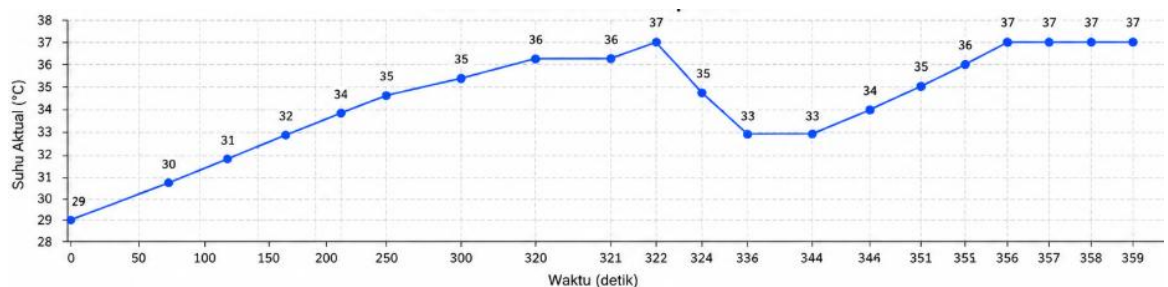
Pada pengujian ini dilakukan peningkatan nilai K_p dan K_d untuk mempercepat respon sistem.

Tabel 4.19 Kombinasi Cepat Terkontrol

Waktu	SP Suhu	Suhu Aktual (°C)	KP	KI	KD

0	37	29,0	190	2	20
80	37	30,0	190	2	20
90	37	31,0	190	2	20
120	37	32,0	190	2	20
140	37	33,0	190	2	20
150	37	34,0	190	2	20
195	37	35,0	190	2	20
250	37	36,0	190	2	20
320	37	36,0	190	2	20
321	37	37,0	190	2	20
322	37	35,0	190	2	20
324	37	33,0	190	2	20
336	37	33,0	190	2	20
344	37	34,0	190	2	20
345	37	35,0	190	2	20
351	37	35,0	190	2	20
352	37	36,0	190	2	20
355	37	36,0	190	2	20
356	37	37,0	190	2	20
359	37	37,0	190	2	20

Berdasarkan pengujian dengan menambahkan volume air sebesar 20% (300ml) didapatkan hasil grafik seperti berikut



Gambar 4.25 Grafik Kombinasi Cepat Terkontrol

Berdasarkan data pengujian dan grafik respon sistem, analisis dilakukan dengan mengacu pada parameter karakteristik respon sistem yang telah dijelaskan pada Persamaan (2.3.2).

Dari analisis *Recovery* sistem didapatkan data sebagai berikut

Tabel 4.20 Kombinasi Cepat Terkontrol

Waktu (s)	Suhu
324	33°C
344	34°C
345	35°C
352	36°C
356	37°C

Waktu pemulihan:

$$\begin{aligned} & 356 - 324 \\ & = 32 \text{ detik} \end{aligned}$$

Jika dihitung sejak suhu pertama turun (322 s):

$$\begin{aligned} & 356 - 322 \\ & = 34 \text{ detik} \end{aligned}$$

Artinya sistem hanya membutuhkan sekitar 32–34 detik untuk kembali ke setpoint setelah gangguan diberikan.

Tabel 4.21 Kombinasi Cepat Terkontrol

Parameter	Tanpa Gangguan	Dengan Gangguan 200 mL
Kp	190	190
Ki	2	2
Kd	20	20
Setpoint	37°C	37°C
Suhu Awal	29°C	29°C
Waktu Mencapai Setpoint Pertama	321 s	321 s
Penurunan Suhu Akibat Gangguan	Tidak ada	37°C → 33°C
Besar Penurunan Suhu	0°C	4°C
Waktu Pemulihan ke Setpoint	Tidak ada	±34 s
Suhu Maksimum	37°C	37°C
Overshoot	0°C	0°C
Overshoot (%)	0%	0%
Error Steady State	0°C	0°C
Kemampuan Recovery	Tidak diuji	Sangat Baik

1. Dari hasil pengujian, diperoleh nilai rise time (t_r) sebesar 321 detik, yang menunjukkan bahwa sistem memiliki respon yang sangat cepat dalam mencapai set point dibandingkan dengan kombinasi sebelumnya.
2. Nilai overshoot (M_p) yang diperoleh berdasarkan Persamaan (2.3.2) adalah sebesar 0%, yang menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan respon

yang lebih stabil dibandingkan tuning sebelumnya. Sistem berhasil mencapai setpoint tanpa overshoot dan tanpa osilasi.

3. Selanjutnya, nilai settling time (t_s) diperoleh sebesar 321 detik, yang menunjukkan bahwa sistem mampu mencapai kondisi stabil
4. Sedangkan nilai steady-state error (e_{ss}) sebesar 0°C , yang menunjukkan bahwa sistem

Berdasarkan hasil pengujian, parameter PID $K_p=190$, $K_i=2$, dan $K_d=20$ memberikan performa terbaik dibandingkan tuning sebelumnya. Sistem mampu mencapai setpoint 37°C dalam waktu 321 detik tanpa overshoot dan tanpa error steady-state. Saat diberikan gangguan berupa penambahan air sebanyak 300 mL, suhu turun hingga 33°C , namun sistem mampu kembali ke setpoint hanya dalam waktu sekitar 32–34 detik. Hasil tersebut menunjukkan bahwa parameter PID yang dipilih memiliki kemampuan disturbance rejection dan kestabilan sistem yang sangat baik, sehingga layak digunakan sebagai parameter akhir pada sistem pengendalian suhu air.

4.3.6 Perbandingan Respon Sistem

Berdasarkan hasil pengujian, peningkatan parameter PID memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kecepatan respon dan kemampuan sistem dalam mengatasi gangguan. Pada kombinasi stabil ($K_p=130$, $K_i=1$, $K_d=15$), sistem mampu mencapai setpoint dengan karakteristik respon yang cukup stabil, namun membutuhkan waktu yang relatif lama yaitu 505 detik dengan settling time mencapai 850 detik. Selain itu masih terjadi overshoot sebesar 5,4% dan waktu pemulihan setelah gangguan mencapai 350 detik.

Tabel 4.22 Perbandingan Respon Sistem

Parameter	Kombinasi	Kombinasi	Kombinasi Cepat
	Stabil	Optimal	Terkontrol
K_p	130	150	190
K_i	1	1	2
K_d	15	15	20

Setpoint	37°C	37°C	37°C
Rise Time	505 s	440 s	321 s
Settling Time	850 s	650 s	321 s
Overshoot	2°C	2°C	0°C
Overshoot (%)	5,4%	5,4%	0%
Error Steady State	1°C	Mendekati 0°C	0°C
Penurunan Suhu Akibat Gangguan	3°C	4°C	4°C
Waktu Recovery	350 s	320 s	32–34 s
Stabilitas	Baik	Baik	Sangat Baik
Disturbance Rejection	Baik	Baik	Sangat Baik

Pada kombinasi optimal ($K_p=150$, $K_i=1$, $K_d=15$), respon sistem menjadi lebih cepat dengan rise time 440 detik dan settling time 650 detik. Meskipun demikian, overshoot sebesar 5,4% masih terjadi sehingga performa sistem belum sepenuhnya optimal.

Sementara itu, kombinasi cepat terkontrol ($K_p=190$, $K_i=2$, $K_d=20$) memberikan performa terbaik. Sistem mampu mencapai setpoint dalam waktu 321 detik dengan settling time yang sama, tanpa mengalami overshoot maupun error steady-state. Ketika diberikan gangguan berupa penambahan air, sistem dapat kembali ke setpoint hanya dalam waktu sekitar 32–34 detik. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi tersebut memiliki kemampuan disturbance rejection dan kestabilan yang lebih baik dibandingkan kombinasi lainnya.

4.3 Pembahasan Hasil Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengetahui pengaruh perubahan parameter PID terhadap performa sistem pengendalian suhu air. Parameter yang diamati meliputi rise time, settling time, overshoot, steady-state error, serta kemampuan sistem dalam mengatasi gangguan berupa penambahan volume air.

Berdasarkan hasil pengujian, kombinasi pertama dengan parameter $K_p = 130$, $K_i = 1$, dan $K_d = 15$ menghasilkan respon sistem yang relatif stabil. Sistem

mampu mencapai setpoint 37°C tanpa osilasi yang berlebihan, namun membutuhkan waktu yang cukup lama yaitu sekitar 505 detik untuk mencapai setpoint pertama. Selain itu, sistem masih mengalami overshoot hingga mencapai suhu maksimum 39°C atau sebesar 5,4% dari setpoint. Ketika diberikan gangguan berupa penambahan air, suhu turun hingga 34°C dan membutuhkan waktu pemulihan sekitar 350 detik untuk kembali mencapai setpoint. Hal ini menunjukkan bahwa nilai proportional gain yang digunakan masih relatif kecil sehingga respon sistem menjadi lambat.

Pada kombinasi kedua dengan parameter $K_p = 150$, $K_i = 1$, dan $K_d = 15$, terjadi peningkatan kecepatan respon sistem. Setpoint dapat dicapai dalam waktu sekitar 440 detik, lebih cepat dibandingkan kombinasi sebelumnya. Settling time juga mengalami penurunan menjadi sekitar 650 detik. Meskipun demikian, sistem masih mengalami overshoot sebesar 5,4% dengan suhu maksimum mencapai 39°C . Saat diberikan gangguan berupa penambahan air, suhu turun hingga 33°C dan mampu kembali ke setpoint dalam waktu sekitar 320 detik. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan nilai K_p mampu mempercepat respon sistem, namun masih menimbulkan kecenderungan overshoot karena aksi kontrol menjadi lebih agresif.

Pada kombinasi ketiga dengan parameter $K_p = 190$, $K_i = 2$, dan $K_d = 20$ diperoleh performa terbaik dibandingkan kombinasi sebelumnya. Sistem mampu mencapai setpoint dalam waktu 321 detik dengan settling time yang sama, sehingga menunjukkan respon yang paling cepat. Selain itu, sistem tidak mengalami overshoot maupun steady-state error. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi nilai proportional, integral, dan derivative yang digunakan mampu menghasilkan keseimbangan antara kecepatan respon dan kestabilan sistem. Ketika diberikan gangguan berupa penambahan air, suhu turun dari 37°C menjadi 33°C , namun sistem mampu kembali ke setpoint hanya dalam waktu sekitar 32–34 detik. Waktu pemulihan yang sangat singkat menunjukkan bahwa sistem memiliki kemampuan disturbance rejection yang sangat baik.

Secara umum, peningkatan nilai K_p menyebabkan sistem merespon perubahan error dengan lebih cepat sehingga waktu pencapaian setpoint menjadi lebih singkat. Penambahan nilai K_i membantu menghilangkan error pada kondisi

tunak sehingga steady-state error dapat diminimalkan. Sementara itu, peningkatan nilai K_d berfungsi meredam perubahan yang terlalu cepat sehingga overshoot dapat ditekan. Hal ini terlihat pada kombinasi $K_p = 190$, $K_i = 2$, dan $K_d = 20$ yang berhasil menghilangkan overshoot dan menghasilkan respon yang lebih stabil dibandingkan kombinasi lainnya.

Berdasarkan seluruh hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa kombinasi parameter PID $K_p = 190$, $K_i = 2$, dan $K_d = 20$ merupakan parameter yang paling optimal untuk sistem pengendalian suhu air yang dirancang. Kombinasi tersebut memberikan waktu pencapaian setpoint tercepat, tidak menghasilkan overshoot, memiliki error steady-state sebesar 0°C , serta mampu memulihkan suhu dengan cepat ketika terjadi gangguan pada sistem. Dengan demikian, parameter tersebut layak digunakan sebagai parameter akhir dalam implementasi sistem kontrol suhu air berbasis PID pada penelitian ini.