

BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISA ALAT

5.1 Pengukuran dan Pengujian

Dalam rangka menjamin efektivitas dan keandalan operasional sistem pengering helm otomatis, telah dilaksanakan serangkaian prosedur pengukuran dan pengujian yang terstruktur. Pada sistem pengendali suhu pada alat pengering helm otomatis disini menggunakan batas kelembapan 40% RH untuk menyatakan helm telah kering, dan menggunakan suhu 50°C sebagai setpoint untuk menghindari helm dari resiko kerusakan. Prosedur validasi ini mencakup verifikasi aspek fungsionalitas sistem secara keseluruhan, pelaksanaan kalibrasi sensor untuk menjamin akurasi pembacaan parameter lingkungan, serta analisis konsistensi data yang dihasilkan oleh perangkat selama pengoperasian. Dengan demikian, pengujian ini bertujuan untuk mengonfirmasi bahwa sistem mampu berfungsi sesuai rancangan dengan tingkat presisi dan reliabilitas yang tinggi.

5.2 Tujuan Parameter Pengujian

Pengujian sistem dilaksanakan untuk memvalidasi bahwa sistem pengendalian suhu pada kotak pengering helm, yang diimplementasikan menggunakan mikrokontroler Arduino Uno dengan algoritma kontrol PID dapat beroperasi secara optimal sesuai spesifikasi rancangan. Fokus utama dari rangkaian pengujian ini adalah untuk mengevaluasi akurasi dan stabilitas sistem dalam mempertahankan suhu di dalam kotak agar senantiasa mendekati nilai setpoint yang telah ditentukan. Selain itu, pengujian juga bertujuan untuk memastikan respon otomatis dari aktuator, yaitu PTC Heater dan kipas angin yang berfungsi dengan tepat dalam menanggapi fluktuasi suhu dan kelembapan yang terdeteksi di dalam kotak pengering.

Pengujian ini berfokus pada evaluasi beberapa parameter kunci untuk memverifikasi kinerja optimal sistem pengering helm otomatis:

1. Parameter Suhu

Mengetahui akurasi pengukuran suhu, di mana data suhu yang diperoleh dari Sensor DHT22 dibandingkan dengan pembacaan dari alat ukur Thermo-Hygrometer standar sebagai pembanding akurasi.

2. Parameter Waktu dari Tiap Tuning PID

respons waktu sistem yang dianalisis melalui variasi nilai konstanta tuning dari kontroler PID (K_p , K_i , dan K_d). Tujuannya adalah untuk mengidentifikasi kombinasi nilai yang menghasilkan respons paling cepat dan stabil terhadap perubahan suhu menuju nilai setpoint.

2. Parameter Efektivitas Sistem

Parameter efektivitas sistem diuji untuk menentukan perbandingan kinerja alat yang dikembangkan dengan sistem konvensional yang sudah ada, serta untuk mengukur durasi waktu pengeringan yang dibutuhkan helm hingga mencapai kondisi kering yang optimal.

5.3 Pengujian Alat

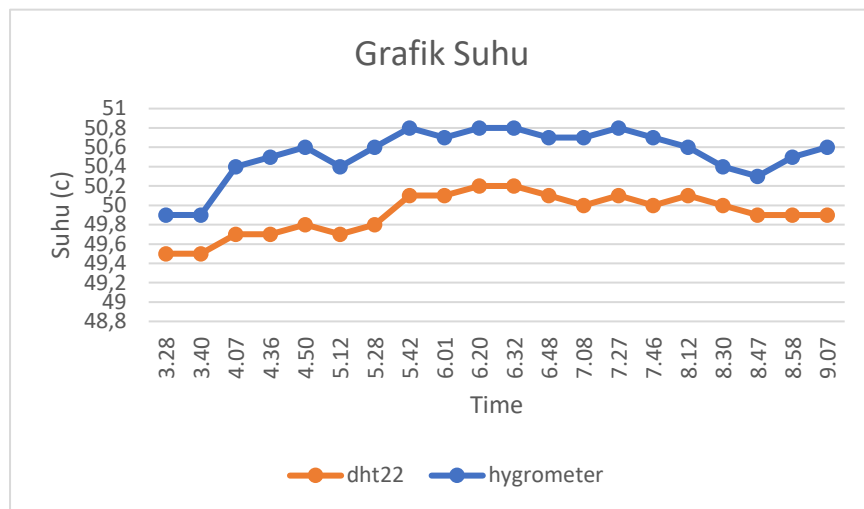
5.3.1 Kalibrasi Sensor DHT22

Pengujian ini secara spesifik bertujuan untuk mengevaluasi tingkat akurasi pembacaan suhu yang diperoleh dari Sensor DHT22 yang terintegrasi pada sistem. Untuk memvalidasi data yang dihasilkan oleh sensor tersebut, dilakukan pengambilan data pembanding menggunakan alat Thermo-Hygrometer standar yang telah terkalibrasi. Perbandingan antara kedua sumber data ini esensial guna memastikan bahwa pengukuran suhu sistem memiliki tingkat presisi dan reliabilitas yang memadai sebelum data tersebut digunakan sebagai masukan bagi algoritma kontrol PID.

Tabel 5. 1 Hasil Pengujian Perbandingan Data Suhu

No	Time	Thermo-Hygrometer	DHT22	Ea = Selisih	Er = Error relatif
1	3.28	49,9	49,5	0,6	1,20
2	3.40	49,9	49,5	0,6	1,20
3	4.07	50,4	49,7	0,7	1,38

No	Time	Thermo-Hygrometer	DHT22	Ea = Selisih	Er = Error relatif
4	4.36	50,5	49,7	0,8	1,58
5	4.50	50,6	49,8	0,8	1,58
6	5.12	50,4	49,7	0,7	1,38
7	5.28	50,6	49,8	0,8	1,58
8	5.42	50,8	50,1	0,7	1,38
9	6.01	50,7	50,1	0,6	1,20
10	6.20	50,8	50,2	0,6	1,20
11	6.32	50,8	50,2	0,6	1,20
12	6.48	50,7	50,1	0,6	1,20
13	7.08	50,7	50	0,7	1,38
14	7.27	50,8	50,1	0,7	1,38
15	7.46	50,7	50	0,7	1,38
16	8.12	50,6	50,1	0,5	0,98
17	8.30	50,4	50	0,4	0,79
18	8.47	50,3	49,9	0,4	0,79
19	8.58	50,5	49,9	0,6	1,20
20	9.07	50,6	49,9	0,7	1,38
Rata rata error					1,26



Gambar 5.1 Grafik Perbandingan Suhu

Hasil pengujian sensor DHT22, setelah dibandingkan dengan Thermo-Hygrometer sebagai alat standar yang digunakan, menunjukkan bahwa perhitungan persentase kesalahan error yang terdapat dalam Tabel 5-1 menunjukkan nilai persentase kesalahan yang diperoleh memberikan indikasi tingkat akurasi dan keandalan sensor DHT22 relatif terhadap alat pembanding, dan perhitungannya adalah sebagai berikut:

Persamaan rumus galat absolute (selisih)

$$Ea = |Xi - Xp|$$

Persamaan rumus rata-rata galat relatif

$$Er = \frac{Ea}{Xp} \times 100 = \frac{|Xi - Xp|}{Xp} \times 100$$

Dimana:

Ea = galat absolute

Xi = nilai dari sensor DHT22

Er = galat relatif%

xp = nilai dari Thermo-Hygrometer

Berdasarkan data yang didapatkan dengan hasil seperti Tabel 5-1, berikut hasil perhitungan dari persamaan rumus galat absolute dan galat relatif:

Deketahui bahwa:

$$Xi = 49,7$$

$$Xp = 50,4$$

$$Ea = |49,7 - 50,4| = 0,7$$

$$Er = \frac{0,7}{50,4} \times 100 = 1,38$$

Berdasarkan data hasil pengujian yang dilakukan menunjukkan bahwa rata-rata galat relatif (Er) sensor DHT22 terhadap Thermo-Hygrometer sebesar 1,26%. Nilai ini diklasifikasikan sebagai tingkat kesalahan rendah sehingga dianggap memadai dan dapat diterima untuk diterapkan dalam sistem pegering helm otomatis dengan kontrol PID.

5.3.2 Pengujian Tuning PID pada Box Pengering Helm Otomatis

Pengujian ini berfokus pada proses tuning untuk memperoleh konfigurasi parameter kontrol PID yang paling efektif (Kp, Ki, Kd). Optimalisasi ini diperlukan untuk menjamin bahwa sistem kontrol suhu box pengering helm memiliki respons sistem yang kuat, di mana suhu aktual dapat dengan akurat mencapai dan stabil bertahan di nilai setpoint yang ditentukan. Kinerja yang optimal ditandai dengan minimnya overshoot, waktu stabilisasi yang singkat, dan penghilangan error kondisi tunak.

Proses tuning parameter kontroler PID dilakukan melalui pendekatan eksperimental langsung (trial and error) pada sistem aktual. Prosedur penyesuaian parameter dilakukan secara berurutan, dengan tujuan memaksimalkan kinerja sistem:

1. Pengaturan Kp (Proportional): Percobaan dimulai dengan menetapkan nilai awal untuk parameter Kp. Parameter ini disesuaikan untuk menentukan

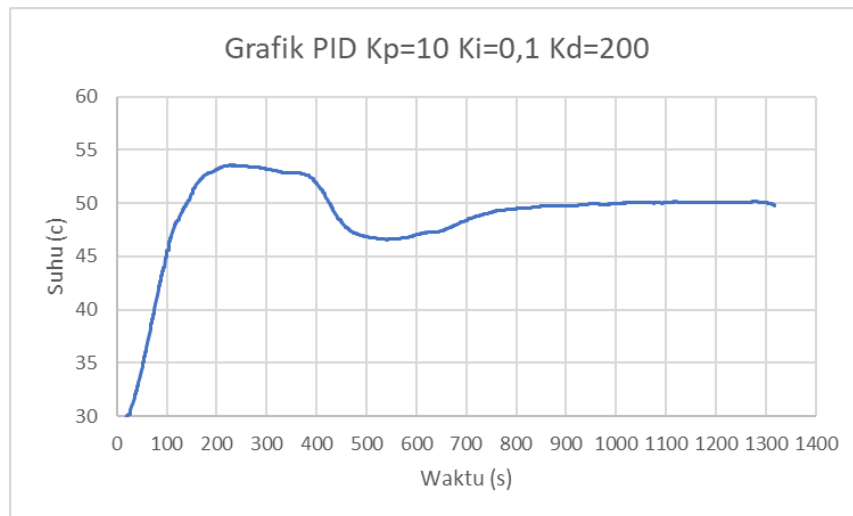
kecepatan respons sistem terhadap perbedaan suhu error dan seberapa cepat suhu aktual dapat mendekati nilai setpoint.

2. Penambahan Ki (Integral): Nilai Ki ditambahkan setelah Kp ditetapkan. Ki berfungsi untuk mengoreksi error kumulatif (integral error), yang secara efektif mengeliminasi steady-state error dan mengurangi deviasi suhu jangka panjang.
3. Penyesuaian Kd (Derivatif): Parameter Kd disesuaikan apabila hasil pengujian menunjukkan adanya lonjakan suhu atau overshoot yang melampaui batas toleransi setpoint. Fungsi Kd adalah untuk meredam laju perubahan (rate of change) error secara mendadak, sehingga mampu mengurangi overshoot dan mempercepat tercapainya kestabilan (settling time) sistem secara keseluruhan.

Hasil dari percobaan tuning PID yang telah dilakukan beberapa kali pada alat pengering helm dihasilkan:

1. Percobaan Tuning PID Pertama

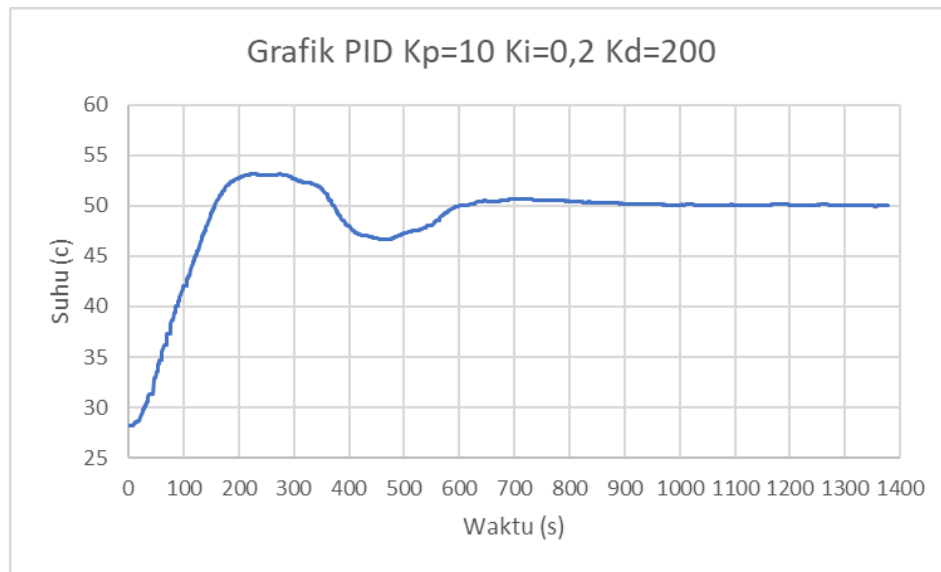
Pada pengujian ini digunakan parameter kontrol PID dengan nilai $K_p = 10$, $K_i = 0,1$, dan $K_d = 200$. Suhu awal sistem berada pada kisaran 30–31 °C. Setelah sistem diaktifkan, suhu meningkat secara cepat hingga mencapai nilai puncak sekitar 53,6 °C, yang menunjukkan terjadinya overshoot sebesar ± 3 °C terhadap setpoint 50 °C. Setelah mencapai suhu maksimum, sistem mengalami penurunan suhu hingga berada di bawah setpoint, yaitu sekitar 46,6 °C, sebelum kemudian kembali meningkat dan secara bertahap mencapai kondisi stabil. Suhu sistem akhirnya stabil pada kisaran 49,8–50 °C setelah waktu sekitar 800–900 detik, dengan fluktuasi yang relatif kecil. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem kontrol PID telah mampu mengoreksi kesalahan suhu dan mempertahankan suhu mendekati setpoint, meskipun masih terdapat respon awal yang kurang halus berupa overshoot dan undershoot. Untuk meningkatkan performa sistem, diperlukan penyesuaian parameter PID, khususnya dengan mengurangi nilai Kd agar efek peredaman tidak terlalu agresif yang menyebabkan penurunan suhu berlebih setelah overshoot.



Gambar 5. 2 Hasil Grafik Tuning PID Pertama

2. Percobaan Tuning PID Kedua

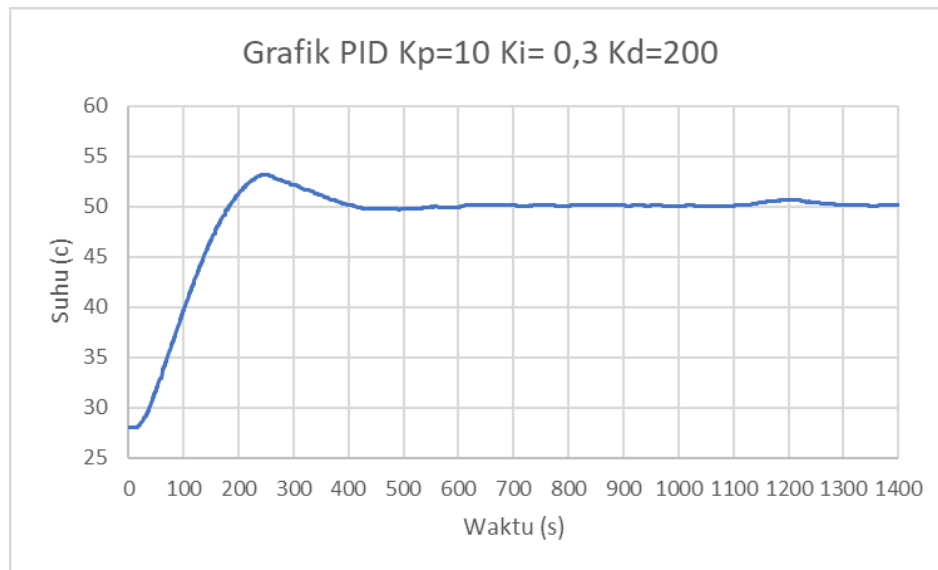
Pada pengujian ini digunakan parameter kontrol PID dengan nilai $K_p = 10$, $K_i = 0,2$, dan $K_d = 200$. Suhu awal sistem berada pada kisaran $29\text{ }^{\circ}\text{C}$. Setelah sistem diaktifkan, suhu meningkat dengan cukup cepat hingga mencapai nilai maksimum sekitar $53,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, yang menunjukkan terjadinya overshoot sebesar $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ terhadap setpoint $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Setelah mencapai suhu puncak, sistem mengalami penurunan suhu hingga berada pada kisaran $46,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, yang menandakan adanya undershoot sebelum suhu kembali meningkat mendekati setpoint. Selanjutnya, suhu sistem secara bertahap mencapai kondisi stabil pada kisaran $49,9\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ setelah waktu sekitar 650–750 detik, dengan fluktuasi yang relatif kecil. Hal ini menunjukkan bahwa sistem kontrol PID telah mampu mengoreksi error suhu dan mempertahankan suhu mendekati setpoint secara stabil. Dibandingkan dengan pengujian sebelumnya, peningkatan nilai K_i menyebabkan respon sistem menjadi lebih cepat dalam menghilangkan error steady-state, namun juga berkontribusi terhadap munculnya undershoot setelah overshoot awal. Untuk memperoleh respon yang lebih optimal, diperlukan penyesuaian lanjutan pada parameter PID, khususnya dengan menurunkan nilai K_i secara bertahap agar respon sistem menjadi lebih halus tanpa menimbulkan osilasi yang berlebihan.



Gambar 5.3 Hasil Grafik Tunning PID Kedua

3. Percobaan Tunning PID Ketiga

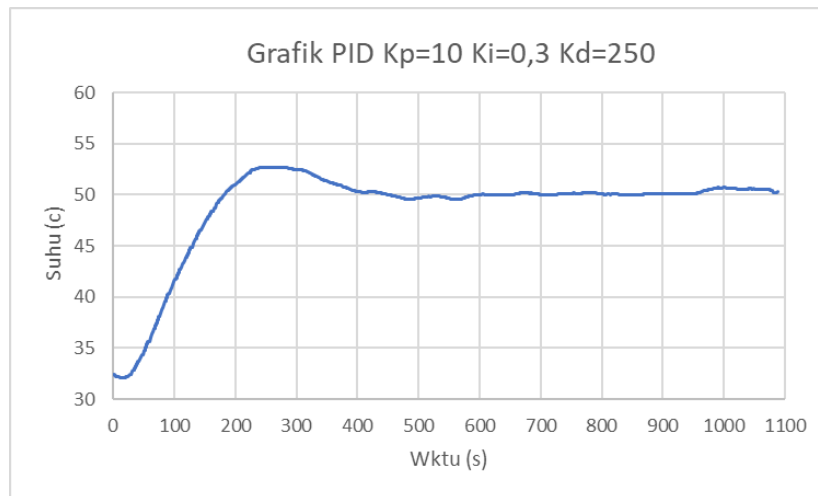
Pada pengujian ini digunakan parameter kontrol PID dengan nilai $K_p = 10$, $K_i = 0,3$, dan $K_d = 200$. Suhu awal sistem berada pada kisaran $28\text{ }^{\circ}\text{C}$. Setelah sistem diaktifkan, suhu meningkat dengan cepat hingga mencapai nilai maksimum sekitar $53,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, yang menunjukkan terjadinya overshoot sebesar $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ terhadap setpoint $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Setelah mencapai suhu puncak, suhu sistem mengalami penurunan secara bertahap dan mendekati setpoint tanpa terjadi undershoot yang signifikan. Suhu kemudian stabil pada kisaran $49,9\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ setelah waktu sekitar 550 detik, dengan fluktuasi yang relatif kecil. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem kontrol PID mampu mencapai setpoint dengan respon yang lebih halus dibandingkan pengujian dengan nilai K_i yang lebih rendah. Peningkatan nilai K_i berguna dalam mempercepat penghilangan error steady-state, sehingga suhu lebih cepat mencapai dan mempertahankan nilai setpoint. Namun, nilai K_i yang terlalu besar berpotensi menimbulkan osilasi atau overshoot yang lebih tinggi. Pada pengujian ini, kombinasi $K_p = 10$, $K_i = 0,3$, dan $K_d = 200$ menunjukkan respon sistem yang relatif optimal, dengan keseimbangan antara kecepatan respon, kestabilan sistem, dan minimnya fluktuasi suhu.



Gambar 5. 4 Hasil Grafik Tuning PID Ketiga

4. Percobaan Tuning Keempat

Pada pengujian ini digunakan parameter kontrol PID dengan nilai $K_p = 10$, $K_i = 0,3$, dan $K_d = 250$. Suhu awal sebesar $32,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, di mana setelah sistem diaktifkan, suhu segera meningkat secara signifikan mencapai titik puncak sekitar $54\text{ }^{\circ}\text{C}$ pada detik ke-250, yang menunjukkan overshoot $\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ terhadap setpoint. Setelah mencapai suhu puncak, suhu sistem mengalami penurunan secara bertahap dan mendekati setpoint tanpa terjadi undershoot yang signifikan. Suhu kemudian stabil pada kisaran $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ setelah waktu sekitar 500 detik. Peningkatan nilai K_d berguna dalam meminimalisir error steady-state, sehingga suhu tidak terlalu overshoot dan mempertahankan nilai setpoint. Secara keseluruhan, meskipun sistem sudah sangat stabil di akhir pengujian, penyesuaian lanjutan pada nilai K_p dan K_i masih diperlukan untuk meminimalisir overshoot awal agar respon suhu dapat mencapai target dengan lebih presisi sejak awal proses.



Gambar 5. 5 Hasil Grafik Tuning PID Keempat

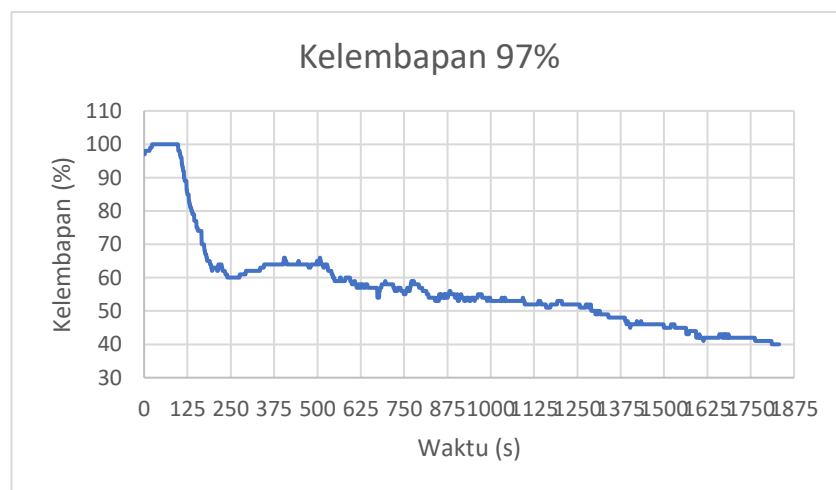
Tabel 5. 2 Hasil Data Percobaan Tuning ke 4

No	Times (s)	Setpoint	Suhu (°C)	Daya Dimmer
1	73	50 °C	37,4 °C	100
2	146	50 °C	46 °C	65
3	219	50 °C	51,5 °C	56
4	292	50 °C	52,7 °C	43
5	365	50 °C	51,2 °C	62
6	438	50 °C	50,3 °C	41
7	511	50 °C	49,7 °C	48
8	584	50 °C	49,7 °C	51
9	657	50 °C	50 °C	48
10	730	50 °C	50 °C	48
11	803	50 °C	50,1 °C	70
12	876	50 °C	50 °C	46
13	949	50 °C	50,1 °C	52
14	1.022	50 °C	50,6 °C	42
15	1.095	50 °C	50,2 °C	40

5.3.3 Pengujian Efektifitas Kerja Alat

Tujuan pengujian efektivitas kerja alat ini adalah untuk memvalidasi kemampuan sistem dalam menurunkan tingkat kelembapan helm secara konsisten, terkendali, dan efisien sesuai dengan parameter kering yang telah ditetapkan. Melalui pengujian ini, kinerja komponen utama seperti sistem pemanas, sirkulasi udara, dan akurasi sensor dipantau untuk memastikan bahwa alat mampu menangani berbagai tingkat kelembapan yang berbeda, mulai dari kondisi sangat lembab hingga lembap ringan dengan pola penurunan yang stabil. Selain itu, pengujian ini bertujuan untuk mengukur efisiensi waktu operasional guna membuktikan bahwa sistem dapat mencapai target kelembapan 40% dalam durasi yang optimal, sehingga menjamin alat layak digunakan sebagai solusi pengeringan helm yang efektif secara fungsional.

1. Pada Kelembapan Awal 97%



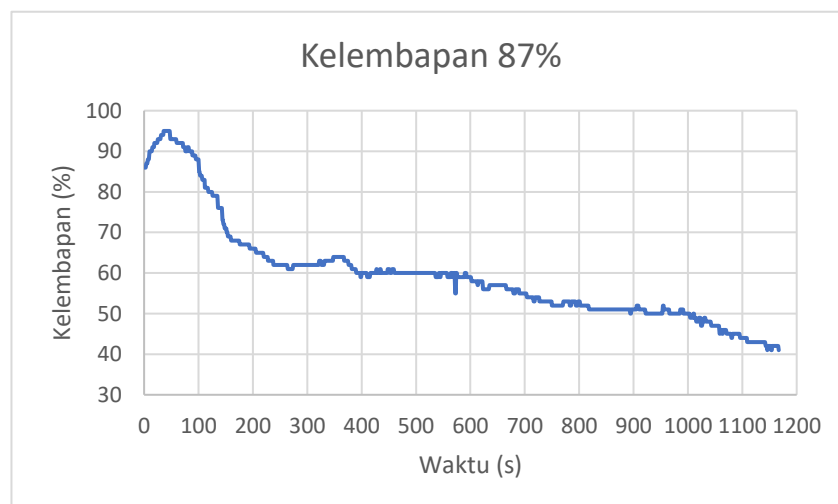
Gambar 5. 6 Grafik Kelembapan Awal 97%

Berdasarkan grafik hasil pengujian diatas, bahwa kelembapan awal sistem berada pada 97%, yang menunjukkan kondisi helm dan ruang pengering masih sangat basah. Pada fase awal pengujian, pada detik 0–250, terjadi penurunan kelembapan yang cukup cepat hingga mencapai 60%. Penurunan

yang tajam ini disebabkan oleh masih banyaknya kandungan air bebas yang mudah menguap ketika sistem pemanas mulai bekerja.

Pada rentang waktu 250–500 detik, kelembapan berfluktuasi di kisaran 60–65%, yang menandakan fase transisi pengeringan ketika air mulai terserap di lapisan busa dan bagian dalam helm sehingga laju penguapan melambat. Fluktuasi ini juga dipengaruhi oleh sirkulasi udara dan respon sensor. Selanjutnya, pada waktu 500–1.800 detik, kelembapan menurun secara bertahap dan stabil dari sekitar 58% hingga 40%, yang menunjukkan fase akhir pengeringan. Secara keseluruhan, sistem membutuhkan waktu sekitar 1.830 detik atau setara dengan 30 menit 30 detik. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem pengering mampu menurunkan kelembapan secara efektif dan terkontrol hingga mencapai batas kelembapan kering yang ditetapkan, sehingga alat dinilai bekerja dengan baik untuk proses pengeringan helm.

2. Pada Kelembapan Awal 86%



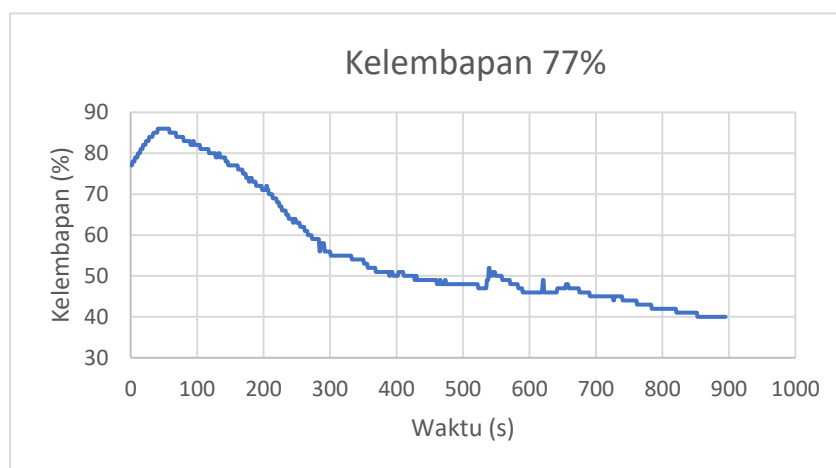
Gambar 5. 7 Grafik Kelembapan Awal 87%

Berdasarkan grafik hasil percobaan diatas, kelembapan awal berada pada kisaran 87%. Pada tahap awal pengeringan, yaitu sekitar 0–150 detik, terjadi penurunan kelembapan yang cukup cepat hingga mencapai sekitar 70%, yang menunjukkan proses penguapan air bebas akibat pemanasan awal. Selanjutnya,

pada rentang 150–400 detik, laju penurunan kelembapan melambat dan cenderung berada di kisaran 60–65%, menandakan fase pengeringan transisi ketika air yang tersisa mulai terikat pada material busa helm.

Setelah melewati fase tersebut, kelembapan menurun secara bertahap dan lebih stabil dari 60% menuju 40%. Berdasarkan grafik, kelembapan mencapai nilai 40% pada waktu sekitar 1.167 detik, atau setara dengan 19 menit 27 detik. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem pengering mampu menurunkan kelembapan helm dari kondisi sangat basah hingga batas kering yang ditetapkan secara efektif dan terkendali.

3. Pada Kelembapan Awal 77%



Gambar 5. 8 Grafik Kelembapan Awal 77%

Berdasarkan grafik hasil percobaan diatas, kelembapan awal helm berada pada kisaran 77%. Pada fase awal pengeringan, sekitar detik ke 0–300 detik, kelembapan menurun cukup cepat hingga mencapai sekitar 56%, yang menunjukkan proses penguapan air bebas akibat pemanasan awal di dalam ruang pengering.

Selanjutnya, pada rentang waktu 200–500 detik, penurunan kelembapan berlangsung lebih lambat dan cenderung stabil di kisaran 50–55%. Kondisi ini menandakan fase pengeringan lanjutan, di mana kandungan air yang tersisa mulai terikat pada material busa helm sehingga laju penguapan menjadi lebih

kecil. Setelah itu, kelembapan kembali menurun secara bertahap dan relatif stabil hingga mencapai 40% pada waktu 895 detik, atau setara dengan 15 menit 55 detik. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem pengering helm mampu menurunkan kelembapan dari kondisi awal sekitar 77% hingga mencapai batas kering 40% secara efektif dengan waktu pengeringan yang relatif lebih singkat dibandingkan kondisi kelembapan awal yang lebih tinggi.

Tabel 5. 3 Data Percobaan Pada Kelembapan Awal 77%

No	Times (s)	Setpoint	Suhu (°C)	Kelembapan (%)
1	55	50 °C	38 °C	86%
2	110	50 °C	48,9 °C	81%
3	165	50 °C	52,8 °C	76%
4	220	50 °C	52,7 °C	68%
5	275	50 °C	52,9 °C	59%
6	330	50 °C	51,7 °C	55%
7	385	50 °C	50,7 °C	51%
8	440	50 °C	49,3 °C	49%
9	495	50 °C	49,6 °C	48%
10	550	50 °C	50 °C	50%
11	605	50 °C	50,1 °C	46%
12	660	50 °C	50 °C	47%
13	715	50 °C	50,1 °C	45%
14	770	50 °C	50,6 °C	43%
15	825	50 °C	50,2 °C	41%
16	880	50 °C	50 °C	40%

5.4 Analisa Sistem

5.4.1 Analisa Sensor DHT22

Berdasarkan hasil pengujian sensor DHT22 dengan membandingkannya terhadap Thermo-Hygrometer sebagai alat ukur acuan, diperoleh nilai rata-rata galat relatif sebesar 1,26%. Nilai galat ini menunjukkan bahwa perbedaan pembacaan suhu antara sensor DHT22 dan alat pembanding berada dalam rentang toleransi yang dapat diterima, mengingat spesifikasi akurasi sensor DHT22 yang berkisar $\pm 0,5$ °C. Rendahnya nilai galat relatif tersebut mengindikasikan bahwa sensor DHT22 memiliki tingkat akurasi dan kestabilan pembacaan yang baik, sehingga layak digunakan sebagai elemen umpan balik dalam sistem kontrol PID pada alat pengering helm otomatis. Keandalan pembacaan sensor ini berperan penting dalam meminimalkan error pengendalian dan mendukung tercapainya kestabilan suhu sesuai setpoint yang ditetapkan.

5.4.2 Analisa Hasil Tuning PID

Rangkaian pengujian tuning PID menunjukkan proses optimasi sistem kontrol suhu yang dilakukan secara bertahap melalui penyesuaian nilai konstanta K_i dan K_d . Pada tiga percobaan pertama, peningkatan nilai konstanta integral secara progresif dari 0,1 menjadi 0,3 terbukti secara signifikan mempercepat waktu stabilisasi sistem dari semula 800–900 detik pada percobaan pertama menjadi hanya 550 detik pada percobaan ketiga. Meskipun nilai $K_p = 10$ yang tetap pada seluruh pengujian menyebabkan terjadinya overshoot awal di kisaran 3-4 °C, peningkatan nilai K_i berhasil menghilangkan undershoot (penurunan suhu di bawah target) yang sebelumnya terjadi pada percobaan pertama dan kedua. Hal ini menunjukkan bahwa peran parameter integral sangat krusial dalam mempercepat penghilangan error steady-state sehingga sistem dapat mencapai dan mempertahankan suhu target dengan lebih efisien. Memasuki percobaan keempat, sistem mencapai performa paling optimal dengan melakukan penyesuaian pada parameter derivatif menjadi $K_d = 250$ dan mempertahankan $K_i = 0,3$. Pada konfigurasi ini, suhu meningkat secara signifikan dari posisi awal 32,4 °C dan mencapai titik puncak sekitar 54 °C pada detik ke-250 sebelum akhirnya melandai

kembali menuju target. Peningkatan nilai K_d memberikan efek peredaman yang lebih kuat, sehingga sistem mampu mengoreksi lonjakan suhu dengan lebih halus dan mencapai kondisi stabil tepat di angka 50 °C dalam waktu hanya 500 detik. Secara keseluruhan, meskipun overshoot awal masih terlihat, kombinasi parameter pada pengujian terakhir memberikan keseimbangan terbaik antara kecepatan respon dan kestabilan jangka panjang dibandingkan pengujian-pengujian sebelumnya.

5.4.3 Analisa Pengujian Efektifitas Kerja Alat

Berdasarkan perbandingan ketiga hasil pengujian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem pengering memiliki kinerja yang konsisten namun durasi operasionalnya sangat dipengaruhi oleh tingkat saturasi air awal pada material helm. Secara keseluruhan, proses pengeringan pada semua percobaan mengikuti pola tiga fase yang serupa, dimulai dengan fase evaporasi cepat pada menit-menit awal di mana air bebas pada permukaan helm menguap secara drastis, diikuti oleh fase transisi yang ditandai dengan fluktuasi atau pelambatan laju penurunan saat air mulai terikat dalam pori-pori busa, dan diakhiri dengan fase stabilisasi menuju target 40%. Efektivitas sistem terlihat jelas dari kemampuan alat dalam memangkas waktu pengeringan seiring dengan lebih rendahnya kelembapan awal; yakni dari 30 menit 30 detik pada kelembapan 97%, menjadi 19 menit 27 detik pada kelembapan 87%, hingga mencapai waktu tercepat 15 menit 55 detik pada kelembapan 77%.

Secara teknis, korelasi linier antara kelembapan awal dan waktu tempuh ini menunjukkan bahwa sistem pemanas dan sirkulasi udara di dalam ruang pengering bekerja secara terkendali dan responsif terhadap beban air yang ada. Meskipun terdapat fluktuasi pada fase transisi akibat respon sensor dan dinamika aliran udara, sistem terbukti mampu mencapai standar kering yang ditetapkan secara efektif di semua kondisi. Hal ini menegaskan bahwa alat pengering helm ini tidak hanya bekerja dengan baik secara fungsional, tetapi juga memiliki tingkat keandalan yang tinggi dalam menangani berbagai tingkat kebasahan helm secara sistematis.