

BAB IV

PENGUJIAN ALAT

Tahap pengujian sistem ialah langkah yang dilakukan setelah proses perancangan dan perakitan alat selesai. Tujuan utama dari pengujian ini ialah untuk memperoleh data percobaan yang dibutuhkan dan memastikan bahwa alat dapat berfungsi secara optimal sesuai dengan yang telah ditentukan. Melalui serangkaian uji coba berulang, kinerja alat akan dievaluasi guna memastikan fungsinya berjalan secara optimal. Melalui serangkaian uji coba yang dilakukan secara berulang ini bertujuan untuk mengidentifikasi performa alat dan menilai apakah alat tersebut bekerja sebagaimana mestinya. Beberapa kali percobaan dilakukan sebagai antisipasi adanya kesalahan atau ketidaksuaian, sehingga hasil yang diperoleh benar-benar mempresentasikan alat Ketika digunakan. Oleh sebab itu tahap pengujian memiliki peran penting dalam menjamin alat dapat beroperasi sesuai harapan perancang.

4.1 Pengujian Komponen

4.1.1 Pengujian Catu Daya

Pengujian catu daya ini bertujuan untuk memastikan bahwa *power supply* memiliki tegangan yang cukup sebelum akan digunakan pada alat. *Power supply* ini akan menjadi sumber daya utama yang akan menyalakan komponen seperti Mikrokontroler Arduino Mega 2560 Pro, motor stepper Nema 17, driver motor *stepper*, dan komponen maupun sensor-sensor lainnya. Untuk menguji *power supply* ini diperlukannya multimeter yang diatur pada mode pengukuran tegangan DC.

Tabel 4.1 Pengujian *Power Supply* menggunakan Multimeter

No	Pengukuran	Tampilan Multimeter
1	Input PLN	235.0
2	Output Power Supply	12.02

Pada pengujian yang telah dilakukan pada Tabel 4.1 digunakannya alat ukur multimeter digital yang difungsikan untuk mengukur tegangan AC dan juga DC. Dalam proses pengujian ini dilakukan dengan menghubungkan *probe* multimeter ke power supply dan dihasilkan pada tegangan AC di angka 235 VAC yang dimana itu masih diangka normal dengan toleransi dari PLN $\pm 10\%$. Pada tegangan DC pun sudah baik yang dimana di angka 12.02 VDC. Dengan tegangan tersebut power supply dapat menyalurkan tegangan yang cukup untuk berjalannya alat yang dibuat.

4.1.2 Pengujian Modul Stepdown LM2596

Pengujian Modul Stepdown LM2596 ini bertujuan untuk mengetahui tegangan yang digunakan sebagai catu daya pada mikrokontroler Arduino Mega 2560 Pro dan juga untuk kebutuhan komponen lainnya yang membutuhkan tegangan 5 volt.

Tabel 4.2 Pengujian Modul Stepdown LM2596 menggunakan Multimeter

No	Pengukuran	Tampilan Multimeter
1	Input Modul Stepdown	11.98
2	Output Modul Stepdown	7.09

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.2 bahwa modul stepdown LM2596 dapat bekerja dengan baik karena menurunkan tegangan ke angka 7 volt yang dimana ini mendekati spesifikasi dan sesuai juga dengan kebutuhan pada alat.

4.1.3 Pengujian Sensor Ultrasonik HC-SR04

Pengujian sensor ultrasonik HC-SR04 dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi sensor dalam mengukur jarak terhadap objek di depannya serta memastikan bahwa sensor bekerja sesuai dengan karakteristik teknisnya. Pengujian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi keandalan sensor dalam mendeteksi objek dalam jarak dekat, khususnya botol plastik yang digunakan dalam sistem daur ulang ini. Sensor HC-SR04 memanfaatkan gelombang

ultrasonik untuk mengukur jarak secara non-kontak dengan tingkat akurasi yang cukup tinggi, yakni ± 3 mm pada kisaran 2–400 cm. Pengujian dilakukan dengan meletakkan objek (botol plastik) pada jarak yang telah diukur menggunakan penggaris atau meteran (sebagai jarak acuan), kemudian dibandingkan dengan hasil pembacaan sensor ultrasonik yang ditampilkan melalui serial monitor Arduino. Pengujian dilakukan sebanyak 4 kali dengan jarak acuan dari 4 cm hingga 15 cm. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh error yang relatif kecil dan masih dalam batas toleransi spesifikasi sensor (± 3 mm), sehingga tidak diperlukan proses kalibrasi tambahan.

Tabel 4.3 Pengujian HC-SR04

No	Jarak Acuan (cm)	Jarak Sensor (cm)	Error (cm)
1	4.0	4.01	0.01
2	7.0	6.9	0.1
3	10.0	10.1	0.1
4	12.0	11.9	0.1
5	15.0	15.03	0.03

Berdasarkan hasil pengujian yang disajikan pada Tabel 4.3, terlihat bahwa error maksimum yang terjadi hanya sebesar 0.10 cm, sementara error minimum sebesar 0.01 cm. Seluruh nilai error ini masih berada dalam batas toleransi spesifikasi sensor, yaitu ± 0.3 cm atau ± 3 mm. Dengan demikian, sensor HC-SR04 yang digunakan dalam sistem ini terbukti memiliki tingkat akurasi yang tinggi dan tidak memerlukan kalibrasi tambahan. Sensor ini dapat diandalkan untuk mendeteksi keberadaan botol plastik dengan presisi yang cukup, sehingga sangat mendukung proses otomasi pada sistem daur ulang filamen.

4.1.4 Pengujian Motor Stepper NEMA 17

Pengujian Motor Stepper NEMA 17 menggunakan driver A4988 ini bertujuan untuk mengetahui besarnya arus yang dibutuhkan saat motor beroperasi, guna memastikan bahwa motor menerima suplai yang cukup untuk bekerja. Pengujian ini penting untuk dapat mengevaluasi kinerja motor serta mencegah terjadinya kelebihan beban atau kekurangan daya yang dapat mempengaruhi keandalan dan juga umur pemakaian motor.

Tabel 4.4 Pengujian Motor Stepper Nema 17

Pengujian	Jarak Penarikan	Step yang Diperlukan
1	1 cm	527
2	1.9 cm	1000
3	4 cm	2106
4	7 cm	3686
5	10 cm	5265

Berdasarkan hasil pada Tabel 4.4, diketahui bahwa jumlah langkah (*step*) yang diperlukan oleh motor stepper NEMA 17 untuk menarik filamen pada jarak tertentu menunjukkan pola yang konsisten dan juga linear. Dimana semakin besar jarak penarikan maka akan semakin banyak juga jumlah step yang di perlukan, dengan rasio *step* per cm yang *relative* konstan yaitu 527 *step/cm*. Hal ini menunjukkan bahwa motor stepper berfungsi dengan baik, dan tidak terjadi kehilangan langkah (*skipped steps*) selama pengujian berlangsung.

4.1.5 Pengujian LCD 16x2

Pengujian LCD 16x2 disini bertujuan untuk mengetahui hasil dari tampilan yang dimana LCD ini digunakan sebagai antarmuka untuk menampilkan suhu yang sedang berjalan pada alat. Pengujian ini dilamukan dengan membuar dan mengupload program pada mikrokontroler Arduino Mega 2560 Pro yang memerintahkan karakter yang akan ditampilkan.

**Gambar 4.1** Hasil Pengujian LCD 16x2

Berdasarkan Gambar 4.1 karakter yang diberikan pada perintah program dapat tertampilkan pada LCD 16x2 yaitu *temperature* saat ini dan juga status kerja alat. Dapat disimpulkan bahwa LDC 16x2 dapat bekerja dengan baik sebagai antarmuka dari alat ini.

4.1.6 Pengujian SSR-25DD dengan PWM

Pada pengujian SSR-25DD ini bertujuan untuk mengetahui kinerja dari Solid State Relay (SSR) tipe SSR-25DD dalam mengendalikan daya ke elemen pemanas (*heatblock*) dengan metode *Pulse Width Modulation* (PWM). SSR-25DD ini merupakan SSR DC ke DC yang bekerja secara digital ON/OFF sesuai dengan sinyal PWM yang diberikan dari mikrokontroler. Pengujian ini bertujuan untuk melihat sejauh mana SSR dapat mengatur tegangan rata-rata yang disalurkan ke pemanas.

Tabel 4.5 Pengujian SSR-25DD dengan PWM

Pengujian	Nilai PWM	Tegangan Rata-Rata (V)
1	10%	1.10
2	20%	2.38
3	50%	6.02
4	70%	8.39
5	90%	10.78

Pada Tabel 4.5 diatas menunjukkan hasil SSR-25DD dalam mengendalikan tegangan yang disalurkan ke elemen pemanas (*heatblock*) dengan menggunakan sinyal PWM dari mikrokontroler. Pengujian ini dilakukan dengan memberi 3 variasi sinyal PWM, yaitu 10%, 20%, 50%, 70% dan 90%, lalu diukur tegangan rata-rata (*average voltage*) yang tersalurkan ke heater dengan menggunakan multimeter pada mode DC *Average*.

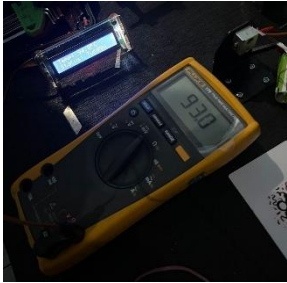
Hasil dari pengujian ini menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai PWM yang diberikan, maka tegangan rata-rata yang diterima oleh pemanas juga meningkat. Hal ini sesuai dengan prinsip kerja PWM, dimana dengan peningkatan

duty cycle akan meningkatkan waktu SSR berada dalam kondisi ON, sehingga energi yang tersalurkan semakin besar. Pengukuran ini dilakukan dengan mengaktifkan masing-masing PWM hingga pembacaan multimeter menunjukkan angka yang stabil dan tidak berubah signifikan. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa SSR-25DD mampu bekerja secara baik dalam meneruskan sinyal PWM menjadi control tegangan yang Proporsional terhadap pemanas.

4.1.7 Pengujian Sensor Suhu Thermistor NTC 100K

Pengujian sensor Thermistor NTC 100K ini bertujuan untuk mengevaluasi keakuratan pembacaan suhu dari thermistor NTC 100K yang digunakan dalam system pengendalian suhu pemanas. Untuk memverifikasi kinerjanya, dilakukan pengukuran suhu menggunakan multimeter digital fluke 179 yang telah dilengkapi dengan sensor termokopel, sehingga memungkinkan pembacaan suhu secara langsung dalam satuan derajat celcius ($^{\circ}\text{C}$).

Tabel 4.6 Pengujian Sensor Suhu Thermistor NTC 100K

Pengujian	Suhu di LCD ($^{\circ}\text{C}$)	Suhu di Fluke 179 ($^{\circ}\text{C}$)	Selisih	Dokumentasi Gambar
1	28.3	28.1	0.2	
2	94.0	93.0	1.0	

Pengujian	Suhu di LCD (°C)	Suhu di Fluke 179 (°C)	Selisih	Dokumentasi Gambar
3	124.9	123.5	1.4	
4	209.2	210.9	1.7	

Pada Tabel 4.6 diatas menampilkan hasil pengujian sensor suhu Thermistor NTC 100K. Pengujian ini dilakukan dengan membandingkan suhu yang terbaca pada LCD dengsn suhu hasil pengukuran menggunakan multimeter fluke 179 yang dilengkapi dengan fitur pengukuran suhu. Tujuan dari pengujian ini ialah guna mengetahui tingkat akurasi pembacaan suhu oleh thermistor terhadap alat ukur yang lebih presisi.

Sensor Thermistor NTC 100K ini memiliki toleransi akurasi sebesar $\pm 1\%$ danpada pengujian keempat menampilkan bahwa suhu yang terbaca pada LCD ialah 209.2, sedangkan yang terbaca pada fluke 179 ialah 210.9. Selisih antara keduanya berkisar 1.7. Jika dihitung berdasarkan akurasi sensor 1%, maka toleransi maksimum sebagai berikut:

$$1\% \times 210.9\text{ }^{\circ}\text{C} = \pm 2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$$

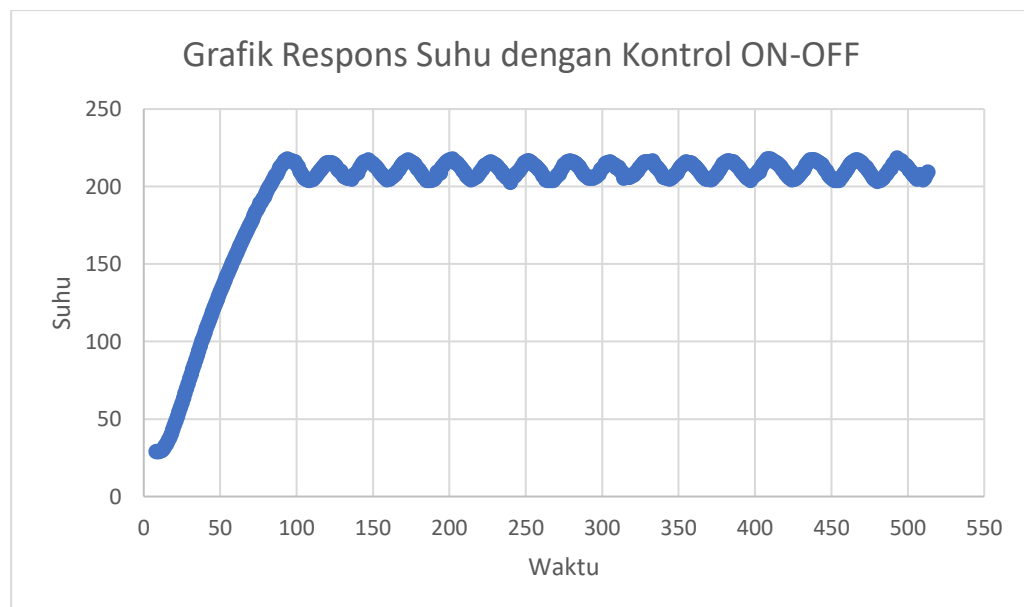
Dengan itu hasil dari pembacaan Thermistor NTC 100K masih berada dalam batas toleransi sensor dan menunjukkan bahwa Thermistor berfungsi secara akurat dan stabil dalam *system* pemngukuran suhu ini.

4.2 Pengujian Sistem Keseluruhan

4.2.1 Pengujian Respons Sistem dengan Kontrol ON-OFF

Pengujian kontrol ON-OFF bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mempertahankan suhu pada nilai setpoint 210°C tanpa menggunakan pengendali PID. Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 4.2, suhu sistem meningkat secara konstan hingga mencapai titik setpoint sekitar detik ke-100. Setelah mencapai nilai tersebut, pemanas otomatis dimatikan. Seiring waktu, suhu mulai menurun akibat pelepasan panas ke lingkungan, dan ketika suhu kembali turun menyentuh 210°C , sistem kembali menyalakan pemanas.

Proses ON dan OFF ini membentuk pola siklus fluktuasi suhu yang relatif konstan, dengan amplitudo getaran berkisar antara $\pm 5^{\circ}\text{C}$ dari nilai setpoint. Sistem tidak mampu mempertahankan suhu secara presisi di satu titik, melainkan bekerja dengan prinsip batas atas dan bawah (histeresis alami), menghasilkan pola osilasi suhu yang berulang. Meskipun respons sistem ini cukup cepat dalam mencapai setpoint, namun ketidakstabilan suhu di sekitar titik target menjadikan metode ON-OFF kurang ideal untuk aplikasi yang membutuhkan kontrol suhu yang presisi, seperti proses pencetakan filamen.



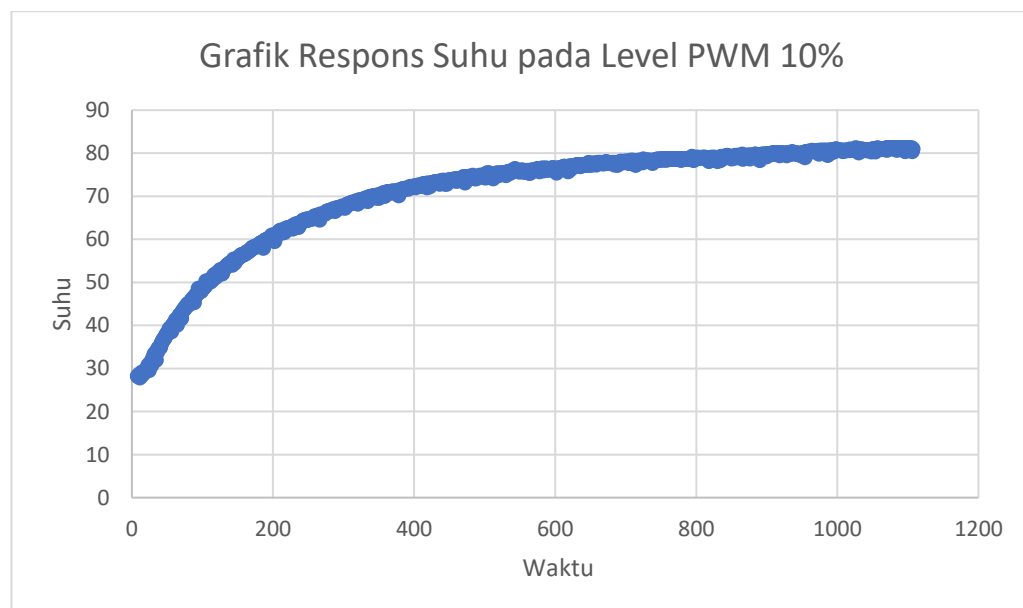
Gambar 4.2 Grafik Respons Suhu dengan Kontrol ON-OFF

4.2.2 Analisis Respons Suhu Sistem Open-Loop terhadap Variasi Nilai PWM

Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi respons sistem pemanas tanpa menggunakan kendali PID, di mana daya diberikan secara langsung melalui sinyal PWM konstan dengan variasi duty cycle dari 10% hingga 100%. Dalam kondisi ini, tidak terdapat mekanisme umpan balik, sehingga suhu akan meningkat terus-menerus sesuai besarnya daya tanpa penyesuaian otomatis terhadap nilai target. Fokus pengujian meliputi laju kenaikan suhu, suhu maksimum yang tercapai, serta waktu yang dibutuhkan untuk mencapai suhu tertentu. Setiap level PWM dianalisis secara terpisah untuk mengamati pengaruhnya terhadap karakteristik pemanasan sistem secara keseluruhan.

Berikut merupakan grafik hasil pengujian respons suhu sistem open-loop pada 10 variasi nilai PWM dari 10% hingga 100%:

- PWM 10%



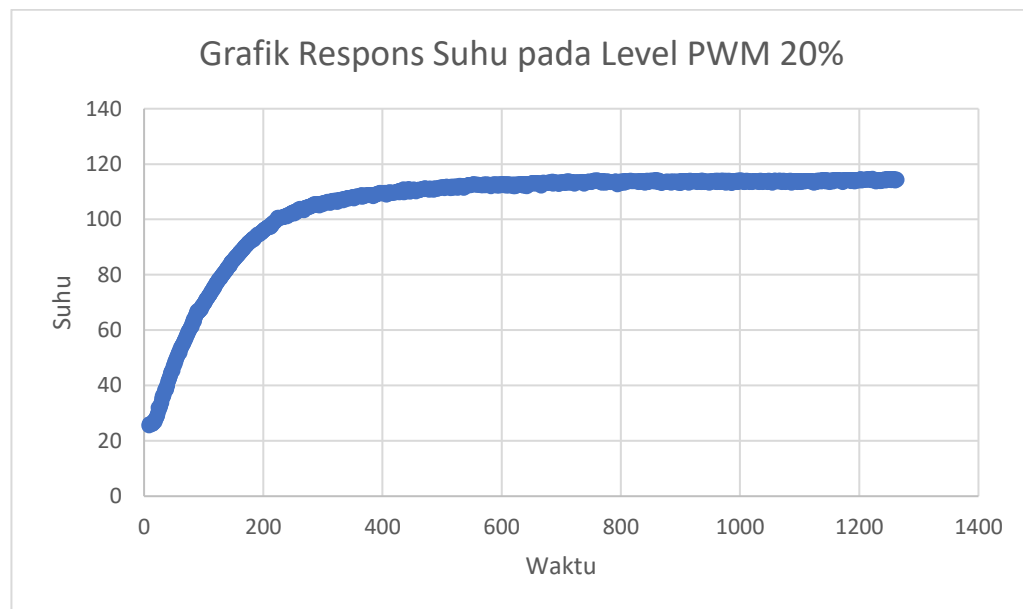
Gambar 4.3 Grafik Respons Suhu Sistem *Open-Loop* pada PWM 10%

Pada pengujian awal dengan level PWM sebesar 10%, sistem menunjukkan peningkatan suhu yang sangat lambat. Berdasarkan Gambar 4.3, suhu mulai dari sekitar 28°C dan hanya mampu mencapai sekitar 80°C dalam waktu hampir 1200 detik. Kurva suhu cenderung landai dengan laju pemanasan

yang rendah, menandakan bahwa daya yang diberikan tidak cukup untuk mencapai suhu tinggi dalam waktu yang wajar.

Selain itu, kestabilan suhu setelah mencapai nilai maksimum juga masih rentan terhadap fluktuasi kecil. Meskipun grafik terlihat mulus, kecepatan pencapaian steady-state sangat lambat dan kurang efisien untuk proses pencairan plastik. Kondisi ini menunjukkan bahwa level PWM 10% belum memadai digunakan dalam sistem pemanas tanpa kendali umpan balik (*open-loop*) untuk mencapai suhu kerja ideal.

- PWM 20%

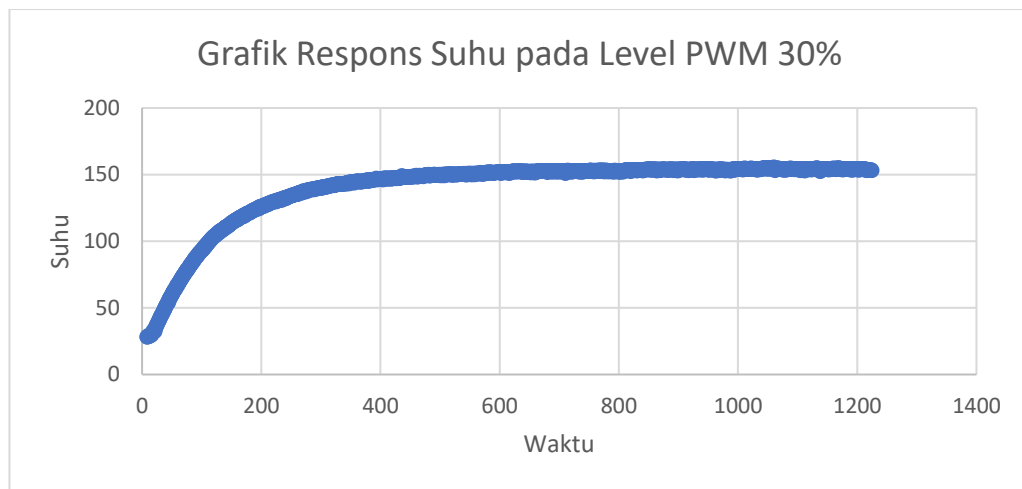


Gambar 4.4 Grafik Respons Suhu Sistem *Open-Loop* pada PWM 20%

Pengujian pada PWM 20% menunjukkan peningkatan signifikan dibandingkan PWM 10%. Berdasarkan Gambar 4.4, suhu berhasil mencapai sekitar 114°C dalam waktu sekitar 1200 detik. Kurva suhu memperlihatkan laju peningkatan yang lebih tajam di awal dan kemudian melandai setelah mencapai suhu mendekati titik stabil.

Peningkatan ini menunjukkan bahwa penambahan daya mulai berdampak pada efisiensi pemanasan. Namun, suhu yang dicapai masih berada di bawah suhu kerja ideal untuk proses pelelehan filamen, sehingga level ini juga belum cukup optimal jika digunakan secara open-loop tanpa kontrol PID.

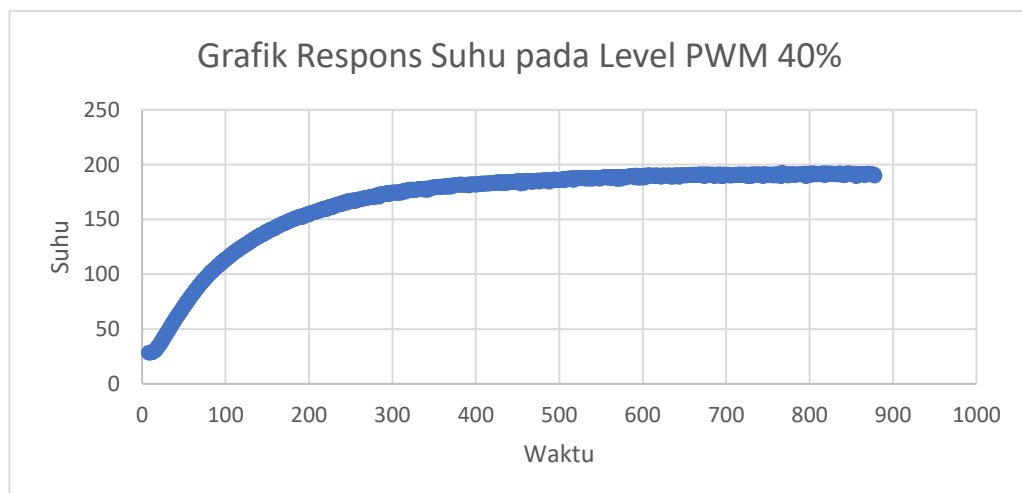
- PWM 30%



Gambar 4.5 Grafik Respons Suhu Sistem *Open-Loop* pada PWM 30%

Pada PWM 30%, sistem menunjukkan kemampuan mencapai suhu sekitar 155°C seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.5. Peningkatan suhu berlangsung lebih cepat dan mulai menunjukkan karakteristik mendekati sistem pemanas yang efisien. Kurva terlihat menanjak tajam hingga sekitar 300 detik pertama, lalu perlahan melandai. Meski belum mencapai suhu target utama (210°C), respons pada level ini menunjukkan bahwa sistem mulai menunjukkan performa yang layak untuk mendekati zona suhu kerja. Level PWM ini dapat dianggap sebagai batas bawah efektif sistem dalam mode open-loop, meski tetap belum ideal tanpa kontrol tambahan.

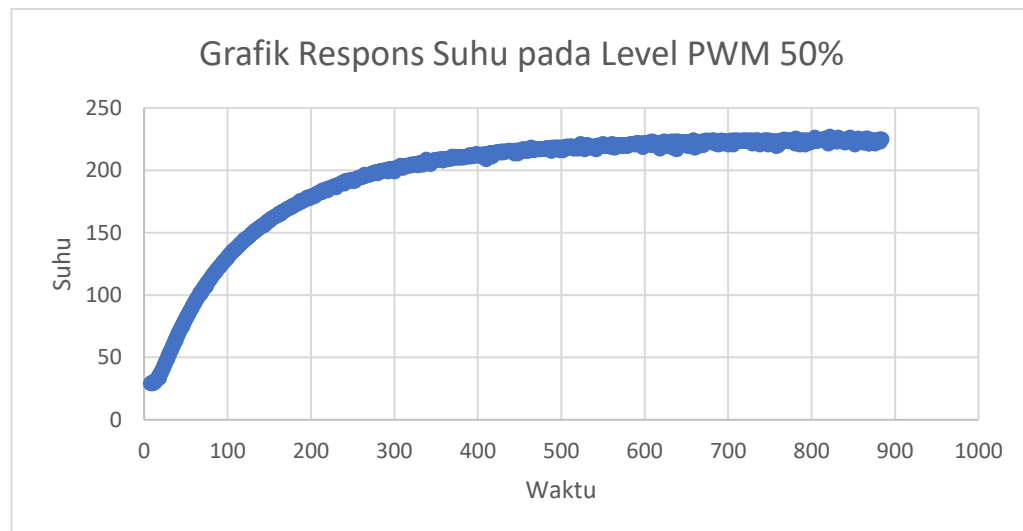
- PWM 40%



Gambar 4.6 Grafik Respons Suhu Sistem *Open-Loop* pada PWM 40%

Hasil pengujian pada level PWM 40% menunjukkan bahwa suhu mampu mencapai nilai sekitar 190°C seperti terlihat pada Gambar 4.6. Kurva menunjukkan peningkatan suhu yang stabil hingga sekitar 500 detik, kemudian mulai datar mendekati steady-state. Hal ini menunjukkan bahwa daya yang diberikan sudah hampir cukup untuk mencapai suhu kerja minimum. Dengan pencapaian suhu yang hampir mendekati 200°C , level ini bisa menjadi batas minimal yang layak digunakan jika tidak ada kendali PID. Namun, ketidakmampuan untuk mencapai dan mempertahankan suhu di atas 200°C tetap menjadi kendala untuk proses pencairan plastik secara optimal.

- PWM 50%

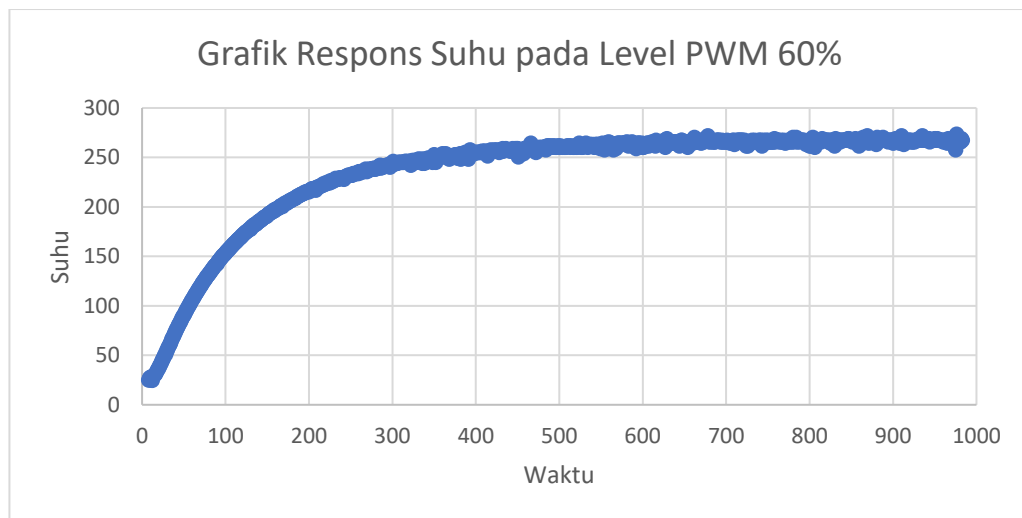


Gambar 4.7 Grafik Respons Suhu Sistem *Open-Loop* pada PWM 50%

Pengujian dengan PWM 50% memberikan hasil yang cukup baik, di mana suhu mampu naik hingga sekitar 225°C seperti terlihat pada Gambar 4.7. Kurva suhu menunjukkan respons yang cepat, dengan pencapaian steady-state terjadi kurang dari 900 detik. Sistem mulai menunjukkan karakteristik yang mendekati suhu kerja optimal untuk pelelehan plastik.

Namun, tanpa kontrol PID, masih terdapat sedikit fluktuasi pada suhu akhir. Meskipun demikian, level ini bisa dianggap sebagai titik efektif pertama pada sistem open-loop, di mana suhu target minimal (210°C) sudah dapat dicapai dan dipertahankan secara umum.

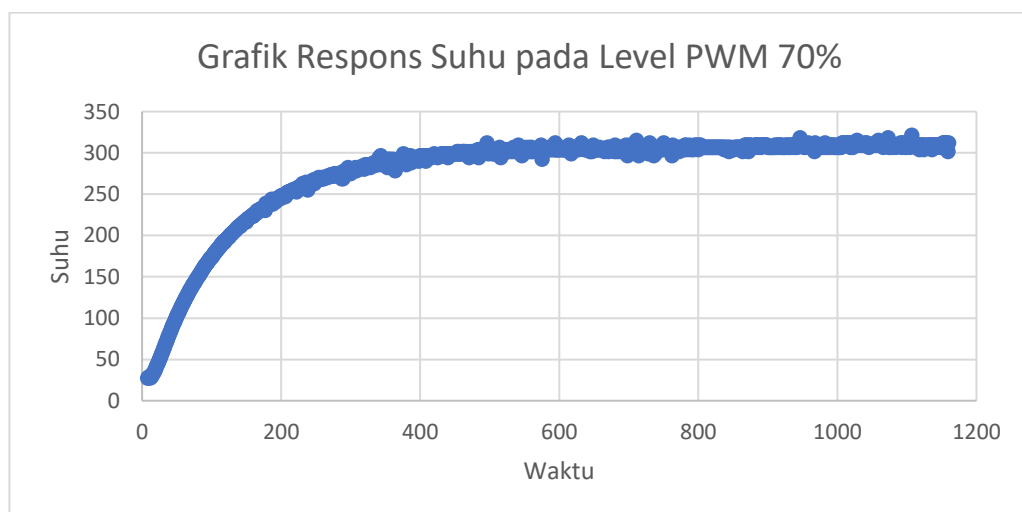
- PWM 60%



Gambar 4.8 Grafik Respons Suhu Sistem *Open-Loop* pada PWM 60%

Level PWM 60% menunjukkan pencapaian suhu yang lebih tinggi, yaitu sekitar 265°C sebagaimana terlihat pada Gambar 4.8. Peningkatan suhu terjadi cukup cepat dan lebih stabil dibanding level sebelumnya. Kurva menunjukkan kestabilan yang lebih baik pada steady-state meskipun sistem masih bekerja dalam mode open-loop. Level ini menunjukkan sistem sudah berada dalam zona kerja yang optimal untuk pelelehan plastik, namun tanpa kontrol PID, masih berisiko overshoot atau fluktuasi suhu yang tidak diinginkan untuk proses produksi yang membutuhkan konsistensi.

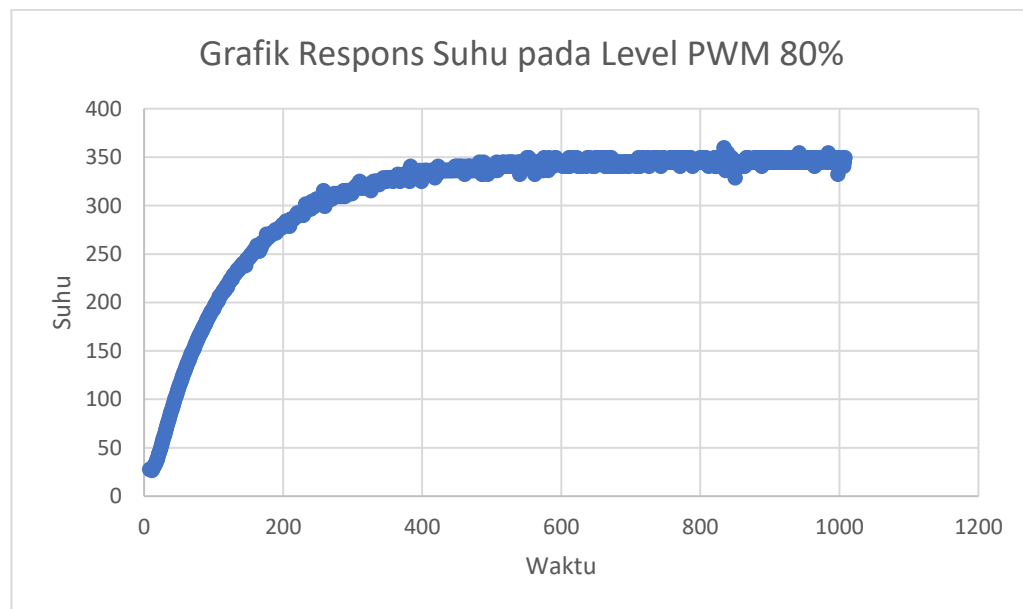
- PWM 70%



Gambar 4.9 Grafik Respons Suhu Sistem *Open-Loop* pada PWM 70%

Berdasarkan Gambar 4.9, suhu sistem dengan PWM 70% mampu mencapai sekitar 310°C. Kurva suhu terlihat cukup tajam di awal dengan pencapaian steady-state yang cepat. Namun, fluktuasi pada akhir kurva mulai meningkat, yang mengindikasikan ketidakstabilan suhu tanpa kendali tertutup. Tingkat suhu ini sudah jauh di atas suhu kerja ideal, yang menandakan bahwa penggunaan daya berlebih tanpa kontrol PID dapat menyebabkan overheating. Oleh karena itu, PWM 70% ke atas memerlukan pengendalian aktif agar suhu tetap berada dalam batas aman.

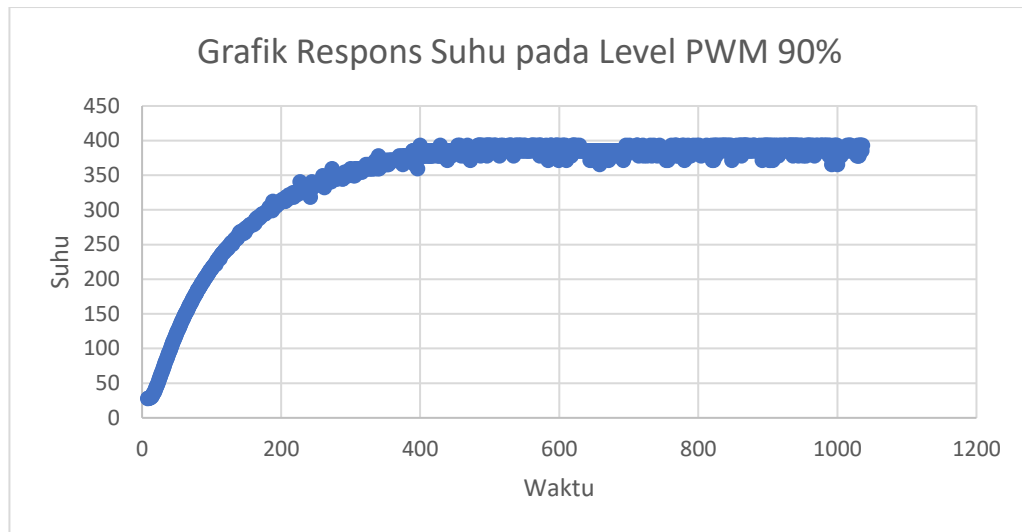
- PWM 80%



Gambar 4.10 Grafik Respons Suhu Sistem *Open-Loop* pada PWM 80%

Dengan level PWM 80%, suhu sistem meningkat hingga sekitar 355°C, sebagaimana terlihat pada Gambar 4.10. Peningkatan suhu sangat cepat dan tidak menunjukkan tanda-tanda berhenti mendekati setpoint tertentu karena sifat open-loop. Meskipun grafik terlihat cenderung stabil, suhu berada jauh di atas batas aman. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mulai terlalu responsif terhadap input daya, sehingga sangat disarankan untuk tidak menggunakan level PWM ini secara berkelanjutan tanpa kontrol PID karena berisiko merusak material atau komponen pemanas.

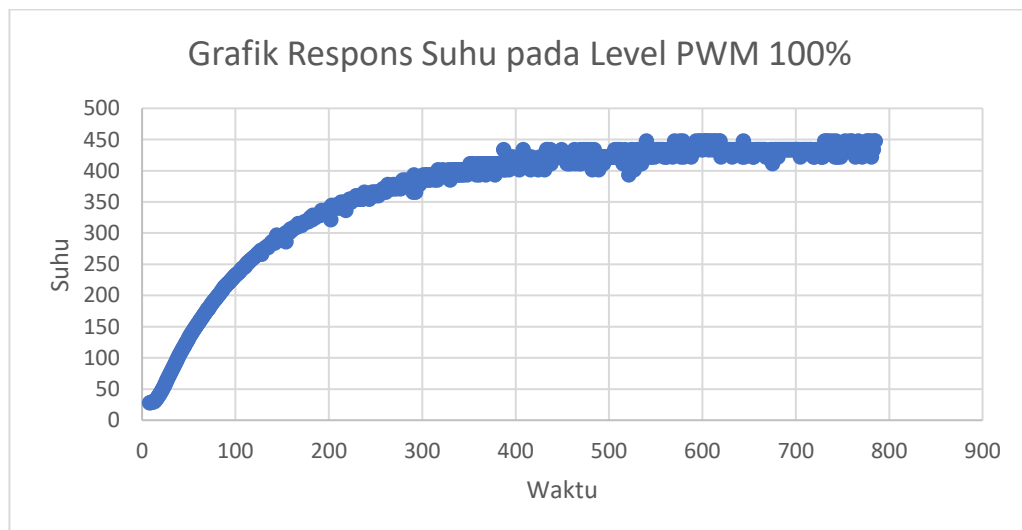
- PWM 90%



Gambar 4.11 Grafik Respons Suhu Sistem *Open-Loop* pada PWM 90%

Pada level PWM 90%, suhu mencapai hampir 400°C seperti yang tampak pada Gambar 4.11. Kenaikan suhu sangat cepat, namun disertai fluktuasi signifikan di akhir kurva. Hal ini menandakan ketidakstabilan yang dapat membahayakan sistem jika dibiarkan dalam waktu lama. Level ini memperkuat temuan bahwa PWM tinggi tanpa kontrol PID sangat berisiko. Selain itu, suhu kerja pada titik ini sudah jauh melebihi kebutuhan proses pelelehan plastik, sehingga efisiensi energi juga menjadi pertimbangan.

- PWM 100%



Gambar 4.12 Grafik Respons Suhu Sistem *Open-Loop* pada PWM 100%

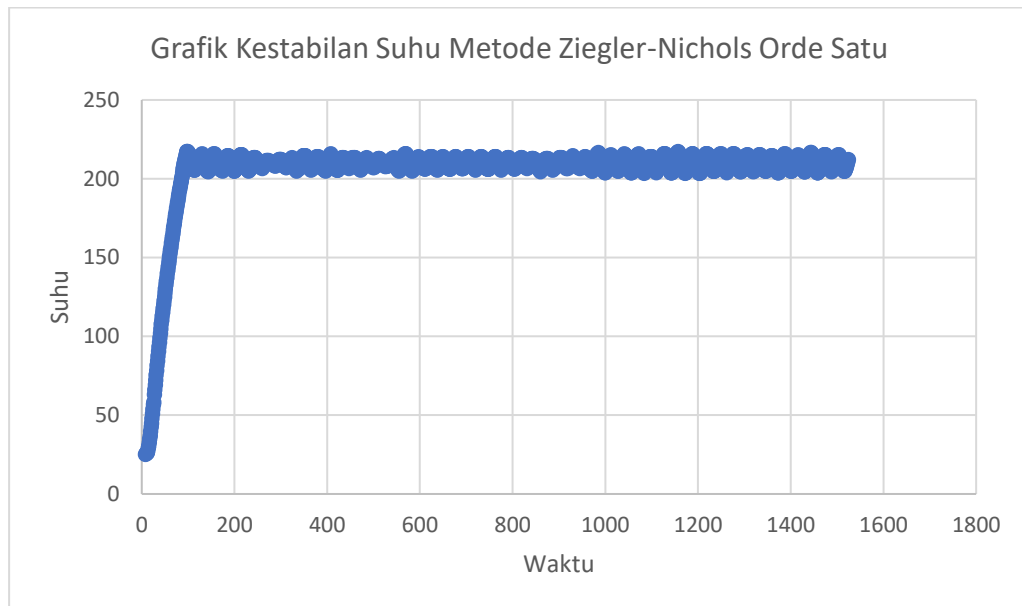
Level tertinggi, PWM 100%, menghasilkan suhu hampir 440°C dalam waktu kurang dari 900 detik (Gambar 4.12). Grafik menunjukkan laju pemanasan yang ekstrem dan tidak menunjukkan titik stabil yang wajar, karena sistem terus menerima daya maksimum. Kondisi ini sangat tidak disarankan untuk digunakan secara terus-menerus karena risiko kerusakan pada pemanas dan hasil produksi yang tidak konsisten. Analisis ini menunjukkan bahwa kendali PID sangat penting agar sistem dapat beroperasi dalam rentang suhu aman dan efisien.

Berdasarkan analisis respons suhu sistem *open-loop*, peningkatan nilai PWM memperkecil time constant dan mempercepat pencapaian suhu setpoint, namun berisiko menimbulkan thermal overshoot dan fluktuasi pada keadaan tunak (*steady-state*). Nilai PWM rendah menghasilkan respons yang stabil tetapi dengan waktu pemanasan yang lama. Dari hasil pengujian, PWM sebesar 60–70% memberikan kompromi terbaik antara kecepatan pemanasan, kestabilan suhu, dan minimnya steady-state error, sehingga direkomendasikan untuk digunakan pada penelitian ini.

4.2.3 Pengujian Parameter PID Melalui Metode Ziegler-Nichols Orde Satu

Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem kendali suhu menggunakan PID dengan metode Ziegler Nichols orde satu. Tujuan dari pengujian ini ialah untuk dapat mengetahui seberapa baik sistem dapat mencapai dan mempertahankan suhu sesuai setpoint 210°C secara stabil dan responsif. Nilai parameter yang digunakan sesuai perhitungan pada sub bab 3.4.4 dengan nilai:

- $K_p = 24$
- $K_i = 2.4$
- $K_d = 60$



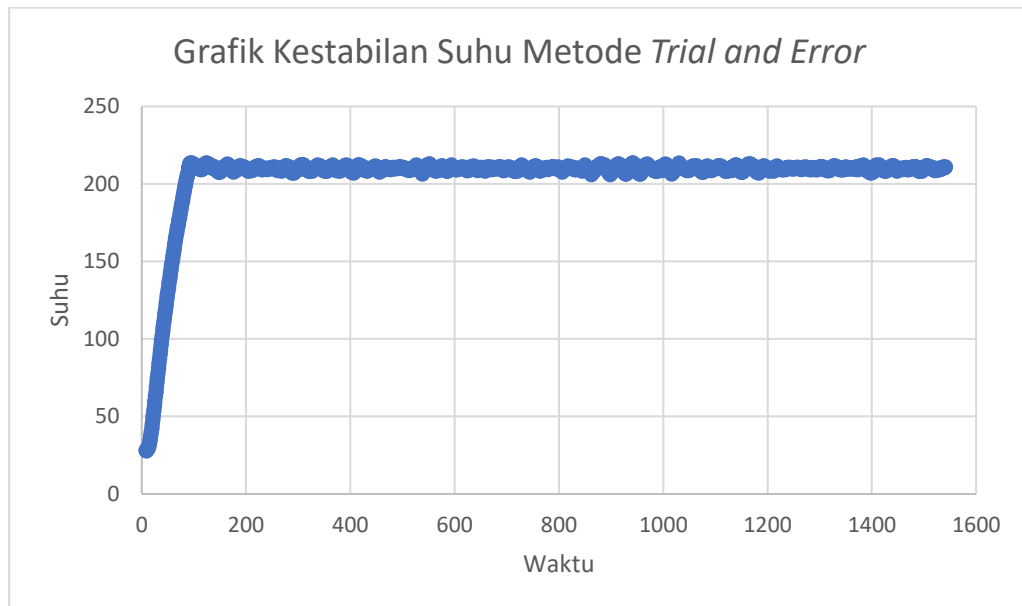
Gambar 4.13 Grafik Kestabilan Suhu Metode Ziegler-Nichols Orde Satu

Berdasarkan Gambar 4.13 yang menampilkan grafik kestabilan suhu menggunakan metode Ziegler Nichols orde satu, sistem mampu mencapai suhu 210°C . Namun, fluktuasi suhu setelah mencapai setpoint cukup tinggi dan tidak stabil. Nilai suhu menunjukkan osilasi $\pm 205^{\circ}\text{C} - 217^{\circ}\text{C}$, yang berarti perlu adanya tuningan lanjutan (*fine tuning*) melalui pendekatan *trial and error* agar dapat mencapai performa optimal dengan fluktuasi suhu yang lebih kecil.

4.2.4 Penyesuaian Parameter PID Melalui Trial and Error

Setelah melakukan implementasi nilai awal dengan metode Ziegler-Nichols, dilakukanlah beberapa pengujian guna menyesuaikan respons system terhadap karakteristik aktual. Hasil dari pengujian menunjukkan bahwa parameter awal menghasilkan respon yang cepat, namun menimbulkan overshoot dan kurangnya kestabilan pada suhu. Melalui proses *trial and error*, nilai parameter PID disesuaikan menjadi:

- $K_p = 22$
- $K_i = 2$
- $K_d = 50$



Gambar 4.14 Grafik Kestabilan Suhu Metode *Trial and Error*

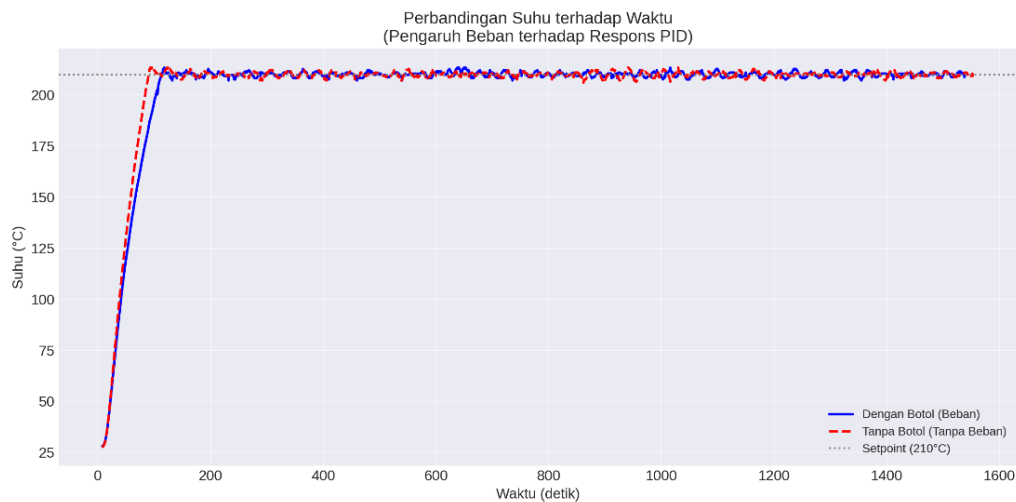
Pada Gambar 4.14 menunjukkan bahwa grafik kestabilan suhu system setelah penerapan PID hasil trial and error dengan nilai $K_p = 22$, $K_i = 2$, $K_d = 50$. Dari grafik dapat dilihat bahwa suhu system naik secara bertahap hingga mencapai setpoint 210 °C, lalu menunjukkan kestabilan dengan osilasi kecil berkisar di 208 °C – 212 °C. Fluktuasi yang sempit ini mengindikasikan bahwa pengendali PID bekerja secara efektif dalam menjaga suhu tetap dekat dengan *setpoint*.

4.2.5 Pengujian Pengaruh Beban (Botol) terhadap Kinerja Pengendali PID

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi respons sistem kendali suhu berbasis PID pada dua kondisi berbeda, yaitu saat sistem dioperasikan dengan beban (botol plastik sebagai material leleh) dan tanpa beban. Beban di sini merujuk pada keberadaan botol plastik yang secara termal memengaruhi distribusi dan laju pemanasan pada hot-end. Evaluasi ini dilakukan untuk mengetahui sejauh mana pengaruh kondisi beban terhadap kestabilan suhu serta efektivitas kontrol PID yang telah disetel sebelumnya dengan parameter $K_p = 22$, $K_i = 2$, dan $K_d = 50$, menggunakan metode Ziegler–Nichols.

Proses pengujian dilakukan dengan mencatat data suhu secara real-time pada kondisi alat yang berjalan tanpa botol dan saat botol dimasukkan dalam

proses. Sistem dikondisikan agar mulai memanaskan hingga mencapai setpoint suhu 210°C . Data direkam menggunakan PLX-DAQ dan dibandingkan melalui grafik untuk melihat karakteristik perubahan suhu terhadap waktu pada masing-masing kondisi.



Gambar 4.15 Grafik Pengaruh Beban (Botol) terhadap Kinerja Pengendali PID

Pada Gambar 4.15 terlihat bahwa sistem tanpa beban (ditandai dengan garis merah putus-putus) memiliki respon pemanasan yang lebih cepat dan halus menuju suhu target. Ini dapat dijelaskan oleh kondisi di mana tidak terdapat penyerapan panas dari material eksternal, sehingga seluruh energi panas dari pemanas langsung menaikkan suhu *hot-end*. Kurva menunjukkan bahwa suhu mendekati 210°C dengan osilasi yang sangat kecil, menandakan bahwa sistem bekerja optimal dalam mempertahankan kestabilan tanpa gangguan termal tambahan.

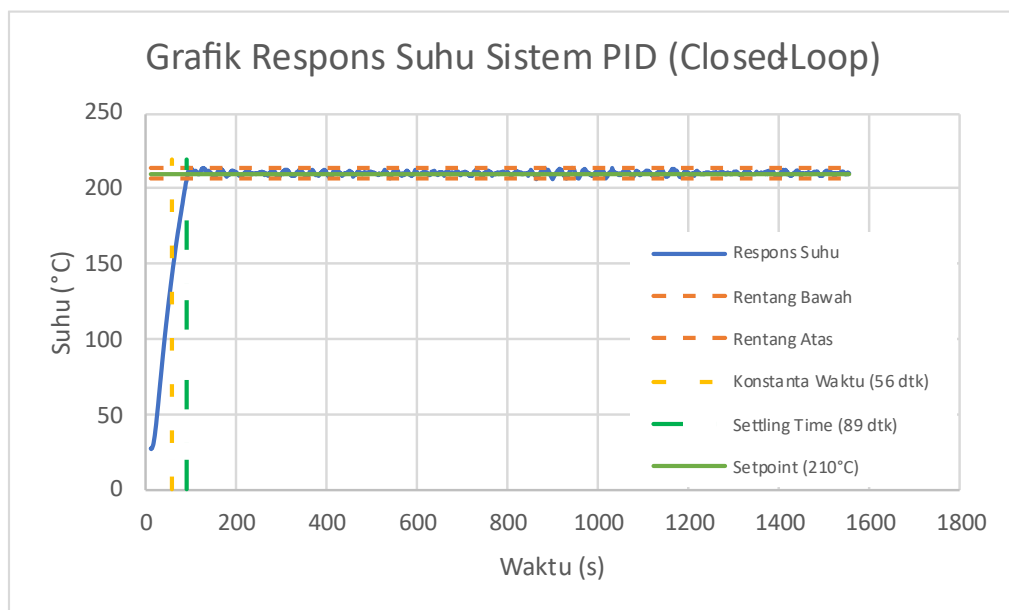
Sebaliknya, pada kondisi sistem dengan botol plastik (ditunjukkan dengan garis biru), laju peningkatan suhu berlangsung lebih lambat pada fase awal dengan konstanta waktu 64 detik dan settling time di 111 detik. Hal ini disebabkan oleh botol plastik yang menyerap panas selama proses pelelehan, menyebabkan sistem membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai suhu target. Selain itu, kurva suhu menunjukkan fluktuasi kecil di sekitar setpoint, yang menandakan bahwa sistem PID bekerja lebih keras untuk menyeimbangkan efek pendinginan akibat kontak termal dengan beban. Meskipun demikian, suhu tetap berhasil

dipertahankan dalam kisaran 208°C hingga 212°C, yang masih berada dalam batas toleransi $\pm 1^\circ\text{C}$ terhadap *setpoint*. Hal ini membuktikan bahwa parameter PID yang digunakan cukup efektif dan responsif terhadap perubahan kondisi fisik sistem.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem PID yang telah dirancang memiliki kinerja yang stabil dan adaptif dalam dua skenario berbeda. Dalam kondisi tanpa beban, sistem mencapai suhu target lebih cepat dan stabil. Sedangkan pada kondisi dengan beban, meskipun terdapat pengaruh penyerapan panas dari material, sistem tetap dapat menyesuaikan diri dan menjaga suhu secara konstan, yang merupakan indikator keberhasilan dari tuning PID yang dilakukan. Hal ini penting dalam konteks proses daur ulang botol plastik menjadi filamen, di mana suhu yang stabil sangat menentukan kualitas hasil akhir.

4.2.6 Analisis Konstanta Waktu dan *Settling Time* pada Sistem PID

Pengujian berdasarkan karakteristik sistem pemanas yang bersifat termal, respons suhu terhadap perubahan input daya cenderung menyerupai sistem orde satu. Oleh karena itu, evaluasi performa sistem PID dilakukan menggunakan dua parameter utama, yaitu konstanta waktu (*time constant*, τ) dan waktu penyesuaian (*settling time*, t_s).



Gambar 4.16 Grafik Respons Suhu Sistem PID Closed-Loop

Dari hasil pengujian sistem PID (Gambar 4.16), saat setpoint suhu diatur pada 210°C, sistem mulai merespons dari suhu awal sekitar 29°C. Suhu mencapai sekitar 63% dari setpoint (yakni $\pm 144^\circ\text{C}$) pada detik ke-56, sehingga konstanta waktu sistem dapat diperkirakan sebesar:

$$\tau \approx 56 \text{ detik}$$

Berdasarkan teori sistem orde satu, waktu penyesuaian (settling time) dapat dihitung menggunakan pendekatan:

$$ts \approx 4\tau = 4 \times 56 = 224 \text{ detik}$$

Namun, berdasarkan grafik respons, suhu sistem mulai stabil dan berfluktuasi dalam rentang toleransi $\pm 1\%$ dari setpoint ($\pm 2.1^\circ\text{C}$ dari 210°C) sekitar detik ke-89, sehingga waktu penyesuaian aktual dapat dinyatakan sebesar:

$$ts \approx 89 \text{ detik}$$

Perbedaan ini menunjukkan bahwa sistem merespons lebih cepat dari estimasi teoritis. Teramati pula adanya keterlambatan awal (*delay*) sekitar 5–7 detik sebelum suhu mulai meningkat secara signifikan. *Delay* ini berasal dari dua faktor utama, yaitu waktu inisialisasi sistem dan latensi dari sensor thermistor serta pemrosesan sinyal PWM oleh mikrokontroler. Secara keseluruhan, sistem menunjukkan performa respons yang baik dengan kestabilan tinggi dan fluktuasi suhu yang rendah, menjadikannya layak digunakan dalam aplikasi daur ulang plastik berbasis kontrol suhu otomatis.

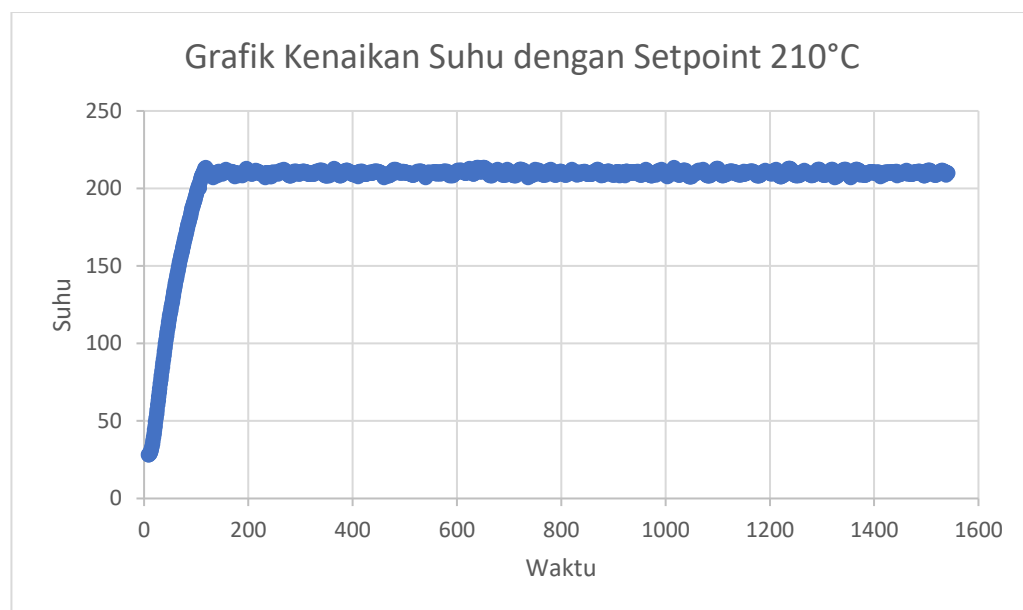
4.2.7 Perbandingan Respons PID dan Kualitas Filamen pada Variasi Setpoint Suhu

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem pengendalian PID pada variasi setpoint suhu antara 210°C hingga 270°C dengan interval 10°C. Parameter yang diamati meliputi waktu pencapaian suhu target, kestabilan suhu setelah mencapai *steady-state*, dan potensi *overshoot*. Seluruh pengujian

menggunakan parameter PID yang berbeda agar dapat mempertahankan *setpoint* lebih baik. Selain mencatat data suhu terhadap waktu, dilakukan juga pengamatan visual terhadap kepadatan filamen yang dihasilkan pada setiap suhu, sebagai indikator awal untuk menilai kualitas hasil pelelehan material.

Berikut grafik hasil pengujian respons PID dan kualitas filamen pada 7 variasi setpoint suhu:

- Setpoint = 210°C



Gambar 4.17 Grafik Kenaikan Suhu dengan Setpoint 210°C

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 4.17 dan data pada Lampiran 2, sistem menunjukkan performa paling optimal pada setpoint 210°C. Suhu mencapai nilai target dalam waktu kurang dari 100 detik, dengan fluktuasi sangat kecil dan tidak terdapat overshoot yang signifikan. Grafik memperlihatkan transisi suhu yang mulus dan stabil pada steady-state. Respons ini menunjukkan bahwa parameter PID sangat sesuai digunakan pada suhu ini, sehingga setpoint 210°C ditetapkan sebagai suhu referensi utama dalam penelitian.

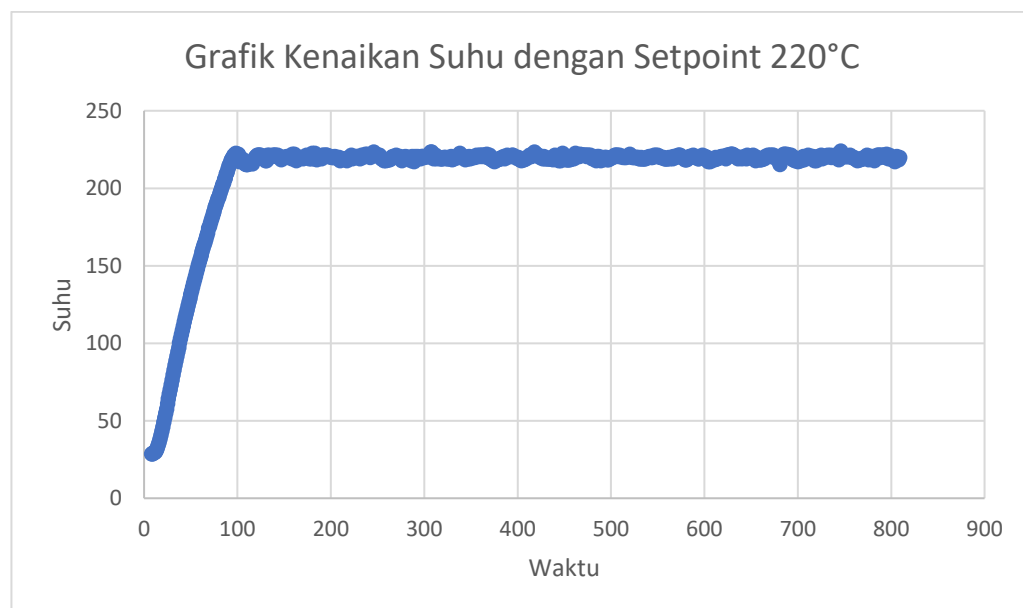
Selain itu, hasil pengamatan terhadap filamen pada setpoint 210°C menunjukkan bentuk yang melingkar dengan lubang di tengah, memiliki tekstur halus, dan konsisten arahnya seperti terlihat pada Gambar 4.18. Material meleleh

dengan baik, sehingga menghasilkan filamen yang secara visual paling stabil dibandingkan setpoint lainnya.



Gambar 4.18 Hasil Filamen ketika Setpoint 210°C

- Setpoint = 220°C



Gambar 4.19 Grafik Kenaikan Suhu dengan Setpoint 220°C

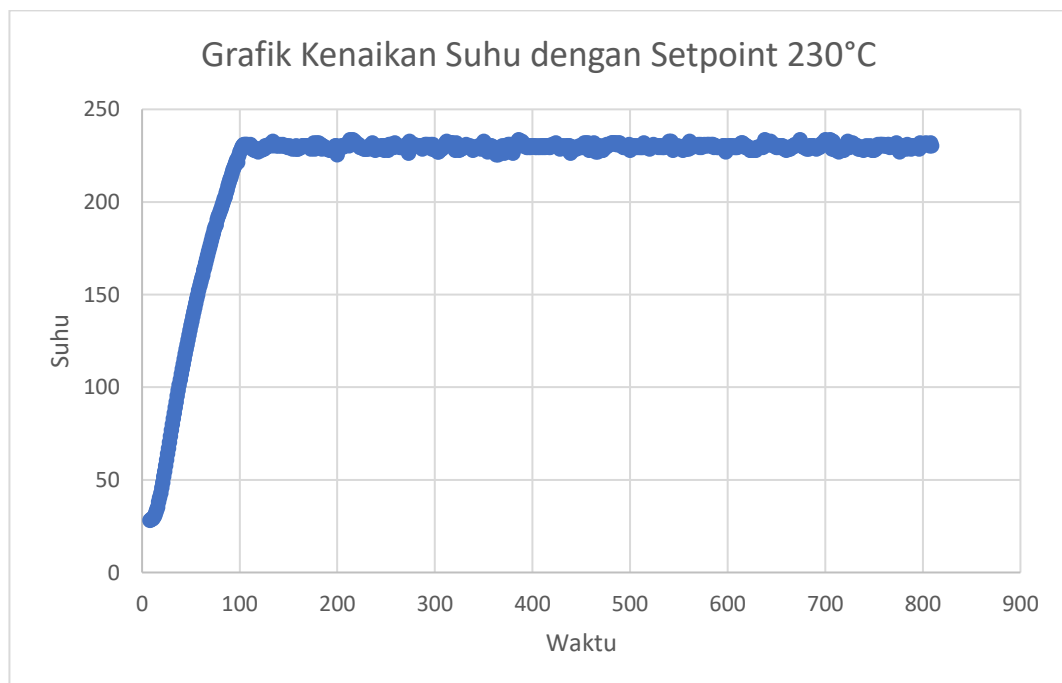
Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 4.19 dan data pada Lampiran 3, sistem menunjukkan respons yang cukup baik pada setpoint 220°C. Suhu mencapai nilai target dalam waktu sekitar 110–120 detik, dengan fluktuasi kecil dan overshoot yang masih dalam batas toleransi. Grafik menunjukkan kestabilan suhu tercapai dengan cukup cepat setelah fase transien, meskipun sedikit lebih lambat dibandingkan setpoint 210°C. Selain itu, hasil

pengamatan terhadap filamen pada setpoint 220°C menunjukkan bentuk yang masih padat dan cukup seragam seperti terlihat pada Gambar 4.20. Filamen yang dihasilkan tetap memiliki tekstur halus dan berlubang dibagian tengah, namun kurang konsisten arah lubangnya sehingga kurang cocok digunakan.



Gambar 4.20 Hasil Filamen ketika Setpoint 220°C

- Setpoint = 230°C



Gambar 4.21 Grafik Kenaikan Suhu dengan Setpoint 230°C

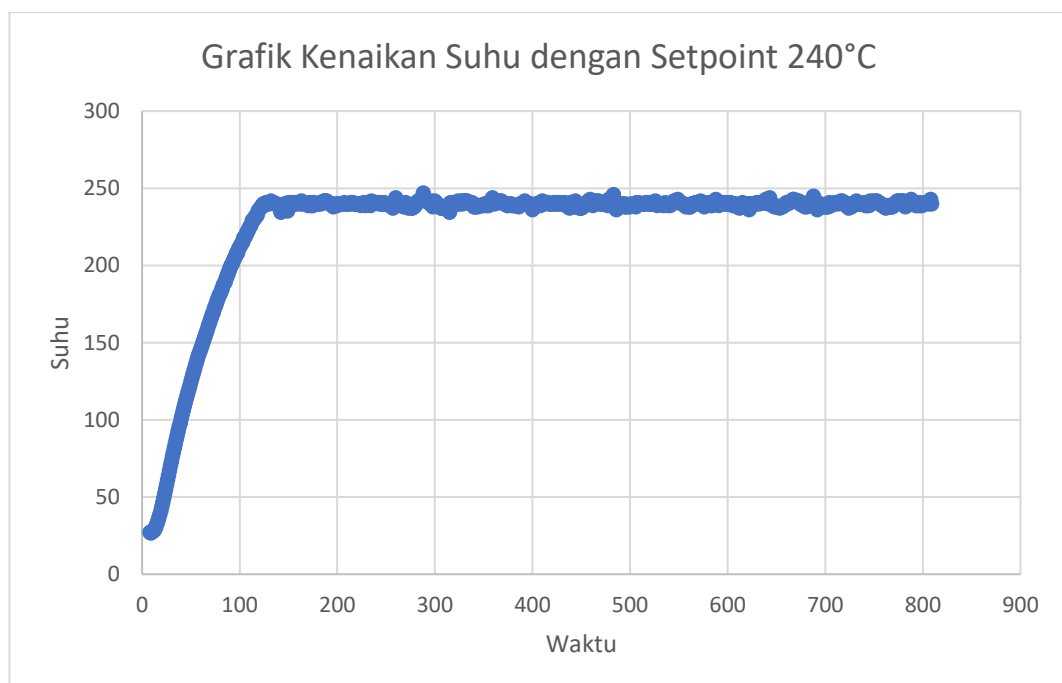
Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 4.21 dan data pada Lampiran 4, sistem membutuhkan waktu sekitar 130–140 detik untuk

mencapai suhu target. Terlihat adanya overshoot ringan dan fluktuasi suhu yang mulai meningkat setelah suhu mencapai steady-state. Meskipun demikian, sistem tetap mampu menjaga suhu secara umum. Hasil pengamatan terhadap filamen pada setpoint 230°C dapat dilihat pada Gambar 4.22, di mana filamen terlihat memiliki tekstur halus serta konsisten terhadap arah lubangnya.



Gambar 4.22 Hasil Filamen ketika Setpoint 230°C

- Setpoint = 240°C



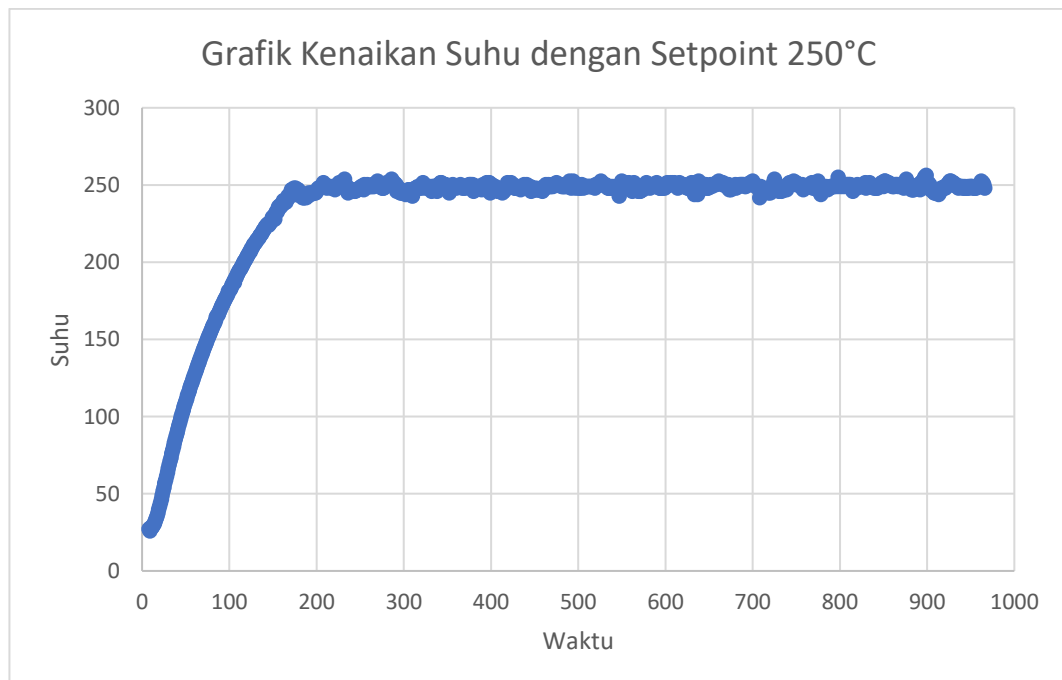
Gambar 4.23 Grafik Kenaikan Suhu dengan Setpoint 240°C

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 4.23 dan data pada Lampiran 5, sistem menunjukkan overshoot yang lebih besar dengan fluktuasi suhu yang lebih mencolok. Suhu mencapai setpoint dalam waktu sekitar 150 detik, dan kestabilan baru tercapai setelah osilasi kecil. Filamen pada suhu ini, seperti terlihat pada Gambar 4.24, tetap memiliki tekstur yang halus. Namun karena dilelehkan dengan suhu yang cukup tinggi membuat filamen yang dihasilkan tidak memiliki konsistensi arah lubang.



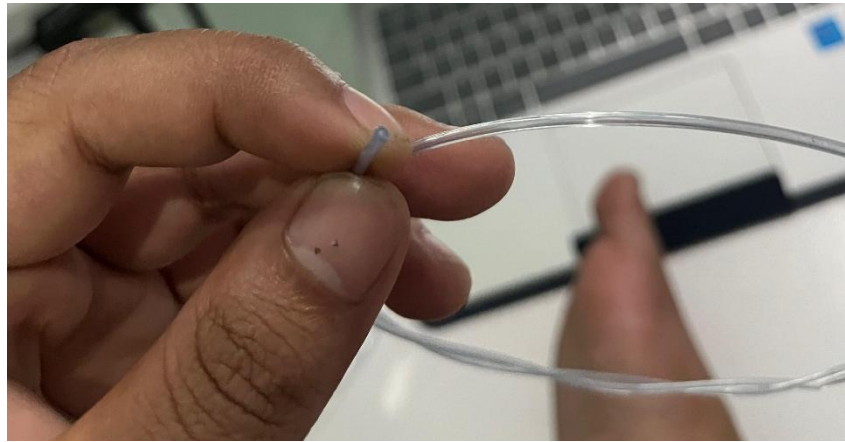
Gambar 4.24 Hasil Filamen ketika Setpoint 240°C

- Setpoint = 250°C



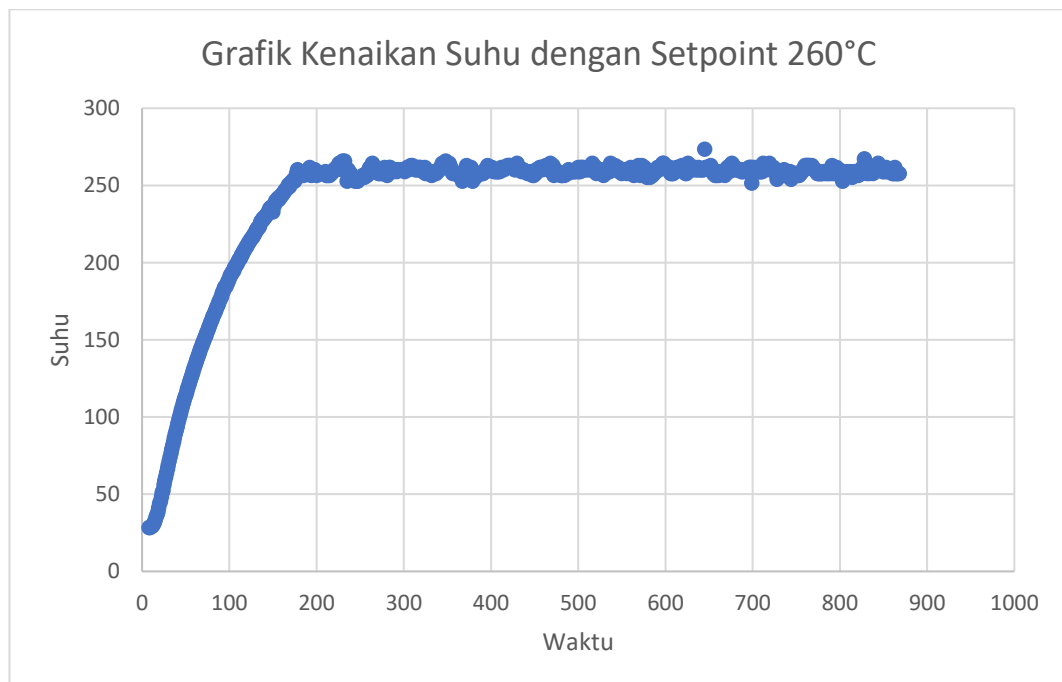
Gambar 4.25 Grafik Kenaikan Suhu dengan Setpoint 250°C

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 4.25 dan data pada Lampiran 6, waktu pencapaian suhu meningkat menjadi sekitar 160–170 detik, disertai overshoot dan fluktuasi suhu yang lebih signifikan. Sistem membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai kestabilan. Hasil pengamatan visual terhadap filamen pada setpoint 250°C dapat dilihat pada Gambar 4.26, yang menunjukkan filamen dengan bentuk kurang stabil terutama pada bagian tengah yang berlubang. Namun, filamen masih dikategorikan memiliki tekstur halus.



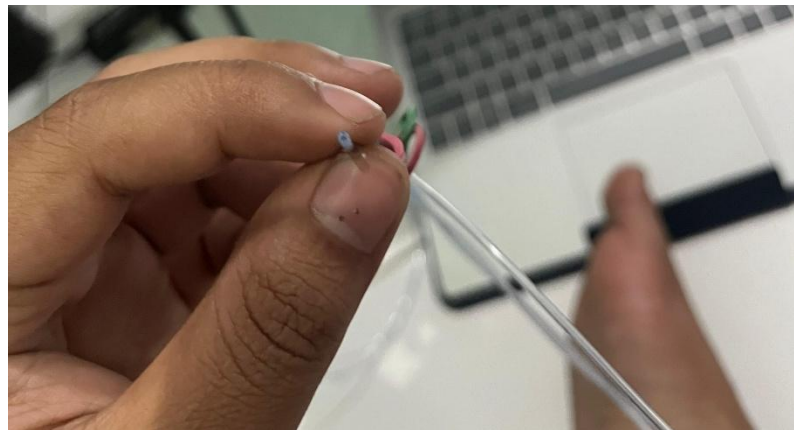
Gambar 4.26 Hasil Filamen ketika Setpoint 250°C

- Setpoint = 260°C



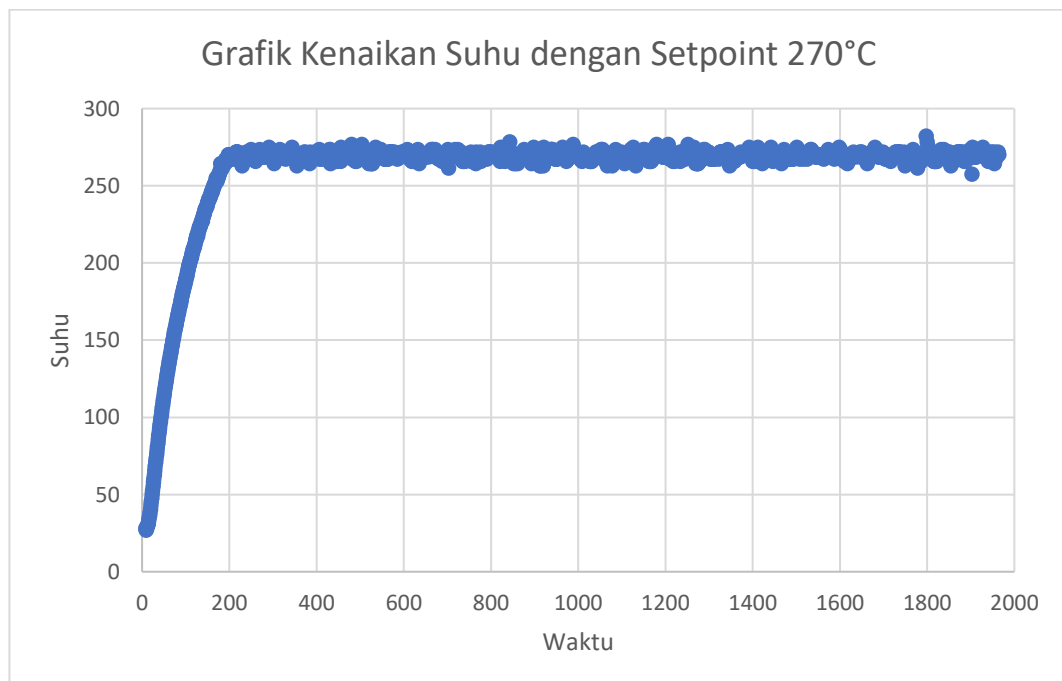
Gambar 4.27 Grafik Kenaikan Suhu dengan Setpoint 260°C

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 4.27 dan data pada Lampiran 7, respons sistem menunjukkan overshoot cukup besar dan kestabilan suhu yang baru tercapai setelah waktu cukup lama, yaitu mendekati 180 detik. Fluktuasi suhu saat steady-state masih terlihat cukup jelas. Filamen yang dihasilkan pada setpoint 260°C, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.28, terlihat masih sama seperti setpoint sebelumnya, yaitu memiliki tekstur halus namun tidak konsisten arah lubangnya.



Gambar 4.28 Hasil Filamen ketika Setpoint 260°C

- Setpoint = 270°C



Gambar 4.29 Grafik Kenaikan Suhu dengan Setpoint 270°C

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 4.29 dan data pada Lampiran 8, sistem menunjukkan respons paling tidak stabil dibandingkan variasi setpoint lainnya. *Overshoot* cukup tinggi terjadi, dan kestabilan suhu sulit dicapai dalam waktu singkat. Fluktuasi tetap terjadi bahkan setelah suhu mendekati steady-state. Hasil pengamatan terhadap filamen pada setpoint 270°C terlihat pada Gambar 4.30, di mana filamen memiliki tekstur yang kasar sehingga menunjukkan bahwa suhu ini tidak ideal untuk proses ekstrusi filamen.



Gambar 4.30 Hasil Filamen ketika Setpoint 270°C

4.2.8 Konsumsi Daya Keseluruhan Alat

Analisis konsumsi daya dilakukan untuk mengetahui kebutuhan daya minimum dan maksimum dari keseluruhan system alat. Semua komponen dalam *system* ini memperoleh catu daya dari power supply utama sebesar 12 V 8.3 A, berikut adalah table konsumsinya;

Tabel 4.7 Konsumsi Daya Keseluruhan Alat

No	Komponen	Standby	Bekerja
1	Hot-end	0.0W	40.0W
2	Stepper Nema 17	10.92W	10.92W
3	Fan	0.0W	2.4W
4	Arduino Mega 2560 Pro	0.35W	0.35W
5	Sensor HC-SR04	0.075W	0.075W

No	Komponen	Standby	Bekerja
6	LCD 16x2 I2C	0.10W	0.10W
7	Relay	0.35W	0.35W
	Total Konsumsi	11.8W	54.1W

Pada tabel 4.7 diperoleh kebutuhan daya system secara keseluruhan yang dimana Ketika idle $\pm 11.8W$ dan Ketika beban penuh $\pm 54.1W$. Power supply yang digunakan untuk keseluruhan alat ini memiliki spesifikasi 12V 8.3A. Kapasitas ini sudah lebih dari cukup untuk mendukung kebutuhan operasional keseluruhan komponen, serta memberikan suplai daya yang stabil dengan toleransi terhadap lonjakan arus saat *system* bertransisi dari *idle* ke kondisi aktif penuh.

4.2.9 Pengujian Botol Plastik Menjadi Filamen

Pengujian ini bertujuan untuk membandingkan karakteristik dua jenis botol plastik 1,5 Liter guna mengetahui spesifikasi botol yang sesuai untuk dapat digunakan pada alat. Uji coba ini dilakukan terhadap botol merek Aqua dan Alfamart, yang mana memiliki perbedaan diameter dan juga ketebalan material. Melalui pengujian ini, dapat diidentifikasi botol yang berhasil diproses secara optimal dan yang tidak. Hasil pengujian disajikan dalam tabel 4.8 berikut.

Tabel 4.8 Pengujian Botol Plastik Menjadi Filamen

No	Merek Botol	Volum e (L)	Diamete r Botol (mm)	Panjan g Filamen (cm)	Wakt u Proses	Status Pengujia n	Ket
1	Aqua	1.5L	85	480	1 Jam 33 Menit 56 Detik	Berhasil	Botol cukup tebal dan stabil
2	Alfamart	1.5L	80	-	-	Gagal	Materia l terlalu tipis

Dari hasil pengujian pada tabel 4.8 menunjukkan bahwa botol aqua dengan diameter 85mm dan ketebalan yang memadai berhasil diproses menjadi filamen sepanjang ± 480 cm dalam waktu 1 jam 33 menit 56 detik. Sebaliknya, pada botol Alfamart dengan diameter 80mm tidak berhasil dilakukan karena dinding botol

yang terlalu tipis yang mana mengganggu pembacaan pada sensor HC-SR04 dalam mendeteksi keberadaan botol.

4.2.10 Pengujian Keseluruhan Alat dengan Metode *Black Box*

Pengujian *black-box* merupakan metode pengujian sistem yang dilakukan dengan memberikan *input* dan mengamati *output*-nya tanpa memeriksa struktur internal seperti kode program atau rangkaian elektronika. Fokus utama dari pengujian ini adalah untuk memastikan bahwa seluruh fitur dan fungsi alat bekerja sesuai spesifikasi, sehingga sistem dapat beroperasi secara handal dalam skenario penggunaan nyata.

Berikut adalah hasil pengujian sistem daur ulang botol plastik menjadi filamen 3D printing menggunakan pendekatan *black-box*, yang menguji berbagai fitur dari sisi fungsionalitas dan respons sistem terhadap kondisi tertentu.

Tabel 4.9 Pengujian Keseluruhan Alat Dengan Metode *Black Box*

No	Fitur/ Komponen	Input/Trigger	Ekspektasi Output	Status	Keterangan
1	Saklar Utama	Dinyalakan	Sistem menyala, LCD aktif	Berhasil	Sistem mendapat catu daya
2	Modul Stepdown	Tegangan 12V masuk	Tegangan output turun ke 7V untuk Arduino	Berhasil	Diverifikasi pakai multimeter
3	Sensor Ultrasonik	Botol didekatkan	Sensor mendeteksi, sistem aktif	Berhasil	Jarak < 4.5 cm, proses berjalan
4	Sensor Ultrasonik	Botol dijauhkan	Sistem nonaktif, stepper & heater mati	Berhasil	Fitur proteksi jarak aktif
5	Thermistor	Elemen dipanaskan	Suhu naik dan tampil di LCD	Berhasil	Pembacaan suhu real-time stabil
6	SSR + PWM	PID aktif	Pemanas nyala sesuai duty cycle	Berhasil	Kontrol daya heater sesuai output PID

No	Fitur/ Komponen	Input/Trigger	Ekspektasi Output	Status	Keterangan
7	Motor Stepper	Sensor aktif & suhu > setpoint	Motor menggulung filamen	Berhasil	Dua syarat harus terpenuhi
8	Fan Pendingin	Suhu > 100°C & ada botol	Kipas menyala otomatis	Berhasil	Berfungsi menjaga suhu tetap stabil
9	LCD 16x2	Sistem menyala	Menampilkan suhu & status	Berhasil	Sesuai dengan program LCD
10	Spooler Motor	Motor aktif	Filamen tergulung	Berhasil	Cek keberhasilan penggulungan
11	Botol PET	Diuji dengan beberapa merek	Sebagian filamen berhasil dibuat	Berhasil/Gagal	Tergantung jenis botol PET
12	Tanpa Botol	Tidak ada material	Sistem tidak berjalan	Berhasil	Sistem tidak aktif jika tidak ada material
13	Stabilitas PID	Sistem menyala > 5 menit	Suhu stabil di 210°C ±1%	Berhasil	Bukti kinerja pengendali suhu
14	Simulasi Overheat	Suhu > 210°C	SSR mati otomatis, suhu turun	Berhasil	Proteksi terhadap overheat
15	Botol Habis	Sensor tidak deteksi	Motor & heater mati otomatis	Berhasil	Sistem berhenti dengan aman

Pada Berdasarkan pengujian black-box pada Tabel 4.9, dapat disimpulkan bahwa sistem bekerja sesuai dengan desain fungsional dan skenario operasional yang diharapkan. Komponen utama seperti sensor suhu, sensor jarak, motor stepper, SSR, serta pengendali suhu PID berfungsi dengan baik. Sistem hanya aktif jika material tersedia dan suhu telah mencapai ambang tertentu, serta akan mati otomatis saat kondisi tidak memenuhi, seperti suhu terlalu tinggi atau material habis.

Fitur proteksi berjalan efektif, seperti pada saat botol tidak terdeteksi, suhu melebihi batas, dan botol habis, di mana sistem otomatis menonaktifkan heater dan motor untuk mencegah kerusakan. Salah satu hasil pengujian yang bersifat bervariasi adalah pada pengujian berbagai jenis botol PET, di mana botol Aqua

1.5L menghasilkan filamen yang baik, sementara yang botol Alfamart 1.5L gagal — hal ini menunjukkan bahwa karakteristik bahan mempengaruhi hasil akhir, namun secara umum sistem sudah mampu menangani proses secara otomatis.

Secara keseluruhan, sistem dinilai sudah layak dan dapat beroperasi mandiri dengan keandalan tinggi, serta telah dilengkapi dengan fitur proteksi yang relevan untuk mencegah kondisi berbahaya atau kerja sia-sia.