

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISA

4.1 Hasil Pengujian Komponen

Bab ini menyajikan hasil pengujian yang telah dilakukan selama proses perancangan dan pembuatan alat tugas akhir. Pengujian bertujuan untuk mengevaluasi kinerja setiap komponen yang digunakan serta memastikan sistem dapat bekerja sesuai dengan fungsi yang telah dirancang. Pengujian dilakukan pada komponen-komponen utama, seperti sensor, aktuator, dan sistem catu daya, dengan membandingkan hasil pengukuran terhadap spesifikasi teknis yang dimiliki masing-masing komponen. Selain itu, dilakukan pengujian sistem secara keseluruhan untuk memverifikasi integrasi antar komponen dan alur kerja alat. Hasil pengujian tersebut digunakan sebagai dasar dalam proses penyempurnaan sistem melalui metode *trial and error* sehingga diperoleh performa alat yang lebih optimal, stabil, dan sesuai dengan tujuan perancangan.

4.1.2 Pengujian Pengatur Tegangan dan PZEM-004T

Sebelum digunakan sebagai pengatur tegangan masukan pada *furnace*, dilakukan pengujian terhadap pengatur tegangan untuk mengetahui kesesuaian tegangan dan arus keluaran yang terbaca oleh alat ukur (multimeter) dengan hasil pembacaan modul PZEM-004T. Berbeda dengan transformator, pengatur tegangan tidak menghasilkan tegangan AC sinusoidal murni, melainkan mengatur besar tegangan efektif (RMS) menggunakan metode *phase angle control*. Oleh karena itu, pengukuran keluaran pengatur tegangan AC tidak dapat dilakukan secara akurat dalam kondisi tanpa beban (*no-load*), karena bentuk gelombang hasil pemotongan sudut penyalan SCR menyebabkan sebagian alat ukur menampilkan nilai yang tidak stabil atau tidak merepresentasikan tegangan RMS sebenarnya.

Pada tugas akhir ini, proses pengujian dilakukan dengan menghubungkan pengatur tegangan ke lampu sebagai beban. Penggunaan lampu sebagai beban bertujuan agar pengatur tegangan bekerja pada kondisi operasi sebenarnya sehingga tegangan dan arus yang dihasilkan menjadi stabil dan dapat diukur dengan baik.

Selanjutnya, nilai tegangan yang terbaca pada multimeter dibandingkan dengan pembacaan modul PZEM-004T untuk mengetahui tingkat akurasi sistem monitoring.

Tabel 4. 1 Pengujian *Output* Pengatur Tegangan AC

No	V Multi (VAC)	V PZEM (VAC)	<i>Error</i> (%)
1	21.7	20.7	4.61
2	30.86	30.2	2.14
3	38.56	40.5	5.03
4	44.14	50.2	13.73
5	61.7	60.7	1.62
6	71.9	70.9	1.39
7	80.9	80.1	0.99
8	90.9	90.1	0.88
9	101.4	101.7	0.30
10	111.1	110.4	0.63
11	120.6	120.1	0.41
12	131.0	130.7	0.23
13	140.5	140.2	0.21
14	151.2	150.9	0.20
15	161.1	160.9	0.12
16	170.1	170.0	0.06
17	180.8	181.0	0.11
18	189.8	190.0	0.11
19	199.6	200.0	0.20
20	209.3	210.0	0.33
21	220.0	220.7	0.32
Rata-Rata <i>Error</i> (%)			1.54%

Berdasarkan hasil pengujian pada **Tabel 4.1** atau bisa dilihat pada **Lampiran 5**, nilai tegangan yang dibaca oleh sensor PZEM-004T memiliki kesesuaian yang baik dengan hasil pengukuran menggunakan multimeter digital. Rata-rata persentase *error* yang diperoleh sebesar 1.54%, sehingga menunjukkan bahwa sensor PZEM-004T mampu mengukur tegangan keluaran pengatur tegangan dengan tingkat akurasi yang baik. Selisih pembacaan pada beberapa titik pengujian dipengaruhi oleh toleransi akurasi masing-masing alat ukur, resolusi sensor, fluktuasi tegangan jaringan listrik,

serta karakteristik pengaturan sudut penyalan (*phase-angle control*) pada pengatur tegangan yang menyebabkan bentuk gelombang AC tidak lagi sinusoidal sempurna, terutama pada tegangan rendah. Secara keseluruhan, nilai *error* tersebut masih tergolong kecil sehingga sensor PZEM-004T layak digunakan sebagai perangkat pemantauan tegangan secara *real-time* pada sistem *furnace*. Selain itu, pada keluaran komponen pengatur tegangan AC seiring meningkatnya tegangan keluaran, nilai *error* semakin kecil dan cenderung stabil di bawah 2%. Hal ini menunjukkan bahwa ketika sudut penyalan SCR semakin kecil, bentuk gelombang keluaran semakin mendekati gelombang sinus, sehingga pembacaan oleh PZEM-004T menjadi lebih akurat.

Selain berfungsi sebagai pengatur daya, pengatur tegangan juga berperan sebagai sumber tegangan masukan bagi SSR yang selanjutnya menyuplai ke elemen pemanas *Silicon Carbide* (SiC). Dengan demikian, perubahan tegangan keluaran secara langsung memengaruhi daya listrik yang diterima elemen pemanas, sehingga laju kenaikan temperatur *furnace* dapat dikendalikan sesuai kebutuhan proses pengujian maupun proses identifikasi sistem sebelum penerapan kontrol PID.

4.1.2 Pengujian *Power supply* 12V 10A

Power supply 12V 10A berfungsi sebagai sumber catu daya utama yang menyuplai energi listrik ke berbagai komponen pada sistem. Oleh karena itu, pengujian perlu dilakukan untuk memastikan tegangan keluaran yang dihasilkan sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan. Kesesuaian tegangan keluaran sangat penting untuk menjaga kestabilan operasi komponen, karena penyimpangan tegangan dapat menyebabkan penurunan performa, kesalahan pembacaan sensor, hingga gangguan pada kinerja sistem secara keseluruhan. Hasil pengujian ini digunakan untuk memastikan bahwa *power supply* mampu menyediakan tegangan yang stabil dan dapat mendukung kebutuhan daya sistem selama proses pengoperasian.

Tabel 4. 2 Pengujian *Power supply* Tanpa Beban

Pengujian	V Input (VAC)	V <i>Output</i> (VDC)	Arus <i>Output</i> (A)	V Spesifikasi (VDC)	Error Tegangan (%)
1	220	11.60	0.01	12	0.9 %
2	220	11.60	0.01	12	0.9 %
3	220	11.60	0.01	12	0.9 %
Rata-Rata Error (%)					0.9 %

Tabel 4. 3 Pengujian *Power supply* Dengan Beban

Pengujian	V Input (VAC)	V <i>Output</i> (VDC)	Arus <i>Output</i> (A)	V Spesifikasi (VDC)	Error Tegangan (%)
1	220	11.60	1.23	12	0.9 %
2	220	11.60	1.24	12	0.9 %
3	220	11.60	1.23	12	0.9 %
Rata-Rata Error (%)					0.9 %

Berdasarkan **Tabel 4.2** dan **Tabel 4.3**, pengujian *power supply* dilakukan pada kondisi tanpa beban dan dengan beban sebanyak tiga kali pengulangan untuk mengetahui kestabilan tegangan keluaran serta kemampuan *power supply* dalam menyuplai arus ke sistem. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan masukan yang diberikan pada *power supply* sebesar 220 VAC pada setiap percobaan

**Gambar 4. 1** Pengukuran *Output* Tegangan Catu Daya Menggunakan Multimeter

Pada kondisi tanpa beban yang ditunjukkan pada **Gambar 4.1**, tegangan keluaran yang dihasilkan *power supply* terukur stabil sebesar 11,60 VDC pada seluruh pengujian. Nilai tersebut sedikit lebih rendah dibandingkan tegangan spesifikasi sebesar 12 VDC, sehingga menghasilkan persentase kesalahan rata-rata sebesar 0,9%. Selain itu, arus keluaran yang terukur hanya sebesar 0.01 A, karena *power supply* belum dibebani oleh komponen yang membutuhkan daya. Selisih tegangan yang kecil tersebut masih berada dalam batas toleransi kerja *power supply* sehingga tidak memengaruhi kinerja sistem. Sementara itu, pada kondisi dengan beban sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 4.2**, tegangan keluaran tetap stabil pada nilai 11,60 VDC dengan persentase kesalahan yang sama, yaitu 0,9%. Meskipun tegangan keluaran tidak mengalami perubahan yang signifikan, arus keluaran meningkat menjadi 1,23–1,24 A akibat adanya beban yang terhubung pada *power supply*.

Peningkatan arus ini menunjukkan bahwa *power supply* mampu menyuplai kebutuhan daya komponen tanpa menyebabkan penurunan tegangan yang berarti. Nilai arus maksimum yang terukur juga masih jauh di bawah kapasitas maksimum *power supply*, yaitu 10 A.



Gambar 4. 2 Pengukuran *Output Arus* pada *Catu Daya*

Berdasarkan hasil pengujian tersebut, dapat disimpulkan bahwa *power supply* memiliki kemampuan regulasi tegangan yang baik karena mampu mempertahankan tegangan keluaran pada kisaran 11,60 VDC baik pada kondisi tanpa beban maupun saat dibebani. Dengan nilai kesalahan rata-rata hanya 0,9%, *power supply* dinilai bekerja

sesuai spesifikasi dan layak digunakan sebagai sumber catu daya untuk menyuplai seluruh komponen pada sistem *furnace* yang dirancang.

4.1.3 Pengujian *Silicon Carbide*

Pengujian elemen pemanas SiC dilakukan untuk memastikan bahwa elemen mampu menghasilkan panas ketika diberikan sumber tegangan serta untuk mengetahui karakteristik kelistrikannya sebelum diterapkan pada sistem secara keseluruhan. Selain itu, pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi kondisi fisik elemen pemanas dan memastikan tidak terdapat kerusakan yang dapat memengaruhi performa pemanasan.

Tahap awal pengujian dilakukan dengan mengukur resistansi setiap batang SiC menggunakan *multimeter* digital.

Tabel 4. 4 Tabel Pengujian Respon *Silicon Carbide*

No	Elemen SiC	Resistansi Terukur (Ω)	Keterangan
1	SiC 1	1.5	Memanas dengan baik
2	SiC 2	1.3	Memanas dengan baik
3	SiC 3	1.5	Memanas dengan baik
4	SiC 4	2.7	Memanas dengan baik

Berdasarkan hasil pengukuran menggunakan *multimeter* digital, diperoleh nilai resistansi masing-masing elemen *Silicon Carbide* (SiC), yaitu SiC 1 sebesar 1.5 Ω , SiC 2 sebesar 1.3 Ω , SiC 3 sebesar 2.7 Ω , dan SiC 4 sebesar 1.5 Ω pada kondisi suhu ruang. Nilai resistansi tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam menentukan konfigurasi pemasangan elemen pemanas dan pemilihan sumber daya yang sesuai. Berdasarkan hasil pengukuran, empat batang SiC disusun dalam konfigurasi rangkaian seri, sehingga diperoleh resistansi total sistem secara teori sebesar 7 Ω .



Gambar 4. 3 Pengukuran Resistansi pada SiC

Pengujian tahap selanjutnya yaitu pengujian karakteristik tegangan dan arus pada masing-masing keempat elemen *Silicon Carbide* (SiC). Percobaan dilakukan dengan mengaliri SiC dengan sumber listrik VDC yang kemudian pengujian ini bertujuan untuk memastikan apakah setiap elemen pemanas mempunyai karakteristik yang berubah-ubah serta untuk mengetahui distribusi tegangan dan arus ketika dialiri sumber listrik. Berikut percobaan pada masing-masing batang SiC:

Tabel 4. 5 Tabel Pengukuran pada SiC 1 (1.5 Ω)

No	Vin(V)	I Teori (A)	V multi(V)	I Multi(A)	Resistansi(Ω)
1	1	0.66	0.94	0.63	1.49
2	2	1.33	1.9	1.32	1.43
3	3	2	2.84	1.95	1.45
4	4	2.66	3.78	2.62	1.44
5	5	3.33	4.78	3.39	1.41
6	6	4	5.63	4.17	1.35
7	7	4.66	6.61	5.04	1.31
8	8	5.33	7.53	5.89	1.27
9	9	6	8.46	6.84	1.23
10	10	6.66	9.39	8	1.17
11	11	7.33	10.28	9.13	1.12
12	11.5	7.73	10.6	10.2	1.03

Berdasarkan **Tabel 4.5**, nilai resistansi elemen pemanas *Silicon Carbide* (SiC) dihitung menggunakan Hukum Ohm berdasarkan hasil pengukuran tegangan (V Multi) dan arus (I Multi) sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (2.2) dan persamaan (2.3). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa resistansi elemen mengalami penurunan secara bertahap dari 1,49 Ω pada kondisi awal menjadi 1,03 Ω pada saat tegangan masukan mencapai 11,5 V. Penurunan resistansi tersebut menunjukkan bahwa elemen pemanas SiC tidak memiliki nilai resistansi yang konstan, melainkan berubah terhadap temperatur. Ketika elemen mulai dialiri arus listrik, energi listrik yang diserap akan dikonversi menjadi energi panas (efek Joule), sehingga temperatur elemen meningkat. Kenaikan temperatur ini menyebabkan resistansi material SiC menurun yang sesuai dengan karakteristik elemen SiC itu sendiri.

Tabel 4. 6 Tabel Pengukuran pada SiC 2 (1.3 Ω)

No	Vin(V)	I Teori (A)	V multi(V)	I Multi(A)	Resistansi(Ω)
1	1	0.77	0.93	0.77	1.20
2	2	1.54	1.89	1.53	1.23
3	3	2.3	2.82	2.34	1.20
4	4	3.07	3.76	3.17	1.18
5	5	3.84	4.77	4.04	1.18
6	6	4.61	5.56	4.97	1.11
7	7	5.38	6.51	6.12	1.06
8	8	6.15	7.41	7.15	1.03
9	9	6.92	8.31	8.6	0.96
10	10	7.69	9.2	10	0.92

Hasil pengujian menunjukkan bahwa resistansi elemen SiC 2 mengalami penurunan secara bertahap dari 1.20 Ω pada kondisi awal menjadi 0.92 Ω pada saat $V_{in} = 10$ V. Penurunan ini menunjukkan bahwa resistansi elemen SiC tidak bersifat konstan, tetapi dipengaruhi oleh kenaikan temperatur selama proses pemanasan. Ketika tegangan masukan dinaikkan, energi listrik yang diserap elemen semakin besar dan dikonversi menjadi energi panas melalui efek Joule. Akibatnya, temperatur elemen meningkat dan resistansi material SiC menurun. Karakteristik ini sesuai dengan sifat elemen pemanas *Silicon Carbide* yang menunjukkan penurunan resistansi pada rentang temperatur operasi awal hingga menengah.

Selain perubahan resistansi, hasil pengukuran juga memperlihatkan bahwa nilai arus meningkat lebih cepat dibandingkan perhitungan teoritis yang menggunakan resistansi nominal 1,3 Ω . Sebagai contoh, pada $V_{in} = 10$ V, arus teoritis sebesar 7,69 A, sedangkan hasil pengukuran mencapai 10 A. Perbedaan tersebut terjadi karena perhitungan teoritis mengasumsikan resistansi elemen tetap, sedangkan pada kondisi sebenarnya resistansi telah menurun menjadi 0.92 Ω akibat peningkatan temperatur. Berdasarkan Hukum Ohm, penurunan resistansi akan menyebabkan arus yang mengalir menjadi lebih besar untuk tegangan yang sama.

Tabel 4. 7 Tabel Pengukuran pada SiC 3 (1.5 Ω)

No	Vin(V)	I Teori (A)	V multi(V)	I Multi(A)	Resistansi(Ω)
1	1	0.66	0.95	0.66	1.43
2	2	1.33	1.9	1.3	1.46
3	3	2	2.86	1.94	1.47
4	4	2.66	3.8	2.61	1.45
5	5	3.33	4.7	3.28	1.43
6	6	4	5.8	4.07	1.42
7	7	4.66	6.63	4.87	1.36
8	8	5.33	7.75	5.77	1.34
9	9	6	8.5	6.87	1.23
10	10	6.66	9.41	7.88	1.19
11	11	7.33	10.28	9.21	1.11
12	11.7	7.8	10.54	10.21	1.03

Hasil pengujian menunjukkan bahwa resistansi elemen SiC 3 mengalami perubahan dari 1.43 Ω pada $V_{in} = 1$ V menjadi 1.03 Ω pada $V_{in} = 11.7$ V. Pada rentang tegangan rendah hingga $V_{in} = 3$ V, resistansi masih relatif stabil bahkan sedikit meningkat hingga 1.47 Ω . Kondisi ini menunjukkan bahwa temperatur elemen pada tahap awal pemanasan belum meningkat secara signifikan sehingga perubahan karakteristik material masih sangat kecil. Setelah tegangan masukan dinaikkan lebih lanjut, resistansi mulai menurun secara bertahap hingga mencapai 1.03 Ω , yang menunjukkan bahwa kenaikan temperatur telah memengaruhi sifat listrik elemen pemanas SiC. Selain perubahan resistansi, hasil pengujian SiC ini juga menunjukkan bahwa arus hasil pengukuran meningkat lebih besar dibandingkan arus teoritis yang dihitung menggunakan resistansi nominal 1.5 Ω . Sebagai contoh, pada $V_{in} = 10$ V, arus teoritis sebesar 6.66 A, sedangkan hasil pengukuran mencapai 7.88 A. Pada $V_{in} = 11$ V, arus teoritis sebesar 7.33 A, sedangkan arus hasil pengukuran sebesar 9.21 A.

Tabel 4. 8 Tabel Pengukuran pada SiC 4 (2.7 Ω)

No	Vin(V)	I Teori (A)	V multi(V)	I Multi(A)	Resistansi(Ω)
1	1	0.37	0.97	0.38	2.55
2	2	0.74	1.94	0.75	2.58
3	3	1.11	2.9	1.12	2.58
4	4	1.48	3.86	1.58	2.44
5	5	1.85	4.86	2.12	2.29
6	6	2.22	5.81	2.63	2.20
7	7	2.59	6.78	3.17	2.13
8	8	2.96	7.72	3.85	2.00
9	9	3.33	8.69	4.47	1.94
10	10	3.7	9.68	5.23	1.85
11	11	4.07	10.58	6.07	1.74
12	12	4.44	11.49	7.1	1.61
13	13	4.81	12.45	8.39	1.48
14	14	5.18	13.39	10	1.33

Hasil pengujian menunjukkan bahwa resistansi elemen SiC 4 mengalami penurunan secara bertahap dari 2.55 Ω pada $V_{in} = 1$ V menjadi 1.33 Ω pada $V_{in} = 14$ V. Pada tegangan rendah, perubahan resistansi masih relatif kecil karena temperatur elemen belum meningkat secara signifikan. Namun, seiring meningkatnya tegangan masukan, energi listrik yang diserap elemen semakin besar dan dikonversi menjadi energi panas melalui efek Joule. Peningkatan temperatur tersebut menyebabkan resistansi material *Silicon Carbide* terus menurun. Karakteristik ini menunjukkan bahwa elemen SiC memiliki sifat resistansi yang bergantung pada temperatur, sehingga nilainya tidak tetap selama proses pemanasan berlangsung.

Selain perubahan resistansi, hasil pengukuran juga menunjukkan bahwa arus yang mengalir meningkat lebih besar dibandingkan arus teoritis yang dihitung menggunakan resistansi nominal 2.7 Ω . Sebagai contoh, pada $V_{in} = 14$ V, arus teoritis sebesar 5.18 A, sedangkan hasil pengukuran meningkat hingga 10 A. Perbedaan tersebut terjadi karena perhitungan teoritis mengasumsikan resistansi elemen tetap sebesar 2.7 Ω , sedangkan pada kondisi aktual resistansi telah menurun hingga 1.33 Ω .

Hasil yang didapatkan pada SiC 1, SiC 2, dan SiC 3, SiC 4 menunjukkan penurunan resistansi yang paling besar, yaitu dari 2.55Ω menjadi 1.33Ω (sekitar 47.8%). Sebaliknya, SiC 1, SiC 2, dan SiC 3 masing-masing mengalami penurunan sekitar 30.9%, 23.3%, dan 28.0%. Meskipun besar penurunannya berbeda, keempat elemen menunjukkan pola yang sama, yaitu resistansi menurun seiring meningkatnya temperatur akibat konversi energi listrik menjadi energi panas. Penurunan resistansi ini menyebabkan arus aktual meningkat lebih besar daripada arus teoritis yang dihitung menggunakan resistansi nominal, sehingga menegaskan bahwa karakteristik listrik elemen pemanas *Silicon Carbide* bersifat *nonlinier* dan dipengaruhi oleh temperatur operasi. Hal ini menjadi dasar penggunaan pengendali PID pada *furnace* untuk mengompensasi perubahan karakteristik elemen selama proses pemanasan.

4.1.4 Hasil Kalibrasi Sensor *Thermocouple* tipe-K

Kalibrasi sensor *thermocouple* tipe-K dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi pembacaan suhu yang diperoleh dari sensor yang terhubung dengan modul MAX6675. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan *thermocouple* terhadap alat ukur referensi berupa thermogun (thermometer inframerah) pada *furnace* dari suhu sekitar 28°C hingga 400°C

Tabel 4. 9 Tabel Perbandingan Data Sensor *Thermocouple*

No.	<i>Thermocouple</i> Type K($^{\circ}\text{C}$)	Thermo Gun($^{\circ}\text{C}$)	<i>Error</i> (%)
1	28	28	0
2	56	56.8	1.41
3	100.75	100.1	0.65
4	153.75	153.6	0.10
5	199.75	199.5	0.13
6	250.75	250.4	0.14
7	300	300.6	0.20
8	352	352.5	0.14
9	402.75	402.6	0.04
Rata-Rata <i>Error</i> (%)			0.31%

Berdasarkan hasil pengujian pada **Tabel 4.9**, diperoleh rata-rata persentase *error* sebesar 0.31%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa pembacaan temperatur menggunakan *thermocouple* tipe-K memiliki tingkat kesesuaian yang sangat baik

dengan hasil pengukuran thermo gun. Selisih pembacaan terbesar terjadi pada pengujian ke-2 sebesar 1.41%, sedangkan pada titik pengukuran lainnya nilai *error* berada di bawah 1%. Perbedaan tersebut masih berada dalam batas toleransi pengukuran dan dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti perbedaan metode pengukuran antara *thermocouple* dan thermo gun, respons termal sensor, emisivitas permukaan benda yang diukur oleh thermo gun, serta fluktuasi temperatur selama proses pemanasan. Proses pengukuran bisa dilihat pada

Secara keseluruhan, hasil kalibrasi menunjukkan bahwa sensor *thermocouple* tipe-K yang digunakan memiliki tingkat akurasi yang baik dan mampu memberikan data temperatur yang representatif untuk digunakan sebagai masukan sistem kontrol PID pada *furnace* temperatur tinggi. Dengan rata-rata *error* yang relatif kecil, sensor dinilai layak digunakan untuk proses pemantauan (*monitoring*) dan pengendalian temperatur secara *real-time*.

4.2 Hasil Pengujian dan Analisis Sistem Kontrol PID

Pengujian sistem kontrol PID dilakukan untuk mengevaluasi kinerja *furnace* dalam mengendalikan temperatur sesuai dengan nilai setpoint yang ditentukan. Tahap awal pengujian dilakukan secara *open loop* untuk memperoleh karakteristik dinamis sistem. Data hasil pengujian berupa respon temperatur terhadap waktu digunakan untuk mengidentifikasi model *First Order Plus Dead Time* (FOPDT), sehingga diperoleh parameter *gain proses* (K), *dead time* (L), dan *time constant* (τ). Parameter tersebut kemudian digunakan sebagai dasar perhitungan konstanta pengendali PID menggunakan metode *Lambda Tuning*.

Selanjutnya, parameter PID yang diperoleh diimplementasikan pada sistem *closed loop* dengan metode *Time Proportional Control* (TPC) sebagai pengendali daya elemen pemanas melalui *Solid State Relay* (SSR). Selain itu, *Self Tuning* dapat dilakukan untuk dapat menyesuaikan dengan kondisi aktual sistem. Pengujian dilakukan pada beberapa variasi setpoint, yaitu 200°C, 400°C, 600°C dan 800°C. Hasil pengujian dianalisis berdasarkan respon temperatur terhadap waktu untuk memperoleh karakteristik sistem,

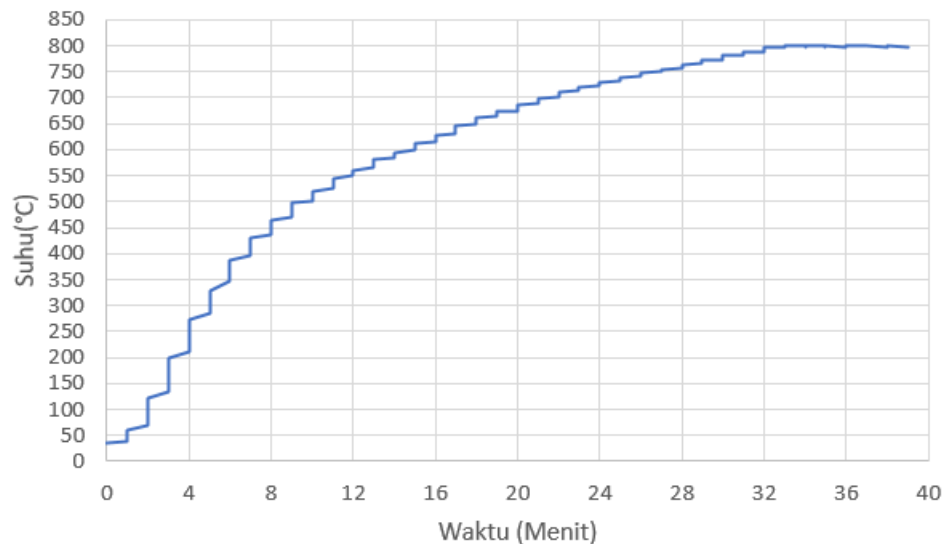
meliputi *delay time*, *rise time*, *peak time*, *maximum overshoot*, *settling time*, dan *steady-state*.

Selain menganalisis respon temperatur terhadap setpoint, penulis mengevaluasi keluaran pengendali PID berupa *Manipulated Variable* serta perubahan waktu ON (Ton) dan waktu OFF (Toff) pada metode *Time Proportional Control* (TPC). Analisis ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana aksi pengendali PID mengatur besar daya yang diberikan ke elemen pemanas SiC melalui SSR. Dengan mengamati perubahan nilai MV, Ton, dan Toff selama proses pemanasan, dapat dievaluasi kemampuan sistem dalam mempercepat kenaikan temperatur, mengurangi *overshoot*, serta mempertahankan temperatur *furnace* tetap stabil pada nilai setpoint.

4.2.1 Identifikasi Model FOPDT

Pengujian sistem *open loop* dilakukan untuk memperoleh karakteristik dinamis *furnace* tanpa menggunakan pengendali PID. Pada tahap ini elemen pemanas *Silicon Carbide* (SiC) diberikan masukan tegangan tetap sebesar 70 VAC melalui pengatur tegangan AC, sehingga daya yang diberikan ke *furnace* dijaga konstan selama proses pemanasan. Temperatur awal *furnace* berada pada suhu ruang sekitar 38°C, kemudian temperatur dicatat secara periodik menggunakan sensor *thermocouple* tipe-K hingga mencapai temperatur maksimum sekitar 800°C.

Hasil pengujian disajikan dalam bentuk grafik yang dimasukkan kedalam excel, yang mana grafik tersebut digunakan untuk mengetahui karakteristik respon alami *furnace*, seperti kecepatan kenaikan temperatur, *time constant* dan *dead time*. Karena sistem belum menggunakan pengendali, kenaikan temperatur sepenuhnya dipengaruhi oleh karakteristik termal *furnace*, elemen pemanas SiC, serta mekanisme perpindahan panas melalui konduksi, konveksi, dan radiasi. Data respon inilah yang selanjutnya digunakan sebagai dasar identifikasi model matematis sistem.



Gambar 4. 4 Grafik Respon Sistem *Open Loop Furnace* untuk Memperoleh Karakteristik Sistem

Pada **Gambar 4.4** ditunjukkan grafik karakteristik sistem *furnace* menggunakan pendekatan *First Order Plus Dead Time* (FOPDT) berdasarkan data hasil pengujian *open loop*. Dari hasil respon tersebut nilai *error* ialah 765.25°C didapat dari persamaan (2.4), kemudian diperoleh gain proses (K) sebesar $7,6525^{\circ}\text{C}/\%$ yang didapat dari persamaan (2.10). Selanjutnya, dari kurva respon sistem ditentukan nilai *dead time* (L) dan *time constant* (τ). Berdasarkan hasil pengujian, respon awal sistem mulai mengalami kenaikan temperatur setelah 25 detik, sehingga nilai *dead time* ditetapkan sebesar 25 detik. Sementara itu, nilai *time constant* diperoleh pada saat temperatur mencapai 63,2% dari perubahan temperatur total yang tertera pada persamaan (2.11). Dari hasil identifikasi grafik, temperatur tersebut dicapai dalam 11.8 menit atau setelah 683 detik, sehingga diperoleh nilai $\tau = 683$ detik.

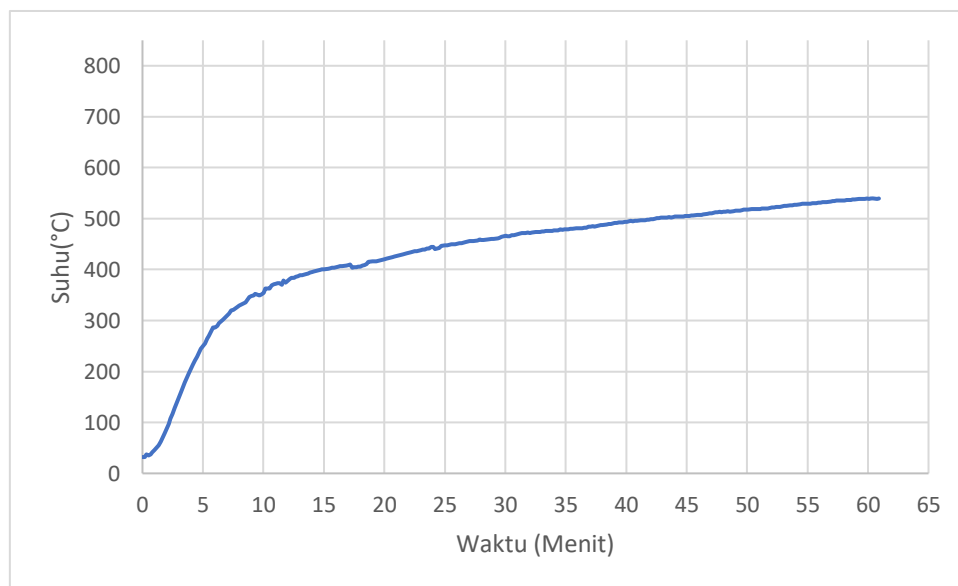
Setelah parameter K, L, dan τ diperoleh, langkah berikutnya adalah menentukan nilai lambda (λ) sebagai parameter penyetel respon sistem. Berdasarkan teori Lambda Tuning, nilai λ harus memenuhi hubungan $\lambda > L$ atau berada pada rentang $\lambda = (1-3)\tau$. Pada penelitian ini dipilih $\lambda = \tau$, yaitu sebesar 683 detik, karena nilai tersebut memberikan kecepatan respon dan kestabilan sistem pada proses pemanasan *furnace* yang memiliki karakteristik respon lambat. Semakin kecil nilai lambda, maka respon sistem akan semakin cepat, namun berpotensi meningkatkan *overshoot* dan osilasi.

Sebaliknya, semakin besar nilai lambda, respon sistem menjadi lebih lambat tetapi lebih stabil.

Berdasarkan parameter yang telah diperoleh, selanjutnya dilakukan perhitungan konstanta pengendali PID menggunakan Persamaan (2.12), Persamaan (2.13), dan Persamaan (2.14). Hasil perhitungan diperoleh nilai $K_p=0,1260$, $K_i=0,000184$, dan $K_d=3,150$. Nilai-nilai tersebut digunakan sebagai parameter awal (*initial tuning*) pada implementasi pengendali PID. Selanjutnya, parameter tersebut disempurnakan melalui proses fine tuning berdasarkan hasil pengujian sistem.

4.2.2 Pengujian Sistem dengan Parameter Lambda *Tuning*

Respon sistem menggunakan parameter hasil Lambda *Tuning* ditunjukkan pada **Gambar 4.5**, dengan setpoint temperatur sebesar 800°C . Berdasarkan hasil pengujian hingga menit ke-60, temperatur *furnace* mengalami peningkatan secara bertahap dari kondisi awal sebesar 32°C . Pada sekitar menit ke-40, temperatur mencapai sekitar $493,5^{\circ}\text{C}$ dan terus meningkat hingga mencapai sekitar $539,5^{\circ}\text{C}$ pada menit ke-60. Meskipun respons sistem menunjukkan kenaikan temperatur yang stabil, nilai tersebut masih belum mencapai setpoint yang telah ditentukan.



Gambar 4. 5 Grafik Respon Sistem *Furnace* dengan Lambda *Tuning*

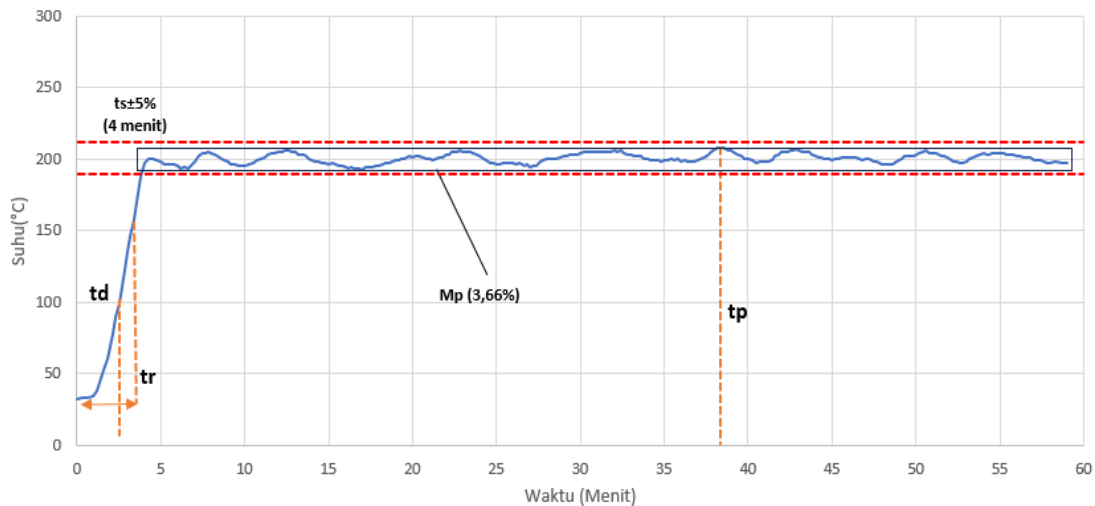
Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa parameter hasil *Lambda Tuning* yang digunakan belum mampu menghasilkan respons yang cukup cepat untuk mencapai setpoint 800°C dalam waktu satu jam. Meskipun respons temperatur cenderung meningkat secara bertahap dan tidak menunjukkan *overshoot* selama pengujian, sistem masih memiliki *error* yang cukup besar terhadap setpoint. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa parameter pengendali PID, yaitu K_p , K_i , dan K_d , masih perlu dilakukan proses *tuning* lebih lanjut.

4.2.3 Pengujian dan Analisis Variasi Setpoint

Pada pengujian dan analisis variasi setpoint 200°C, 400°C, 600°C & 800°C, parameter PID yang digunakan merupakan hasil proses identifikasi sistem melalui pendekatan *First Order Plus Dead Time* (FOPDT) dan kemudian dilakukan *self tuning* sehingga diperoleh nilai $K_p = 3.5$, $K_i = 0.0008$, dan $K_d = 70.0$. Selain itu, analisis dilakukan terhadap grafik respon sistem dan *Manipulated Variable* serta perubahan waktu ON (Ton) dan waktu OFF (Toff) pada metode *Time Proportional Control* (TPC) yang menggunakan periode kontrol 10s.

Pada pengujian variasi setpoint 200°C ini memiliki suhu awal sebesar 33°C, sistem memiliki *delay time* (t_d) sebesar 2,52 menit, yang berarti *furnace* membutuhkan waktu tersebut hingga temperatur mencapai sekitar 50% dari nilai akhir. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan respon awal dengan cepat setelah menerima perubahan setpoint. Nilai *rise time* (t_r) sebesar 3,72 menit, yaitu waktu meningkatnya temperatur dari sekitar 10% - 90% dari nilai akhir. Nilai *rise time* yang singkat menunjukkan bahwa proses pemanasan berlangsung sangat cepat karena target temperatur yang relatif rendah. Setelah mendekati setpoint, laju kenaikan temperatur mulai melambat akibat aksi pengendali PID yang mengurangi daya keluaran menuju *heater* sehingga temperatur dapat dikendalikan secara bertahap yang tertampil pada **Lampiran 1**. Sistem mencapai *peak time* (t_p) pada menit ke-38, dengan temperatur maksimum sekitar 208 °C. Kondisi percobaan ini menghasilkan *maximum percent overshoot* (M_p) sebesar 3,66%. *Maximum overshoot* ini diambil dari nilai (t_p) lalu dikurang nilai *steady state* kemudian dibagi nilai nilai *steady state*, lalu dikali 100%.

Nilai *overshoot* ini juga masih tergolong kecil dan menunjukkan bahwa sistem tetap mampu mengendalikan temperatur tanpa menyebabkan kenaikan yang berlebihan terlihat pada **Gambar 4.6**.



Gambar 4. 6 Grafik Respon Setpoint 200°C

Berdasarkan batas toleransi $\pm 5\%$, diperoleh *settling time* (ts) sebesar 4 menit. Artinya, temperatur telah memasuki rentang 190–210°C dan tetap berada di dalam batas toleransi tersebut hingga akhir pengujian. Setelah mengalami sedikit *overshoot*, temperatur secara bertahap turun dan stabil di sekitar setpoint tanpa mengalami osilasi yang berulang, sehingga sistem berhasil mencapai kondisi tunak (*steady state*) dengan cepat. Nilai *overshoot* terjadi karena energi panas yang tersimpan pada elemen pemanas masih terus berpindah ke ruang *furnace* meskipun keluaran pengendali telah dikurangi, sehingga temperatur sesaat melewati nilai setpoint sebelum akhirnya kembali stabil pada temperatur yang diinginkan. Rata-rata nilai saat pertama kali setpoint hingga data terakhir merupakan nilai *steady state*, yang mana pada percobaan ini yaitu 200,65°C yang berarti *error steady state* sebesar 0,33%.

Tabel 4. 10 Tabel *Output* TPC Setpoint 200°C

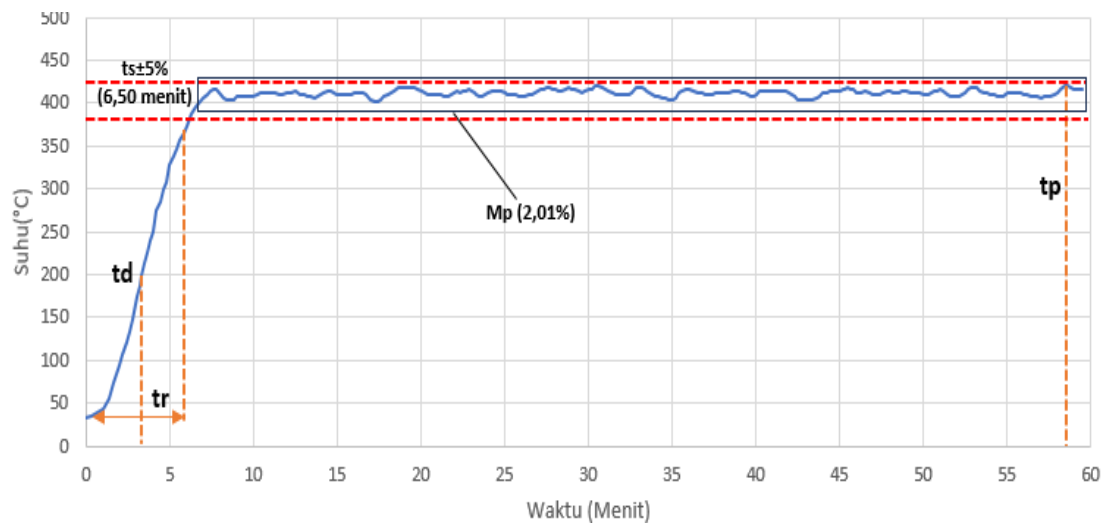
Suhu (°C)	MV(%)	Ton(s)	Toff(s)
171	53,6	5,4	4,6
181	1,2	0,1	9,9
188,25	25,9	2,6	7,4
194,25	24,2	2,4	7,6
197,50	10,2	1	9
199	20,7	2,1	7,9
200,50	0	0	10
200	35,6	3,6	6,4
198,50	39,1	3,9	6,1

Pada awal pemanasan (100–170°C), nilai MV sebesar 100% sehingga Ton = 10 detik dan Toff = 0 detik. Kondisi ini menunjukkan bahwa SSR memberikan daya maksimum agar suhu *furnace* meningkat dengan cepat menuju setpoint. Ketika suhu mendekati setpoint, nilai MV mulai menurun pertama kali pada suhu 171°C sehingga waktu ON semakin pendek dan waktu OFF semakin panjang. Hal ini dilakukan untuk mengurangi daya pemanas secara bertahap sehingga kenaikan suhu menjadi lebih terkendali.

Saat suhu mencapai 200,50 °C, nilai MV menjadi 0% sehingga *heater* berhenti bekerja. Namun, karena adanya panas yang masih tersimpan pada elemen SiC dan ruang *furnace*, suhu masih stabil hingga 200-198°C. Setelah suhu mulai turun menjadi 198°C, PID kembali memberikan MV sebesar 39,1% sehingga *heater* menyala selama 3,9 detik untuk menjaga suhu tetap berada di sekitar setpoint. Hal ini menunjukkan bahwa metode TPC mampu mengatur daya *heater* secara bertahap sehingga temperatur *furnace* menjadi lebih stabil.

Pengujian variasi setpoint 400°C ini, suhu awal pada *furnace* $33,25^{\circ}\text{C}$ yang kemudiam didapat *delay time* (t_d) pada sistem sebesar 3,41 menit untuk memperoleh sekitar 200°C . Nilai ini menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan respon awal yang cepat terhadap perubahan setpoint, sehingga proses pemanasan dapat dimulai dalam waktu yang relatif singkat.

Selanjutnya, nilai *rise time* (t_r) sebesar 5,14 menit yang dibutuhkan sistem untuk meningkatkan temperatur dari 10% - 90% dari nilai akhir. Waktu ini hampir sekitar satu kali lipat lebih lama dari variasi sebelumnya, hal tersebut wajar karena perbedaan capaian setpoint.



Gambar 4. 7 Grafik Respon Setpoint 400°C

Pada setpoint ini mengalami *overshoot* yang signifikan yaitu pada suhu 420°C , sehingga *peak time* (t_p) nya pada waktu 58,60 menit dan *maximum percent overshoot* (M_p) bernilai 2,01% yang dapat dilihat pada **Gambar 4.7**. Meskipun memiliki *overshoot* yang lebih besar dari sebelumnya, hal ini mengindikasikan bahwa parameter PID yang digunakan masih mampu mengendalikan proses pemanasan dengan baik, sehingga sistem dapat mencapai temperatur target tanpa risiko terjadinya pemanasan berlebih (*overheating*) yang diatas toleransi.

Sistem pada variasi setpoint ini juga mencapai nilai *settling time* $\pm 5\%$ pada waktu 6,50 menit dalam rentang 380–420 °C. Hal ini menunjukkan bahwa sistem telah mencapai kondisi tunak (*steady state*) dengan cepat dan tidak mengalami osilasi yang berarti.

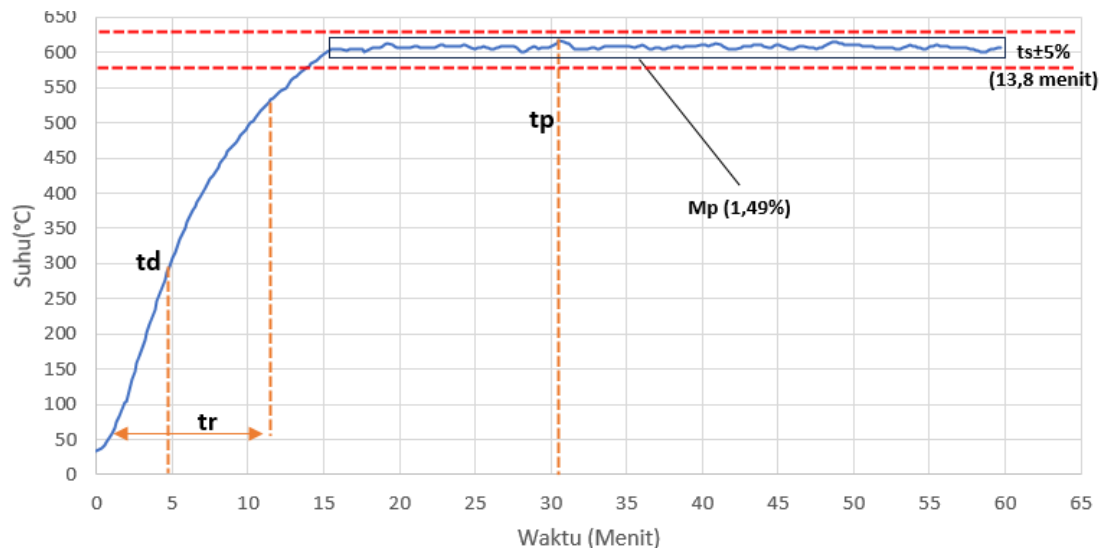
Tabel 4. 11 Tabel *Output* TPC Setpoint 400°C

Suhu (°C)	MV(%)	Ton(s)	Toff(s)
382,25	59,4	5,9	4,1
388,50	68,3	6,8	3,2
393,25	65,7	6,6	3,4
396,50	100	10	0
402,25	94,6	9,5	0,5
406,50	43,9	4,4	5,6
408,75	84,1	8,4	1,6
414,75	31,4	3,1	6,9
415	31,4	3,1	6,9

Pada **Tabel 4.11** saat suhu masih jauh di bawah setpoint, MV bernilai 100%, kondisi ini membuat elemen pemanas menerima daya secara penuh untuk mempercepat kenaikan temperatur.

Ketika suhu mendekati setpoint, PID mulai menurunkan nilai MV sehingga waktu Ton menjadi lebih pendek dan Toff bertambah panjang. Perubahan ini menyebabkan daya yang disalurkan ke elemen SiC berkurang secara periodik. Pada **Lampiran 2.** data yang terpantau sekaligus membuktikan karakteristik dari elemen pemanas *Silicon Carbide* (SiC) yang digunakan. Sistem beroperasi pada tegangan 69,1 Volt yang sesuai dengan batasan dari pengatur tegangan AC, namun menarik arus yang cukup besar yakni 16,99 Ampere dan menghasilkan total daya hingga 1173,5 Watt. Berdasarkan perhitungan Hukum Ohm, resistansi total elemen pemanas pada suhu 416,5°C telah turun drastis menjadi sekitar 4,06 Ohm, jauh lebih rendah dibandingkan dengan resistansi awalnya di suhu ruang yang berada di kisaran 7 Ohm.

Pengujian ketiga dengan setpoint 600°C menunjukkan bahwa sistem memiliki *delay time* (t_d) sebesar 4,94 menit mencapai temperatur sekitar 300°C . Hal variasi ini sistem mulai merespons proses pemanasan dengan cukup cepat meskipun *furnace* memiliki karakteristik inersia termal yang menyebabkan kenaikan temperatur tidak terjadi secara instan. Kemudian, nilai *rise time* (t_r) sebesar 11,18 menit menunjukkan bahwa proses pemanasan berlangsung relatif cepat dan bertahap tanpa adanya lonjakan temperatur yang signifikan. Seiring temperatur mendekati setpoint, laju kenaikan suhu mulai melambat karena keluaran pengendali PID berkurang sehingga daya yang diberikan ke *heater* menjadi lebih kecil untuk menghindari terjadinya *overshoot*.



Gambar 4. 8 Grafik Respon Setpoint 600°C

Respon sistem mencapai *peak time* (t_p) pada menit ke-30,53 pada temperatur sekitar $616,5^{\circ}\text{C}$. Kondisi secara keseluruhan menghasilkan *maximum percent overshoot* (M_p) sebesar 1,49%, yang menunjukkan temperatur hanya sedikit melewati setpoint seperti pada **Gambar 4.8**. Selain itu, pada grafik diketahui *settling time* (t_s) sebesar 13,83 menit yang mana temperatur telah memasuki rentang $570\text{--}630^{\circ}\text{C}$ dan tetap berada di dalam batas toleransi tersebut hingga akhir pengujian. Nilai *overshoot* yang sangat kecil tersebut mengindikasikan bahwa parameter PID yang digunakan mampu mengendalikan proses pemanasan secara baik sehingga risiko *overheating*

dapat diminimalkan dan sistem telah mencapai kondisi tunak (*steady state*) dengan cepat serta tidak mengalami osilasi yang berarti.

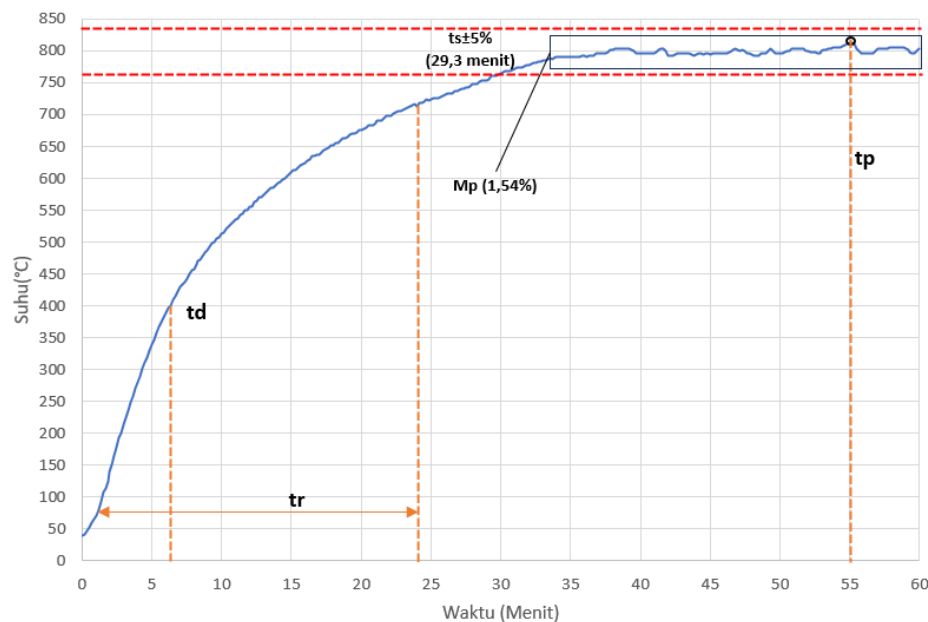
Tabel 4. 12 Tabel *Output* TPC Setpoint 600°C

Suhu (°C)	MV(%)	Ton(s)	Toff(s)
600,25	82,5	8,3	1,8
602,25	74,6	7,5	2,5
603,75	100	10	0
603,75	69,3	6,9	3,1
604,5	100	10	0
604,25	67,5	6,8	3,2
604,75	82,3	8,2	1,8
604,5	100	10	0
603,5	68,3	6,8	3,2

Pada setpoint 600°C, nilai *Manipulated Variable* (MV) berubah secara bertahap mengikuti selisih antara suhu *furnace* dan setpoint. Saat suhu masih berada pada 590 °C, nilai MV sebesar 100% sehingga Ton = 10 detik dan Toff = 0 detik, menandakan *heater* bekerja pada daya maksimum untuk mempercepat kenaikan temperatur. Ketika suhu 600,25 °C, nilai MV mulai menurun hingga 82,5% saat terjadi pertama kali perubahan. Dengan adanya perubahan menuju setpoint sehingga waktu Ton menjadi lebih pendek dan Toff lebih panjang untuk mengurangi daya pemanas.

Saat suhu mencapai sekitar 602–604°C, nilai MV dipertahankan pada kisaran 62–100%, sehingga Ton sekitar 6–10 detik dan Toff sekitar 0 - 3 detik. Yang mana pergerakannya dapat dilihat dari keluaran tegangan, arus dan daya yang ada pada **Lampiran 3**. Hal ini menunjukkan bahwa metode *Time Proportional Control* (TPC) mampu mengatur daya *heater* secara proporsional berdasarkan keluaran PID, sehingga temperatur *furnace* dapat dipertahankan di sekitar 600°C dengan fluktuasi yang kecil dan kondisi sistem tetap stabil dengan *error steady state* 1,24%.

Pada pengujian variasi setpoint 800°C ini, suhu awal dimulai dari 39°C yang kemudian sistem dijalankan selama kurang lebih 60 menit seperti pada **Gambar 4.9** . Dari gambar tersebut dapat diketahui sistem memiliki *delay time* (t_d) sebesar 6,30 menit, yang berarti *furnace* membutuhkan waktu sekitar 6,30 menit hingga temperatur mencapai sekitar 400°C. Selanjutnya, *rise time* (t_r) diperoleh sebesar 23,26 menit dan nilai *peak time* (t_p) 55,17 menit pada saat sistem mencapai suhu maksimum sekitar 812,25 °C.



Gambar 4.9 Grafik Respon Setpoint 800°C

Meskipun nilai *peak time*(t_p) tersebut hingga mencapai 812,25°C, nilai *maximum percent overshoot* (M_p) diperoleh sebesar 1,54%. Nilai *overshoot* yang sangat kecil menunjukkan pada setpoint relative besar, menunjukkan bahwa parameter PID yang digunakan mampu menekan terjadinya kenaikan temperatur yang berlebihan (*overheating*), sehingga sistem memiliki kestabilan yang baik dan aman untuk proses pemanasan *furnace*.

Berdasarkan batas toleransi $\pm 5\%$, sistem memiliki *settling time* (t_s) sebesar 29,33 menit yang telah memasuki rentang 760–840 °C dan tetap berada di dalam batas toleransi tersebut hingga akhir pengujian. Dengan demikian, respon sistem dapat dikatakan

stabil, memiliki *overshoot* yang rendah, dan mampu mempertahankan temperatur mendekati setpoint 800 °C dengan baik.

Tabel 4. 13 Tabel *Output* TPC Setpoint 800°C

Suhu (°C)	MV(%)	Ton(s)	Toff(s)
789,75	86	8,6	1,4
789,75	62,4	6,2	3,8
789	100	10	0
787,25	91,2	9,1	0,9
787,75	100	0	0
791,25	59,7	6	4
790,25	97,4	9,7	0,3
793,5	69,4	6,9	3,1
801	93,6	9,4	0,6

Pada data **Tabel 4.13**, menunjukkan bahwa MV terus berubah mengikuti kondisi suhu *furnace*. Saat suhu masih berada pada 785 °C, nilai MV sebesar 100%. Ketika suhu mendekati 800 °C, nilai MV mulai menurun, pada tabel menjadi 86%, 62,4%, hingga 69,4%, sehingga waktu Ton menjadi lebih pendek dan Toff lebih panjang untuk mengurangi daya pemanas. Setelah suhu melewati setpoint hingga 801°C, PID masih memberikan keluaran MV sebesar 93,6% agar tetap mempertahankan setpoint.

Pada **Lampiran 4.** data yang ditampilkan memberikan temuan fenomena yang menarik terkait karakteristik elemen pemanas SiC. Dengan tegangan operasional 69,8 Volt dan arus yang ditarik sebesar 15,1 Ampere menghasilkan daya 1054,4 W, kalkulasi Hukum Ohm menunjukkan bahwa resistansi total SiC pada suhu 802,75°C berada di kisaran 4,62 Ohm. Jika dibandingkan dengan pengujian Anda sebelumnya di suhu 400°C (di mana resistansi berada di angka 4,06 Ohm), terlihat jelas bahwa resistansi elemen SiC kini mulai mengalami kenaikan. Fenomena ini secara empiris memvalidasi kurva resistansi SiC yang khas serta material ini bersifat *Negative Temperature Coefficient* (hambatan menurun drastis dari suhu ruang ke suhu menengah), namun

perlahan berubah menjadi *Positive Temperature Coefficient* (hambatan kembali naik) ketika dipanaskan melewati suhu 600°C–800°C.

Berdasarkan hasil pengujian pada berbagai variasi setpoint, metode PID yang dikombinasikan dengan *Time Proportional Control* (TPC) mampu mengendalikan temperatur *furnace* secara stabil dan konsisten. Peningkatan setpoint menyebabkan waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai kondisi tunak menjadi lebih lama, yang menunjukkan adanya pengaruh kapasitas panas dan inersia termal *furnace* pada temperatur yang lebih tinggi. Meskipun demikian, respon sistem tetap terkendali tanpa osilasi yang berlebihan serta mampu mencapai kondisi tunak dengan *error* yang kecil terhadap nilai referensi. Hal tersebut menunjukkan bahwa parameter PID yang diperoleh mampu menghasilkan keseimbangan antara kecepatan respon dan kestabilan sistem, sehingga proses pemanasan dapat berlangsung secara akurat pada seluruh rentang temperatur pengujian.

Tabel 4. 14 Tabel Performa Sistem pada Variasi Setpoint

Parameter	Setpoint(°C)			
	200	400	600	800
<i>Delay Time</i> (menit)	2,52	3,41	4,94	6,30
<i>Rise Time</i> (menit)	3,72	5,14	11,18	23,26
<i>Peak Time</i> (menit)	38,17	58,60	30,53	55,17
<i>Maximum Overshoot</i> (%)	3,66	2,01	1,49	1,54
<i>Settling Time</i> (menit)	4	6,50	13,83	29,33
<i>Steady State Error</i> (%)	0,33	2,93	1,24	0

Terlihat pada **Tabel 4.14** bahwa peningkatan pada *delay time*, *rise time*, *peak time* dan juga *settling time* terjadi karena adanya peningkatan setpoint yang menyebabkan temperatur membutuhkan waktu untuk secara bertahap sesuai dengan nilai yang diinginkan. Selain itu, nilai *steady state error* didapatkan dari data pertama kali mencapai setpoint hingga terakhir yang tercatat pada pengujian, yang mana menunjukkan bahwa sistem mempunyai rata rata penyimpangan yang sangat kecil pada setiap variasi setpoint dengan nilai dibawah 3%.