

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA

4.1 Hasil Pengujian Komponen

Bab ini disusun berdasarkan hasil percobaan dan pengujian yang telah dilakukan selama proses perancangan dan pembuatan alat tugas akhir. Pembahasan difokuskan pada evaluasi kinerja alat, baik ditinjau dari performa masing-masing komponen maupun dari alur kerja sistem secara keseluruhan. Pengujian komponen dilakukan terhadap perangkat utama, seperti *Power Supply* 12V 10A, sensor PZEM-004T, Sensor *Thermocouple Type K*, serta *Pilot Lamp* 12V. Hasil pengujian tersebut kemudian dibandingkan dengan spesifikasi teknis setiap komponen untuk mengetahui tingkat kesesuaiannya.

Setelah pengujian komponen selesai, pengujian dilanjutkan pada sistem secara terintegrasi untuk memastikan seluruh bagian dapat bekerja sesuai dengan tujuan perancangan. Data yang diperoleh dari proses pengujian digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi kekurangan sistem dan melakukan penyempurnaan melalui metode *trial and error*. Proses tersebut dilakukan agar alat dapat mencapai kinerja yang optimal serta memenuhi fungsi yang telah ditetapkan.

4.1.1 Pengujian Power Supply 12V 10A

Power supply 12 V 10 A digunakan sebagai sumber catu daya utama untuk menyediakan energi listrik bagi berbagai komponen dalam sistem. Pengujian terhadap perangkat ini dilakukan untuk memastikan bahwa tegangan keluarannya telah sesuai dengan spesifikasi yang ditentukan. Kestabilan tegangan menjadi aspek penting karena penyimpangan nilai keluaran dapat memengaruhi performa komponen, menimbulkan ketidakakuratan pembacaan sensor, serta mengganggu kerja sistem secara keseluruhan. Oleh sebab itu, hasil pengujian digunakan untuk memastikan bahwa *power supply* mampu menghasilkan tegangan yang stabil dan memenuhi kebutuhan daya selama sistem dioperasikan. Pada Gambar dan Tabel 4.1 dan 4.2 dapat dilihat hasil pengujian *power supply*.

Tabel 4. 1 Pengujian *Power Supply* Tanpa Beban

Pengujian	V Input (VAC)	V Output (VDC)	Arus Output (A)	V Spesifikasi (VDC)	Error Tegangan (%)
1	220	11.6	0.01	12	3.33%
2	220	11.6	0.01	12	3.33%
3	220	11.6	0.01	12	3.33%
Rata-Rata Error (%)					3.33%

Tabel 4. 2 Pengujian *Power Supply* Dengan Beban

Pengujian	V Input (VAC)	V Output (VDC)	Arus Output (A)	V Spesifikasi (VDC)	Error Tegangan (%)
1	220	11.6	1.23	12	3.33%
2	220	11.6	1.24	12	3.33%
3	220	11.6	1.23	12	3.33%
Rata-Rata Error (%)					3.33%

*Gambar 4. 1* Pengujian *Power Supply* Tanpa Beban



Gambar 4. 2 Penngujian Power Supply dengan Beban

Berdasarkan Tabel 4.1 dan 4.2 serta Gambar 4.1 dan 4.2, dapat dilihat bahwa pengujian *power supply* dilakukan sebanyak tiga kali pada dua kondisi, yaitu tanpa beban dan dengan beban. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kestabilan tegangan keluaran serta kemampuan *power supply* dalam menyuplai arus listrik kepada sistem. Pada seluruh percobaan, tegangan masukan yang diberikan sebesar 220 VAC.

Pada kondisi pengujian tanpa beban yang ditunjukkan pada Tabel 4.1, tegangan keluaran *power supply* terukur konstan sebesar 11,60 VDC pada setiap pengujian. Nilai tersebut sedikit lebih rendah dibandingkan spesifikasi 12 VDC, dengan persentase kesalahan rata-rata sebesar 3.33%. Arus keluaran yang terbaca hanya sekitar 0,01 A karena belum terdapat beban yang terhubung. Selisih tegangan yang relatif kecil tersebut masih dapat ditoleransi dan tidak memberikan dampak yang berarti terhadap kinerja sistem.

Sementara itu, pada kondisi berbeban sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.2, tegangan keluaran tetap stabil pada 11,60 VDC dengan persentase kesalahan yang sama, yaitu 3.33%. Namun, arus keluaran meningkat menjadi sekitar 1,23–1,24 A akibat adanya komponen yang menerima suplai daya. Peningkatan arus tanpa disertai penurunan tegangan yang signifikan menunjukkan bahwa *power supply*

mampu memenuhi kebutuhan daya sistem dengan baik. Nilai arus tertinggi yang terukur juga masih jauh di bawah kapasitas maksimum perangkat, yaitu 10 A, sehingga *power supply* masih memiliki kemampuan yang sangat cukup untuk mendukung pengoperasian sistem.

Berdasarkan hasil pengujian, *power supply* menunjukkan kinerja regulasi tegangan yang baik karena mampu menjaga tegangan keluaran tetap stabil pada sekitar 11,60 VDC, baik ketika tidak diberi beban maupun saat digunakan untuk menyuplai beban sistem. Persentase kesalahan rata-rata yang hanya sebesar 3.33% menunjukkan bahwa perangkat bekerja sesuai nilai spesifikasinya. Dengan demikian, *power supply* dinilai layak digunakan sebagai sumber catu daya bagi seluruh komponen pada sistem *furnace* yang dirancang.

4.1.2 Pengujian Sensor PZEM-004T

Pengujian sensor PZEM-004T dilakukan untuk mengetahui tingkat kesesuaian pembacaan tegangan dan arus sebelum sensor digunakan pada sistem monitoring efisiensi *furnace*. Sensor ini nantinya digunakan untuk mengukur keluaran listrik AC yang dialirkan menuju rangkaian pemanas. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan PZEM-004T terhadap multimeter standar pada rangkaian dan waktu pengukuran yang sama. Data diambil sebanyak 20 kali pengulangan, kemudian selisih pembacaan dan persentase kesalahannya dihitung dengan menjadikan hasil multimeter sebagai nilai referensi. Pada Tabel 4.3 dapat dilihat hasil pengujian sensor *PZEM-004T*.

Tabel 4. 3. Pengujian Sensor *PZEM-004T* dengan Multi Meter Standar

Pengujian	PZEM-004T		Multi Meter Standar		Selisih V	Selisih I
	V	I	V	I		
1	220	0.10	219	0.10	1.00	0.00
2	218.7	0.10	216	0.10	2.70	0.00
3	220	0.10	217	0.10	3.00	0.00
4	219.1	0.10	216	0.10	3.10	0.00
5	219	0.10	216	0.10	3.00	0.00

Tabel 4.3. Lanjutan

Pengujian	PZEM-004T		Multi Meter Standar		Selisih V	Selisih I
	V	I	V	I		
6	219	0.10	216	0.10	3.00	
7	219.1	0.10	216	0.10	3.10	0.00
8	219.5	0.10	217	0.10	2.50	0.00
9	219.9	0.10	217	0.10	2.90	0.00
10	219.7	0.10	217	0.10	2.70	0.00
11	219.7	0.10	217	0.10	2.70	0.00
12	218.7	0.10	216	0.10	2.70	0.00
13	219.4	0.10	216	0.10	3.40	0.00
14	219.3	0.10	216	0.10	3.30	0.00
15	220.2	0.10	217	0.10	3.20	0.00
16	219.6	0.10	216	0.10	3.60	0.00
17	220.5	0.10	217	0.10	3.50	0.00
18	220.8	0.10	217	0.10	3.80	0.00
19	221	0.10	217	0.10	4.00	0.00
20	221.1	0.10	218	0.10	3.10	0.00
Rata-rata selisih					3.015	0

Berdasarkan Tabel 4.3, hasil pembacaan tegangan oleh PZEM-004T berada pada rentang 218,7–221,1 V, sedangkan multimeter standar menunjukkan nilai antara 216–219 V. Rata-rata tegangan yang terbaca oleh PZEM-004T sebesar 219,715 V, sementara rata-rata hasil pengukuran multimeter sebesar 216,700 V. Dengan demikian, rata-rata selisih pembacaan tegangan kedua alat sebesar 3,015 V. Selisih terkecil ditemukan pada pengujian pertama sebesar 1 V, sedangkan selisih terbesar terdapat pada pengujian ke-19 sebesar 4 V.

Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa nilai tegangan yang terbaca oleh PZEM-004T secara konsisten lebih tinggi daripada hasil pengukuran multimeter. Berdasarkan perbandingan terhadap nilai referensi, rata-rata persentase kesalahan

pembacaan tegangan sebesar 1,39%. Persentase kesalahan terkecil sebesar 0,46%, sedangkan nilai terbesar sebesar 1,84%. Meskipun terdapat kecenderungan pembacaan yang lebih tinggi, selisih yang dihasilkan relatif kecil dibandingkan nilai tegangan kerja sekitar 220 VAC. Oleh karena itu, pembacaan tegangan PZEM-004T dinilai cukup konsisten untuk digunakan dalam sistem monitoring *furnace*. Pada pengujian arus, PZEM-004T dan multimeter standar sama-sama menunjukkan nilai 0,10 A pada seluruh pengulangan. Dengan demikian, tidak terdapat selisih pembacaan arus antara kedua alat pada kondisi pengujian tersebut. Hasil ini menunjukkan bahwa PZEM-004T mampu membaca arus secara konsisten.

Berdasarkan hasil pengujian secara keseluruhan, sensor PZEM-004T mampu membaca tegangan dan arus AC dengan hasil yang mendekati multimeter standar. Rata-rata kesalahan pembacaan tegangan sebesar 1,39%, sedangkan pembacaan arus tidak menunjukkan selisih pada kondisi pengujian. Oleh karena itu, sensor PZEM-004T dinilai dapat digunakan untuk memantau tegangan dan arus pada rangkaian pemanas *furnace*.

4.1.3 Pengujian Sensor *Thermocouple Type K*

Pengujian sensor *thermocouple* tipe K dilakukan untuk mengetahui kesesuaian pembacaan temperatur sensor yang digunakan pada sistem *furnace* terhadap alat ukur pembanding. Sensor *thermocouple* tipe K digunakan sebagai sensor utama untuk memantau temperatur ruang pemanasan, sedangkan *thermogun* digunakan sebagai alat pembanding selama pengujian. Pengujian ini diperlukan karena data temperatur menjadi dasar dalam pencatatan titik *START*, *REACH*, dan *STOP* serta pendeteksian kondisi alarm.

Pengujian dimulai pada temperatur ruang, kemudian *furnace* dipanaskan secara bertahap dengan interval sekitar 50°C hingga mencapai temperatur sekitar 400°C. Pada setiap titik pengujian, pembacaan *thermocouple* dan *thermogun* dicatat pada kondisi temperatur yang relatif stabil. Selisih pembacaan ditentukan dengan membandingkan nilai *thermocouple* terhadap nilai yang ditampilkan oleh *thermogun*. Gambar 4.3 memperlihatkan bagaimana proses pengambilan data dengan menggunakan *thermogun*.



Gambar 4. 3. Proses Pengujian Thermocouple Tipe K Menggunakan Thermogun

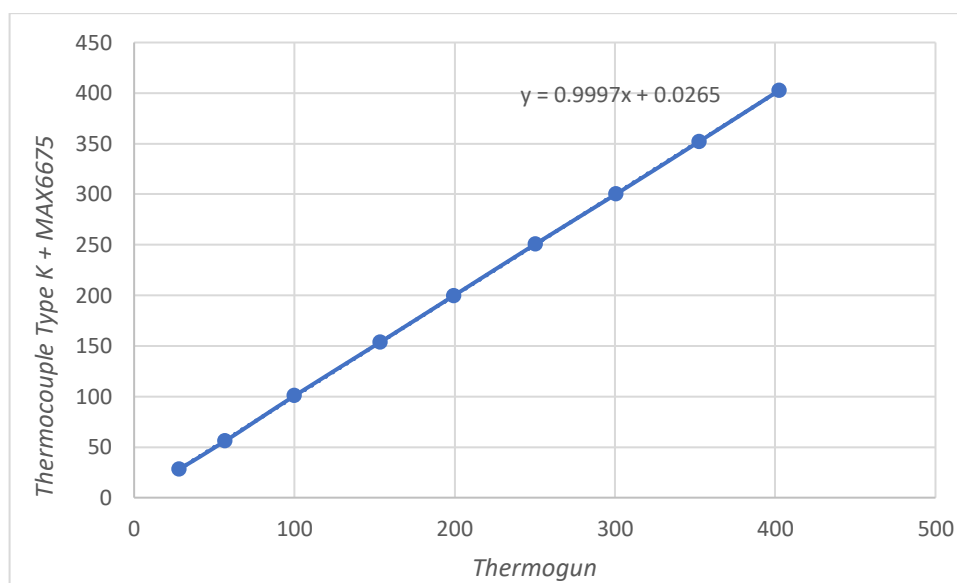
Hasil pengujian sensor *thermocouple* tipe K ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4. Pengujian Sensor *Thermocouple Type K*

Pengujian	Pembacaan Thermocouple dengan modul MAX6675	Pembacaan Thermogun	selisih	error
1	28	28	0	0.00%
2	56	56.8	0.8	1.41%
3	100.75	100.1	0.65	0.65%
4	153.75	153.6	0.15	0.10%
5	199.75	199.5	0.25	0.13%
6	250.75	250.4	0.35	0.14%
7	300	300.6	0.6	0.20%
8	352	352.5	0.5	0.14%
9	402.75	402.6	0.15	0.04%
Rata-Rata =			0.3833	0.31%

Berdasarkan Tabel 4.4, selisih pembacaan sensor berada pada rentang 0°C sampai 0,65°C. Selisih terbesar terjadi pada temperatur 56°C, yaitu sebesar 0,8°C, sedangkan pada temperatur ruang tidak terdapat selisih pembacaan. Pada temperatur sekitar 400°C, *thermocouple* membaca 402,75°C dan *thermogun* membaca 402,6°C sehingga hanya terdapat selisih sebesar 0,15°C. Adapun rata rata dari selisih pembacaan kedua alat ini sebesar 0,38°C. Nilai yang mendekati nol tersebut menunjukkan bahwa pembacaan thermocouple yang digunakan pada sistem ini tidak lebih tinggi maupun lebih rendah dari pada pembacaan sensor

standar (*thermogun*). Pada Gambar 4.4 dapat dilihat grafik perbandingan antara pembacaan



Gambar 4. 4. Grafik Perbandingan Pembacaan *Thermocouple Type K* dengan MAX6675 dan *Thermogun*

Berdasarkan Gambar 4.4, hubungan antara hasil pembacaan *Thermocouple Type K* dengan modul MAX6675 dan *thermogun* menunjukkan pola yang sangat mendekati hubungan linier ideal. Hasil regresi linier dengan pembacaan *thermogun* sebagai sumbu-x dan pembacaan *thermocouple* sebagai sumbu-y menghasilkan persamaan $y = 0,9997x + 0,0265$.

Nilai gradien sebesar 0,9997 sangat mendekati nilai ideal 1. Hal tersebut menunjukkan bahwa perubahan pembacaan temperatur pada *thermocouple* hampir sebanding dengan perubahan temperatur yang ditunjukkan oleh *thermogun*. Sementara itu, nilai intersep sebesar 0,0265 yang mendekati nol menunjukkan bahwa penyimpangan tetap (*offset*) antara kedua alat sangat kecil. Dengan demikian, hasil pembacaan *thermocouple* memiliki kecenderungan yang sangat dekat dengan alat ukur pembandingan pada rentang temperatur pengujian.

Perbedaan kecil antara kedua alat tetap dapat terjadi karena prinsip pengukurannya berbeda. *Thermocouple* mengukur temperatur melalui kontak langsung pada titik sensor, sedangkan *thermogun* menggunakan radiasi inframerah

dari permukaan objek. Pembacaan *thermogun* dapat dipengaruhi oleh emisivitas permukaan, jarak pengukuran, sudut pengukuran, dan keseragaman temperatur pada area yang diamati. Oleh karena itu, selisih yang diperoleh tidak seluruhnya menunjukkan kesalahan pada sensor *thermocouple*, tetapi juga dapat berasal dari perbedaan metode pengukuran kedua alat.

Berdasarkan hasil pengujian terhadap *Thermocouple Type K* dengan modul MAX6675, dapat diketahui bahwa sensor memiliki kesesuaian pembacaan yang sangat baik terhadap *thermogun*, ditunjukkan oleh gradien regresi sebesar 0,9997, nilai intersep sebesar 0,0265, serta rata-rata *error* sebesar 0,31%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor dapat digunakan sebagai perangkat pengukuran temperatur pada sistem *furnace* untuk mendukung proses monitoring, pencatatan *START-REACH-STOP*, serta pendeteksian kondisi alarm.

4.1.4 Pengujian Karakteristik Batang Silicon Carbide

Pengujian karakteristik batang SiC ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana hubungan tegangan dan arus pada setiap batang sebelum seluruh elemen disusun menjadi satu rangkaian pemanas *furnace*. Pengujian dilakukan terhadap empat batang SiC yang memiliki resistansi awal berbeda pada temperatur ruang, yaitu SiC 1 sebesar 1,5 Ω , SiC 2 sebesar 1,3 Ω , SiC 3 sebesar 1,5 Ω , dan SiC 4 sebesar 2,7 Ω . Setiap batang diuji menggunakan sumber tegangan AC dengan maksimal 11 *Ampere*. Tegangan dinaikkan secara bertahap mulai dari sekitar 1 V hingga batas pengujian masing-masing elemen, kemudian tegangan dan arus aktual diukur menggunakan multimeter. Data hasil pengukuran selanjutnya diubah menjadi nilai $\ln V$ dan $\ln I$, kemudian dianalisis menggunakan regresi linear untuk memperoleh nilai gradien n , konstanta γ . Tabel 4.5 memperlihatkan hasil pengujian pada batang pertama.

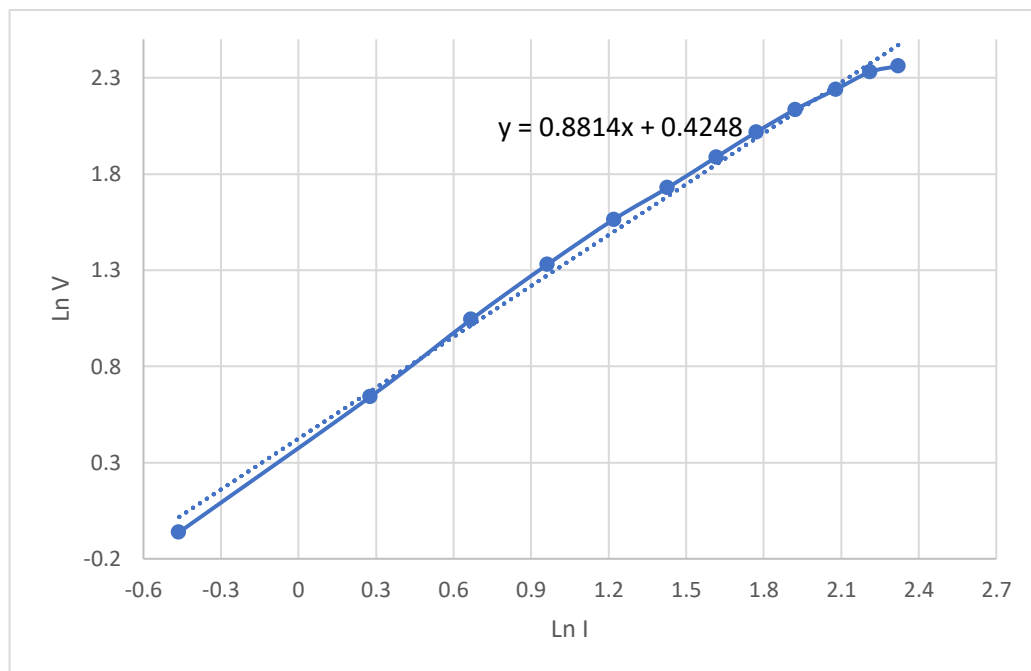
Tabel 4.5. Hasil Pengujian Batang SiC 1 (1.5 ohm)

Vin	V multi	I Multi	Ln V	Ln I
1	0.94	0.63	-0.061875	-0.462035
2	1.9	1.32	0.6418539	0.2776317
3	2.84	1.95	1.0438041	0.6678294
4	3.78	2.62	1.329724	0.9631743

Tabel 4.5. Lanjutan

Vin	V multi	I Multi	Ln V	Ln I
5	4.78	3.39	1.5644405	1.2208299
6	5.63	4.17	1.7281094	1.427916
7	6.61	5.04	1.8885837	1.6174061
8	7.53	5.89	2.018895	1.773256
9	8.46	6.84	2.1353492	1.9227877
10	9.39	8	2.2396453	2.0794415
11	10.28	9.13	2.3302003	2.2115657
11.5	10.6	10.2	2.360854	2.3223877

Dari data hasil pengujian tersebut didapatkan grafik yang dapat dilihat seperti pada gambar 4.5 sebagai berikut:



Gambar 4.5. Grafik Hubungan LnI dan LnV Sic 1

Berdasarkan Tabel 4.5, dapat diketahui bahwa SiC 1 memiliki resistansi awal sebesar $1,5 \, \Omega$ pada temperatur ruang. Lalu setelah tegangan yang dialirkan ditingkatkan secara bertahap dari 0,94 V hingga 10,60 V, arus yang mengalir meningkat dari 0,63 A hingga 10,20 A. Kenaikan arus tersebut menunjukkan SiC 1 mampu menghantarkan arus secara kontinu ketika tegangan masukan dinaikkan. Akan tetapi, kenaikan arus tidak sepenuhnya sebanding dengan kenaikan tegangan karena kondisi resistansi elemen berubah selama proses pengujian.

Berdasarkan Gambar 4.5, dapat dilihat grafik yang menunjukkan hubungan antara $\ln I$ dan $\ln V$ pada pengujian batang SiC 1 ini. Hubungan ini menghasilkan persamaan regresi linear:

$$\ln V = 0.8814 \ln I + 0.4248$$

Persamaan regresi tersebut digunakan untuk menentukan nilai dan berdasarkan persamaan karakteristik SiC, yaitu:

$$\ln V = n \cdot \ln I + \ln(\gamma R)$$

Dengan membandingkan kedua persamaan tersebut, gradien garis regresi menunjukkan nilai n , sedangkan konstanta regresi menunjukkan nilai $\ln(\gamma R)$. Berdasarkan hasil regresi diperoleh nilai n sebesar **0.8814** dan:

$$\ln(\gamma R) = 0.4248$$

Nilai selanjutnya dihitung menggunakan resistansi awal SiC 1 sebesar $1,5 \, \Omega$ sebagai berikut:

$$\gamma = \frac{e^{0.4248}}{1.5}$$

$$\gamma = \mathbf{1.0195}$$

Nilai n yang berada di bawah 1 menunjukkan bahwa hubungan antara tegangan dan arus pada SiC 1 bersifat nonlinier. Lebih lanjut lagi, dari nilai n yang diketahui ini juga kita dapat mengetahui bahwa pada batang SiC ini besar listrik yang diubah menjadi panas sebesar 88.14%. Sementara itu, nilai γ yang mendekati 1 menunjukkan bahwa faktor koreksi terhadap karakteristik resistansi awal relatif kecil. Hasil pengujian batang kedua dapat dilihat pada Tabel 4.6.

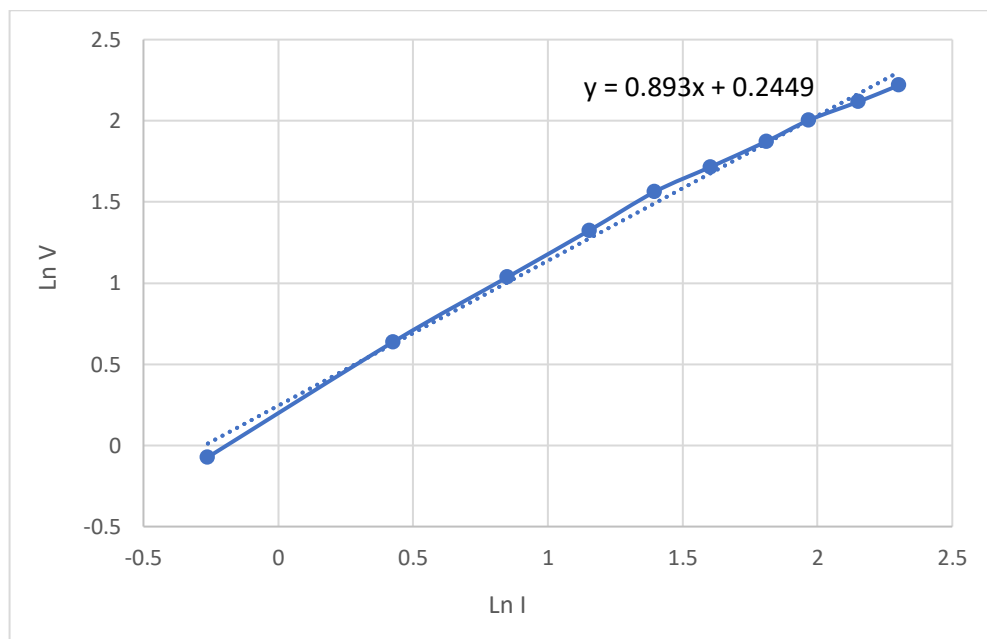
Tabel 4. 6. Hasil Pengujian Batang SiC 2 (1.3 ohm)

Vin	V multi	I Multi	Ln V	Ln I
1	0.93	0.77	-0.0725707	-0.2613648
2	1.89	1.53	0.63657683	0.42526774
3	2.82	2.34	1.03673688	0.85015093
4	3.76	3.17	1.32441896	1.15373159
5	4.77	4.04	1.5623463	1.39624469

Tabel 4.6. Lanjutan

Vin	V multi	I Multi	Ln V	Ln I
6	5.56	4.97	1.71559811	1.60341984
7	6.51	6.12	1.87333946	1.8115621
8	7.41	7.15	2.00283044	1.96711236
9	8.31	8.6	2.11745961	2.1517622
10	9.2	10	2.21920348	2.30258509

Dari data hasil pengujian tersebut didapatkan grafik yang dapat dilihat seperti pada gambar 4.6 berikut.



Gambar 4.6. Grafik Hubunga LnI dan LnV Sic 2

Berdasarkan Tabel 4.6, SiC 2 memiliki resistansi awal sebesar 1,3 Ω dan semakin menurun seiring dengan ditinggikannya tegangan masukan. Tegangan aktual yang diberikan berada pada rentang 0,93–9,20 V, sedangkan arus meningkat dari 0,77 A hingga 10 A. Pada nilai tegangan yang relatif sama, arus yang mengalir pada SiC 2 cenderung lebih besar dibandingkan SiC 1 dan SiC 3. Hal tersebut sesuai dengan karakteristik resistansi awal SiC 2 yang lebih rendah.

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.6, dapat diketahui persamaan regresi linear pada batang ini yaitu: $LnV = 0.893LnI + 0.2449$. Berdasarkan persamaan

tersebut dapat diketahui, nilai n pada SiC 2 sebesar **0,8930** dan nilai γ yang dapat dihitung sebagai berikut:

$$\gamma = \frac{e^{0.2449}}{1.3}$$

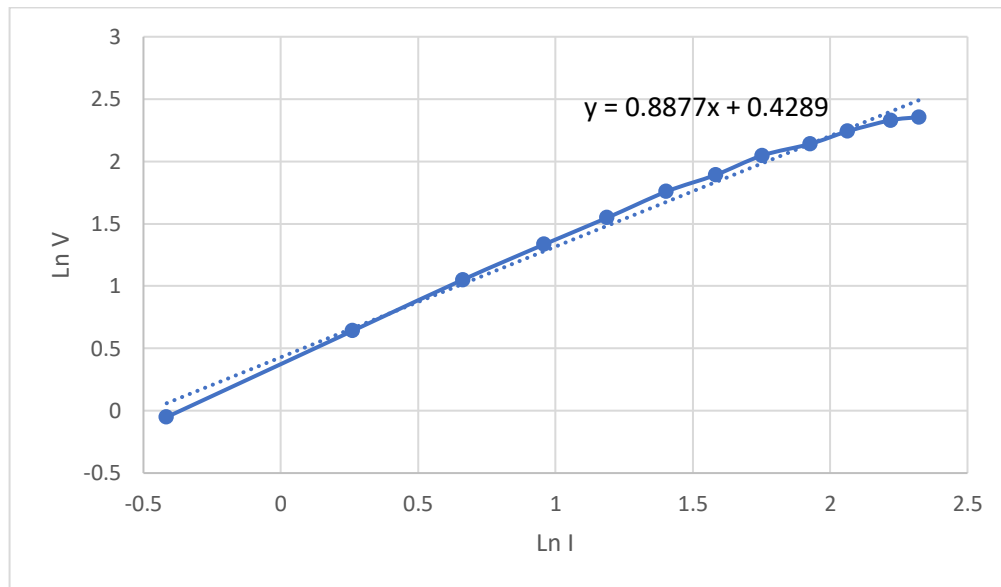
$$\gamma = \mathbf{0.9826}$$

Nilai n SiC 2 merupakan nilai tertinggi di antara keempat batang, tetapi masih berada di bawah 1. Hasil tersebut menunjukkan bahwa karakteristik tegangan dan arus SiC 2 tetap bersifat nonlinier meskipun kecenderungannya paling mendekati hubungan resistif linear dibandingkan ketiga batang lainnya. Kemudian dapat diketahui pada batang SiC 2 ini besar listrik yang diubah menjadi panas sebesar 89.30%. Nilai γ yang mendekati 1 menunjukkan bahwa karakteristik hasil pengukuran relatif sesuai dengan resistansi awal elemen. Pengujian batang ketiga dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7. Hasil Pengujian Batang SiC 3 (1.5 ohm)

Vin	V multi	I Multi	Ln V	Ln I
1	0.95	0.66	-0.051293	-0.415515
2	1.9	1.3	0.6418539	0.2623643
3	2.86	1.94	1.0508216	0.662688
4	3.8	2.61	1.3350011	0.9593502
5	4.7	3.28	1.5475625	1.1878434
6	5.8	4.07	1.7578579	1.403643
7	6.63	4.87	1.8916048	1.5830939
8	7.75	5.77	2.0476928	1.7526721
9	8.5	6.87	2.1400662	1.9271641
10	9.41	7.88	2.241773	2.0643279
11	10.28	9.21	2.3302003	2.2202899
11.7	10.54	10.21	2.3551775	2.3233676

Dari data hasil pengujian tersebut didapatkan grafik yang dapat dilihat seperti pada gambar 4.7 berikut:



Gambar 4. 7. Grafik Hubunga LnI dan LnV Sic 3

Berdasarkan Tabel 4.7, SiC 3 memiliki resistansi awal sebesar $1,5 \, \Omega$, sama dengan SiC 1. Tegangan masukan diuji dari 0.95 V hingga 10.54 V, sedangkan arus yang mengalir meningkat dari 0.66 A hingga 10.21 A. Rentang tegangan dan arus tersebut relatif mendekati hasil pengujian SiC 1, sehingga menunjukkan bahwa kedua elemen dengan resistansi awal yang sama mempunyai respons kelistrikan yang hampir serupa.

Dari Gambar 4.7 dapat dilihat grafik hubungan antara Ln I dan Ln V pada Sic 3, dapat diketahui nilai n -nya sebesar **0.8877** dan dengan perhitungan seperti sebelumnya dapat diketahui nilai γ sebesar **1,0237**. Nilai tersebut sangat dekat dengan hasil SiC 1 yang mempunyai nilai n sebesar 0,8814 dan γ sebesar 1,0195. Kedekatan nilai n dan γ menunjukkan bahwa SiC 1 dan SiC 3 mempunyai karakteristik hubungan tegangan–arus serta besar listrik yang berubah menjadi panas yang relatif seragam. Hasil pengujian pada batang ke empat dapat dilihat pada Tabel 4.8 sebagai berikut.

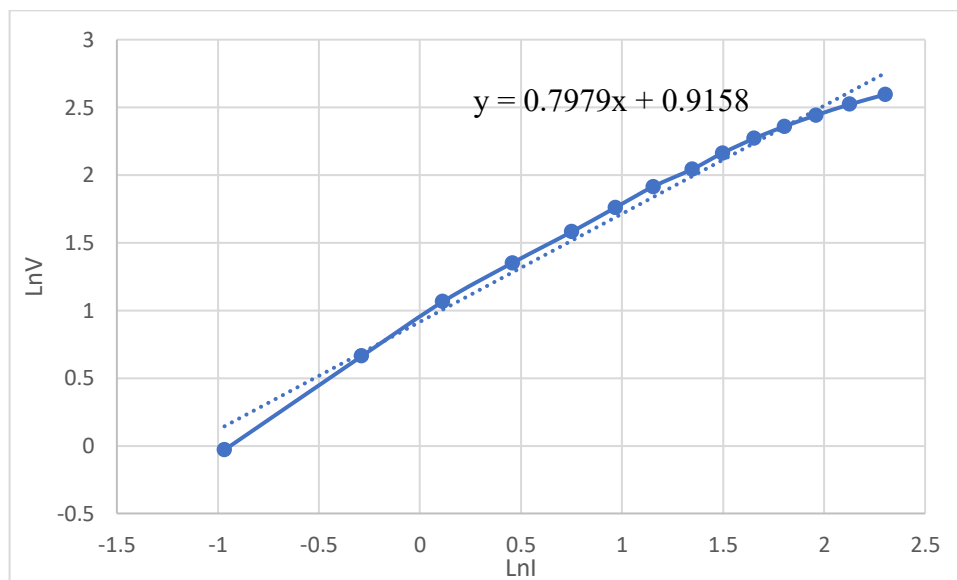
Tabel 4. 8. Hasil Pengujian Batang SiC 4 (2.7 ohm)

Vin	V multi	I Multi	Ln V	Ln I
1	0.97	0.38	-0.030459	-0.967584
2	1.94	0.75	0.662688	-0.287682
3	2.9	1.12	1.0647107	0.1133287

Tabel 4.8. Lanjutan

V _{in}	V multi	I Multi	Ln V	Ln I
4	3.86	1.58	1.3506672	0.4574248
5	4.86	2.12	1.5810384	0.7514161
6	5.81	2.63	1.7595806	0.9669838
7	6.78	3.17	1.9139771	1.1537316
8	7.72	3.85	2.0438144	1.3480731
9	8.69	4.47	2.1621729	1.4973884
10	9.68	5.23	2.2700619	1.6544113
11	10.58	6.07	2.3589654	1.8033586
12	11.49	7.1	2.4414771	1.9600948
13	12.45	8.39	2.5217206	2.1270405
14	13.39	10	2.5945082	2.3025851

Dari data hasil pengujian tersebut didapatkan grafik yang dapat dilihat seperti pada gambar berikut:



Gambar 4. 8. Grafik Hubunga LnI dan LnV Sic 4

Berdasarkan Tabel 4.8, SiC 4 mempunyai resistansi awal sebesar $2,7 \, \Omega$, yang merupakan resistansi paling tinggi di antara seluruh batang. Tegangan aktual yang diberikan meningkat dari 0,97 V hingga 13,39 V, sedangkan arus meningkat dari 0,38 A hingga 10 A. Dibandingkan dengan batang lainnya, SiC 4 membutuhkan

tegangan yang lebih tinggi untuk menghasilkan nilai arus yang sama. Kondisi tersebut berkaitan dengan nilai resistansi awal SiC 4 yang lebih besar.

Berdasarkan Gambar 4.8 dapat dilihat grafik hubungan antara $\ln I$ dan $\ln V$ pada SiC 4, dapat diketahui nilai n -nya sebesar **0,7979** dan dengan perhitungan seperti sebelumnya dapat diketahui nilai γ sebesar **0,9255**. Nilai n SiC 4 merupakan nilai paling rendah di antara keempat batang. Hal tersebut menunjukkan bahwa karakteristik hubungan tegangan dan arus pada SiC 4 mempunyai tingkat nonlinieritas yang lebih besar. Nilai γ yang lebih rendah daripada ketiga batang lainnya juga menunjukkan adanya perbedaan karakteristik terhadap nilai resistansi awal.

Berdasarkan pengujian terhadap seluruh batang SiC yang digunakan dalam sistem pemanas, seluruh batang SiC menghasilkan nilai n kurang dari 1, yaitu pada rentang 0.7979 – 0.8930. Hal tersebut menunjukkan bahwa hubungan tegangan dan arus pada seluruh elemen tidak sepenuhnya mengikuti karakteristik resistif linear. Artinya, ketika tegangan dinaikkan, arus yang mengalir pada batang SiC meningkat dengan laju yang lebih besar sehingga nilai resistansi efektifnya cenderung menurun selama elemen mengalami pemanasan. Kondisi ini menyebabkan batang SiC semakin mudah menghantarkan arus dan menghasilkan panas ketika temperatur elemen meningkat. Perbedaan nilai n pada setiap batang menunjukkan bahwa masing-masing elemen mempunyai respons kelistrikan dan kemampuan penghantaran arus yang tidak sepenuhnya sama. Perbedaan tersebut dapat dipengaruhi oleh nilai resistansi awal, kondisi material, serta perubahan temperatur selama batang dialiri arus.

4.1.5 Pengujian Rangkaian Batang Silicon Carbide

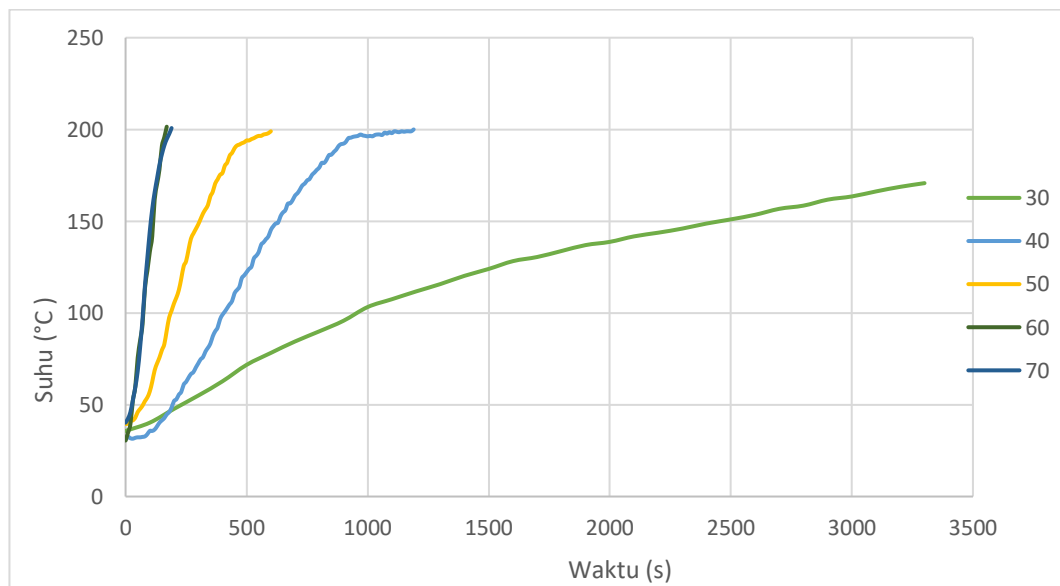
Pengujian rangkaian batang *Silicon Carbide* dilakukan untuk mengetahui kemampuan pemanasan empat batang SiC yang telah disusun menjadi satu rangkaian seri pada beberapa variasi tegangan masukan. Tegangan yang digunakan pada pengujian ini adalah 30 V, 40 V, 50 V, 60 V, dan 70 V. Temperatur awal masing-masing pengujian berada pada rentang 30–40°C, kemudian proses pemanasan diamati hingga mencapai temperatur maksimum atau temperatur target sebesar

200°C. Parameter yang diamati meliputi temperatur awal, temperatur maksimum, waktu mencapai 170°C, waktu mencapai 200°C, serta arus rata-rata selama proses pemanasan. Pada tabel selanjutnya dapat dilihat hasil pengujian dari beberapa variasi tegangan.

Tabel 4. 9. Hasil Pengujian Kemampuan Pemanasan Rangkaian SiC

Tegangan Masukan (V)	Temperatur Awal (°C)	Temperatur Maksimum (°C)	Waktu Mencapai 170°C (s)	Waktu Mencapai 200°C (s)	Arus Rata-rata (A)	Heating Rate hingga 170°C (°C/menit)
30	35	170	3300	Tidak tercapai	5,43	2,45
40	31	200	740	1190	8,64	11,27
50	37	200	370	600	9,84	21,57
60	30	200	130	170	14,59	64,62
70	40	200	130	190	13,78	60,00

Dari tabel data hasil pengujian kemampuan pemanasan rangkaian SiC didapatkan grafik yang dapat dilihat pada gambar 4.9 sebagai berikut:



Gambar 4. 9. Grafik Perbandingan Suhu Terhadap Waktu pada Variasi Tegangan Masuk

Berdasarkan Tabel 4.9 dan Gambar 4.9, peningkatan tegangan masukan secara umum memberikan pengaruh yang jelas terhadap kemampuan pemanasan rangkaian SiC. Semakin besar tegangan yang diberikan, energi listrik yang dapat

disalurkan menuju elemen pemanas semakin besar sehingga kenaikan temperatur berlangsung lebih cepat. Kondisi tersebut terlihat dari peningkatan *heating rate* yang cukup signifikan dari 30 V hingga rentang 60–70 V. Dengan demikian, tegangan masukan menjadi salah satu faktor penting yang menentukan kecepatan respons termal rangkaian SiC.

Pada tegangan 30 V, kemampuan pemanasan masih relatif rendah. Rangkaian hanya mampu mencapai temperatur maksimum sekitar 170°C dengan *heating rate* sebesar 2,45°C/menit dan tidak mampu mencapai target 200°C. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada tegangan tersebut energi yang diberikan kepada elemen belum mencukupi untuk menghasilkan kenaikan temperatur lebih lanjut ketika rugi-rugi panas menuju lingkungan semakin besar. Dengan kata lain, pada temperatur tertentu panas yang dihasilkan elemen mulai mendekati panas yang dilepaskan oleh sistem sehingga peningkatan temperatur menjadi semakin kecil.

Peningkatan tegangan menjadi 40 V dan 50 V memberikan respons pemanasan yang lebih baik. Hal tersebut ditunjukkan oleh peningkatan *heating rate* menjadi 11,27°C/menit dan 21,57°C/menit. Grafik juga menunjukkan bahwa kemiringan kurva temperatur menjadi semakin besar dibandingkan pada 30 V. Akan tetapi, ketika temperatur semakin mendekati 200°C, kenaikan temperatur cenderung melambat. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur ruang bakar, rugi-rugi panas menuju lingkungan juga semakin besar sehingga sebagian energi yang diberikan tidak lagi seluruhnya digunakan untuk meningkatkan temperatur.

Respons pemanasan tercepat pada pengujian diperoleh pada rentang tegangan 60–70 V. *Heating rate* sampai 170°C mencapai 64,62°C/menit pada 60 V dan 60,00°C/menit pada 70 V. Kedua kurva memiliki kenaikan temperatur yang jauh lebih curam dibandingkan variasi tegangan yang lebih rendah. Meskipun tegangan 70 V lebih tinggi, hasil pengujian menunjukkan bahwa 60 V sedikit lebih cepat dalam mencapai temperatur 170°C maupun 200°C. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa hubungan antara besar tegangan masukan dan kenaikan temperatur aktual tidak selalu bersifat linier karena respons pemanasan juga

dipengaruhi oleh respon PID, karakteristik resistansi SiC, kondisi temperatur awal, serta rugi-rugi panas selama proses berlangsung. Oleh karena itu, hasil pada 60 V dan 70 V lebih tepat dipandang memiliki kemampuan pemanasan yang relatif berdekatan, dengan 60 V memberikan respons tercepat pada kondisi pengujian ini.

Berdasarkan pengujian terhadap rangkaian batang pemanas, hasil menunjukkan bahwa peningkatan tegangan masukan dari 30 V sampai 60 V menghasilkan peningkatan kemampuan pemanasan yang cukup besar, sedangkan perubahan dari 60 V menjadi 70 V tidak lagi memberikan peningkatan *heating rate*. Hal tersebut memperlihatkan bahwa penambahan tegangan tidak selalu menghasilkan peningkatan kecepatan pemanasan secara proporsional. Pengujian ini juga menunjukkan bahwa rangkaian SiC membutuhkan tegangan yang memadai agar mampu mencapai *setpoint* 200°C, sedangkan *heating rate* dapat digunakan sebagai parameter tambahan untuk menggambarkan kemampuan respons pemanasan pada masing-masing kondisi tegangan masukan.

4.1.6 Pengujian Karakteristik Rangkaian SiC pada Temperatur Tetap

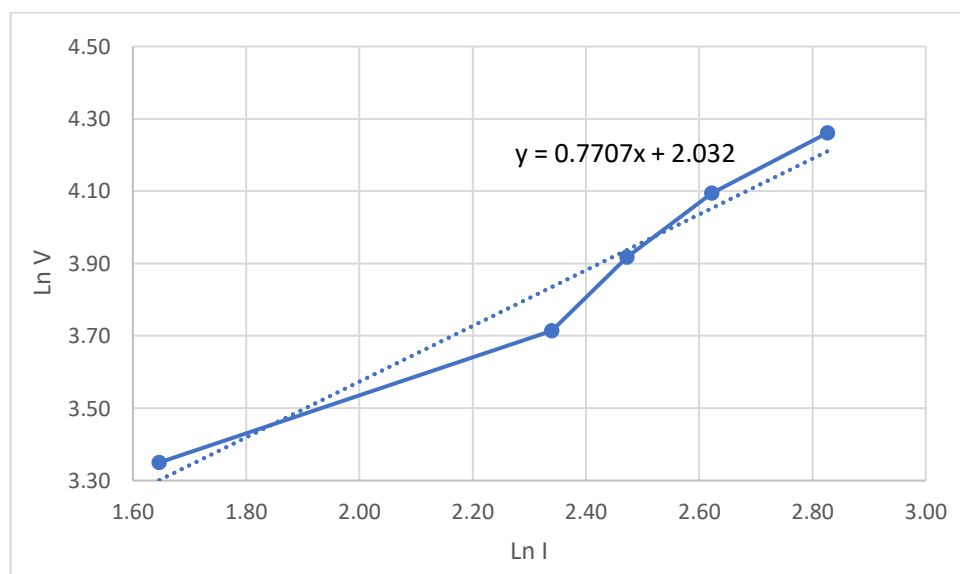
Pengujian karakteristik rangkaian dilakukan pada temperatur yang sama, yaitu 100°C. Pemilihan temperatur tersebut dilakukan agar seluruh variasi tegangan, termasuk 30 VAC, dapat diuji dalam kondisi temperatur yang seragam. Penggunaan temperatur tetap diperlukan karena perubahan temperatur dapat memengaruhi resistansi elemen SiC. Apabila data tegangan dan arus diambil pada temperatur yang berbeda-beda, nilai n yang diperoleh dapat dipengaruhi oleh perubahan resistansi yang disebabkan oleh perbedaan temperatur. Hasil pengujian karakteristik Rangkaian pada temperatur tetap dapat dilihat Tabel 4.10 sebagai berikut.

Tabel 4. 10. Hasil Pengujian Karakteristik Rangkaian SiC pada Temperatur 100°C

Temperatur Pengujian	Tegangan setting	tegangan aktual	arus aktual	Ln V aktual	Ln I Aktual
100	30	28.5	5.19	3.35	1.65
100	40	41	10.38	3.71	2.34
100	50	50.3	11.85	3.92	2.47
100	60	60	13.77	4.09	2.62
100	70	70.9	16.89	4.26	2.83

Pada setiap kondisi pengujian, tegangan sumber diatur pada nilai nominal 30, 40, 50, 60, dan 70 VAC. Nilai tegangan dan arus aktual kemudian diukur ketika temperatur *furnace* berada di sekitar 100°C. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa tegangan aktual berada pada rentang 28,5–70.9 V, sedangkan arus aktual berada pada rentang 5,19–16,89 A. Secara umum, peningkatan tegangan aktual diikuti oleh peningkatan arus yang mengalir pada rangkaian SiC.

Berdasarkan Tabel 4.10, peningkatan tegangan pada rangkaian diikuti oleh peningkatan arus yang mengalir. Hal tersebut menunjukkan bahwa rangkaian SiC memberikan respons kelistrikan yang konsisten terhadap perubahan tegangan pada temperatur 100°C. Namun, perubahan arus tidak meningkat secara proporsional terhadap perubahan tegangan, sehingga karakteristik rangkaian tidak sepenuhnya bersifat resistif linier. Hasil tersebut menunjukkan bahwa rangkaian SiC mampu menghantarkan arus yang semakin besar ketika tegangan dinaikkan. Namun, hubungan tegangan dan arus tidak sepenuhnya proporsional, sehingga karakteristik rangkaian perlu dianalisis melalui grafik $\ln V$ terhadap $\ln I$. Berdasarkan data hasil tersebut didapatkan grafik perbandingan antara $\ln V$ dan $\ln I$ yang dapat dilihat pada Gambar 4.10 sebagai berikut.



Gambar 4. 10. Grafik Hubungan $\ln I$ dan $\ln V$ Rangkaian SiC pada Temperatur 100°C

Berdasarkan Gambar 4.10, dapat dilihat grafik yang menunjukkan hubungan antara $\ln I$ dan $\ln V$ pada pengujian rangkaian pemanas ini. Hubungan ini menghasilkan persamaan regresi linear, berdasarkan persamaan tersebut dapat diketahui nilai n sebesar **0,7707** serta nilai γ yang dapat dihitung sebagai berikut:

$$\ln \gamma R = 2.032$$

$$\gamma = \frac{e^{2.032}}{7}$$

$$\gamma = \mathbf{1.089}$$

Nilai n yang lebih kecil dari 1 menunjukkan bahwa rangkaian batang SiC memiliki karakteristik hubungan tegangan–arus yang bersifat nonlinier, sehingga kenaikan arus tidak berlangsung sebanding dengan kenaikan tegangan dan resistansi efektif rangkaian dapat berubah selama elemen dialiri arus. Selain itu, dari nilai n ini dapat diketahui, pada rangkaian seri yang diuji pada suhu 100 derajat, listrik yang diubah menjadi panas hanya 77,07 %.

Nilai n rangkaian yang lebih rendah dibandingkan nilai masing-masing batang pada pengujian individual juga menunjukkan bahwa karakteristik rangkaian tidak hanya dipengaruhi oleh satu elemen, melainkan merupakan hasil interaksi dari seluruh batang SiC yang memiliki resistansi dan respons kelistrikan berbeda. Sementara itu, dengan resistansi awal total rangkaian sebesar 7 Ω , diperoleh nilai γ yang relatif mendekati 1. Hal tersebut menunjukkan bahwa faktor koreksi karakteristik rangkaian masih cukup dekat dengan nilai resistansi referensi. Namun, nilai γ tidak digunakan sebagai persentase efisiensi, melainkan sebagai parameter untuk menunjukkan tingkat perbedaan antara karakteristik aktual rangkaian dan karakteristik yang diperkirakan berdasarkan resistansi awal.

4.2 Pembentukan Baseline

Pembentukan *baseline* dilakukan untuk memperoleh nilai referensi penggunaan energi *furnace* pada setiap *setpoint*. Baseline tersebut menjadi pembanding antara kondisi operasi aktual dan kondisi operasi normal yang diperoleh melalui pengujian. Nilai *baseline* tidak dimaksudkan sebagai nilai efisiensi termal absolut, melainkan sebagai acuan efisiensi operasional berdasarkan

karakteristik energi *furnace* yang dirancang. Dalam penelitian ini, parameter yang digunakan sebagai *baseline* terdiri atas *Heating Energy Index (HEI)* dan *Holding Energy Rate (HER)*.

HEI menunjukkan kebutuhan energi listrik selama *furnace* melakukan pemanasan dari temperatur awal menuju *setpoint*. Nilai *HEI* yang lebih rendah menunjukkan bahwa *furnace* membutuhkan energi yang lebih sedikit untuk menghasilkan kenaikan temperatur. Sementara itu, *HER* menunjukkan laju penggunaan energi selama *furnace* mempertahankan temperatur pada fase *holding*. Nilai *HER* yang semakin tinggi menunjukkan bahwa *furnace* membutuhkan energi yang lebih besar untuk mempertahankan temperatur akibat kebutuhan pemanasan maupun rugi-rugi panas yang terjadi.

4.2.1 Pengambilan Data Baseline *HEI* dan *HER*

Data *baseline* diperoleh melalui pengujian *furnace* pada *setpoint* 100°C sampai 800°C dengan interval 100°C. Pada *setpoint* utama 200°C, 400°C, 600°C, dan 800°C, pengujian dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan. Sementara itu, *setpoint* 100°C, 300°C, 500°C, dan 700°C diuji sebanyak satu kali pengulangan. Pada set point utama pengujian dilakukan hingga tiga kali untuk memastikan bahwa nilai *HEI* dan *HER* yang didapat tidak jauh dari pengujian sebelumnya.

Setiap pengujian dimulai ketika pengguna menekan tombol *START*. Pada saat tersebut, sistem mencatat temperatur awal, waktu awal, dan energi awal. Ketika temperatur telah mencapai batas *setpoint*, sistem mencatat kondisi *REACH* yang meliputi temperatur, waktu, dan energi. Selanjutnya, *furnace* memasuki fase *holding* dan dioperasikan selama durasi yang telah ditentukan. Ketika tombol *STOP* ditekan, sistem mencatat data akhir pengujian. Data *START*, *REACH*, dan *STOP* kemudian digunakan untuk menghitung *HEI* dan *HER* pada setiap siklus.

Data pengujian hanya digunakan dalam pembentukan *baseline* apabila memenuhi kriteria siklus yang valid. Kriteria tersebut meliputi kelengkapan data *START–REACH–STOP*, urutan waktu dan energi yang benar, *setpoint* lebih tinggi daripada temperatur awal, serta fase *holding* berlangsung sekurang-kurangnya dua menit. Pengujian yang mengalami gangguan, terputus, atau tidak mencapai *setpoint*

tidak digunakan sebagai nilai *baseline* utama. Hasil perhitungan *HEI* dan *HER* pada *setpoint* dengan pengujian yang dilakukan sebanyak tiga kali ditunjukkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4. 11. Hasil Perhitungan *HEI* dan *HER* pada Pengujian yang dilakukan sebanyak 3 kali

<i>Setpoint</i>	Pengujian	<i>HEI</i> (Wh/°C)	<i>HER</i> (Wh/menit)	<i>Heating Rate</i> (°C/menit)
200	1	0,4101	4	36.34
200	2	0,3420	1	44.41
200	3	0,3145	1.88	39.37
400	1	0,4371	12	36.87
400	2	0,3428	7.85	48.07
400	3	0,3760	7.33	38.77
600	1	0,5628	14.03	33
600	2	0,5228	13.59	32.96
600	3	0,5509	12.94	32.43
800	1	0,8619	16.23	20.86
800	2	0,7752	14.88	23.54
800	3	1,1769	15	13.48

Berdasarkan Tabel 4.11, nilai *Heating Energy Index* (*HEI*) dan *Holding Energy Rate* (*HER*) secara umum menunjukkan kecenderungan meningkat seiring dengan bertambahnya *setpoint*. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kebutuhan energi *furnace* untuk mencapai dan mempertahankan temperatur semakin besar pada temperatur operasi yang lebih tinggi. Peningkatan *HEI* menunjukkan bahwa energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan setiap kenaikan temperatur menjadi lebih besar, sedangkan peningkatan *HER* menunjukkan bahwa energi yang diperlukan selama fase *holding* juga meningkat karena rugi-rugi panas menuju lingkungan menjadi semakin besar pada temperatur yang lebih tinggi.

Selain *HEI* dan *HER*, kemampuan pemanasan *furnace* juga dianalisis menggunakan *heating rate* yang dihitung berdasarkan kenaikan temperatur dari kondisi *START* hingga mencapai kondisi *REACH* pada masing-masing *setpoint*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa *heating rate* cenderung lebih tinggi pada *setpoint* 200°C dan 400°C, dengan rata-rata masing-masing sekitar 40,04°C/menit dan 41,24°C/menit. Pada *setpoint* 600°C dan 800°C, rata-rata *heating rate* menurun

menjadi sekitar $24,31^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ dan $19,29^{\circ}\text{C}/\text{menit}$. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur yang harus dicapai, laju kenaikan temperatur cenderung semakin rendah. Hal ini dapat terjadi karena pada temperatur yang lebih tinggi, sebagian energi yang diberikan semakin banyak digunakan untuk menggantikan panas yang hilang melalui dinding ruang bakar, pintu, celah, dan perpindahan panas menuju lingkungan, sehingga kenaikan temperatur tidak berlangsung secepat pada temperatur yang lebih rendah.

Heating rate yang berbeda antar percobaan pada *setpoint* yang sama juga menunjukkan bahwa kecepatan pemanasan tidak hanya dipengaruhi oleh nilai *setpoint*, tetapi dapat dipengaruhi oleh kondisi awal *furnace*, temperatur awal, karakteristik elemen pemanas, serta kondisi operasi selama pengujian. Akan tetapi, pada sistem monitoring efisiensi operasional ini, *heating rate* tidak digunakan sebagai parameter dalam menentukan tingkat efisiensi. *Heating rate* disini hanya digunakan sebagai parameter tambahan untuk menggambarkan respon pemanas *furnace*.

Berdasarkan hasil pengujian terhadap pembentukan *baseline* HEI dan HER, dapat diketahui bahwa peningkatan *setpoint* secara umum diikuti oleh peningkatan kebutuhan energi pada fase pemanasan dan fase *holding*, sedangkan *heating rate* cenderung menurun pada temperatur operasi yang lebih tinggi. Hasil pengujian tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam menentukan *baseline* HEI dan HER pada masing-masing *setpoint* untuk proses normalisasi dan analisis efisiensi operasional *furnace*.

4.2.2 Penentuan Nilai *Baseline* HEI dan HER

Nilai *baseline* pada *setpoint* yang memiliki tiga kali pengujian ditentukan menggunakan nilai median. Median dipilih karena lebih tahan terhadap nilai yang terlalu tinggi atau terlalu rendah dibandingkan rata-rata. Pemilihan tersebut diperlukan karena pada proses pengujian *furnace* dapat terjadi variasi akibat perbedaan temperatur awal, kondisi termal ruang pemanas, durasi aktif pemanas, serta ketelitian pencatatan energi pada fase *holding*.

Sebagai contoh, nilai *HEI* pada *setpoint* 800°C terdiri atas 0,7752 Wh/°C, 0,8619 Wh/°C, dan 1,1769 Wh/°C. Nilai 1,1769 Wh/°C lebih tinggi dibandingkan dua hasil lainnya. Apabila rata-rata digunakan, nilai tersebut akan meningkatkan *baseline* secara cukup besar. Oleh karena itu, nilai tengah sebesar 0,8619 Wh/°C dipilih sebagai *baseline* yang lebih representatif terhadap kondisi operasi normal. Nilai *baseline* yang diperoleh ditunjukkan pada Tabel 4.12.

Tabel 4. 12. Nilai *Baseline* *HEI* dan *HER*

Setpoint	Baseline <i>HEI</i> (Wh/°C)	Baseline <i>HER</i> (Wh/menit)
100	0,5034	0,66
200	0,3420	1,88
300	0,3963	6,47
400	0,3760	7,853
500	0,4106	13,00
600	0,5509	13,59
700	0,5102	15,78
800	0,8619	15,00

Berdasarkan Tabel 4.12, *baseline HEI* dan *HER* memiliki nilai yang berbeda pada setiap *setpoint*. Oleh karena itu, satu nilai *baseline* tidak dapat digunakan untuk seluruh rentang temperatur. Penggunaan *baseline* khusus pada setiap *setpoint* diperlukan agar pengujian pada temperatur tinggi tidak langsung dikategorikan boros hanya karena kebutuhan energinya secara alami lebih besar dibandingkan temperatur rendah.

4.3 Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan untuk mengetahui apakah seluruh fungsi monitoring efisiensi dan alarm dapat bekerja secara terintegrasi. Pengujian mencakup pembacaan temperatur dan parameter kelistrikan, pencatatan tahapan siklus *START*, *REACH*, *HOLDING*, dan *STOP*, pengiriman data menuju Node-RED, perhitungan *HEI* dan *HER*, normalisasi terhadap *baseline*, proses klasifikasi menggunakan *Fuzzy Sugeno*, pengiriman hasil klasifikasi menuju ESP32, serta pengaktifan lampu indikator dan alarm.

Pengujian dimulai dengan menentukan *setpoint* pada sistem *furnace*, kemudian proses pemanasan dijalankan. Ketika tombol *START* ditekan, ESP32 mencatat

temperatur awal, energi awal, dan waktu awal sebagai titik *START*. Selama proses berlangsung, sistem memantau perubahan temperatur dan parameter kelistrikan tanpa memengaruhi kerja sistem kendali pemanas. Ketika temperatur mencapai batas *setpoint*, sistem mencatat titik *REACH* dan mengubah status pencatatan menjadi fase *HOLDING*. Pada titik *REACH* ini juga ESP32 mencatat temperatur, energi, dan waktu disaat itu.

Setelah fase *HOLDING* berlangsung minimal dua menit, pengujian dihentikan dengan menekan tombol *STOP*. Sistem kemudian mencatat temperatur, energi, dan waktu akhir sebagai titik *STOP*. Data *START*, *REACH*, dan *STOP* selanjutnya dikirim menuju Node-RED melalui komunikasi MQTT untuk divalidasi dan diolah menjadi nilai *HEI* dan *HER*.

Nilai *HEI* dan *HER* dibandingkan dengan *baseline* sesuai *setpoint*, kemudian dinormalisasi menjadi indeks I_{HEI} dan I_{HER} . Kedua indeks tersebut digunakan sebagai *input Fuzzy Sugeno* untuk menghasilkan klasifikasi efisien atau tidak efisien. Hasil klasifikasi disimpan dalam file *CSV* dan dikirim kembali menuju ESP32 untuk ditampilkan melalui lampu indikator.

4.3.1 Pengujian Komunikasi MQTT dan Node-RED

Pengujian komunikasi MQTT dan Node-RED dilakukan untuk memastikan proses pertukaran data antara ESP32 dan Node-RED dapat berjalan sesuai dengan rancangan sistem. Komunikasi MQTT pada penelitian ini digunakan untuk mengirimkan ringkasan satu siklus pengoperasian *furnace* dari ESP32 menuju Node-RED serta mengirimkan kembali hasil analisis efisiensi dari Node-RED menuju ESP32. Komunikasi tersebut tidak digunakan untuk mengendalikan proses pemanasan *furnace*.

Pengujian dilakukan dengan menjalankan *furnace* hingga membentuk tahapan *START*, *REACH*, *HOLDING*, dan *STOP*. Setelah siklus dihentikan, ESP32 menyusun data ringkasan siklus dalam format JSON dan mengirimkannya melalui *broker* MQTT menuju Node-RED. Data yang diterima diamati menggunakan node *debug* untuk memeriksa kelengkapan parameter, kesesuaian identitas perangkat,

urutan waktu, urutan energi, serta status validasi siklus. Debug Node untuk penerimaan ringkasan satu siklus dari ESP32 dapat dilihat pada Gambar 4.11.



```

23/07/2026, 14:25:28 node: RAW cycle summary dari ESP32
furnace/cycle/summary : msg.payload : Object
▼ object
  type: "cycle_summary"
  device_id: "furnace01"
  cycle_id: "FURNACE-A994-55434"
  setpoint_c: 800
  valid: true
  stop_reason: "USER_STOP"
  validation_reason: "VALID"
  ▼ start: object
    time_ms: 55435
    temp_c: 264
    energy_kwh: 4.766
  ▼ reach: object
    time_ms: 1538242
    temp_c: 792.25
    energy_kwh: 5.223
  ▼ stop: object
    time_ms: 1890710
    temp_c: 759.5
    energy_kwh: 5.309
  
```

Gambar 4. 11. Tampilan Node-RED pada Penerimaan *Raw Cycle Summary* dari ESP32

Berdasarkan Gambar 4.11, Node-RED berhasil menerima data ringkasan siklus yang dikirimkan oleh ESP32. Data yang diterima memuat identitas perangkat, identitas siklus, *setpoint*, status validasi, alasan penghentian, serta data *START*, *REACH*, dan *STOP*. Munculnya data tersebut pada hasil *debug* node *raw cycle summary* menunjukkan bahwa proses pengiriman dari ESP32, penerusan melalui broker MQTT, dan penerimaan oleh Node-RED telah berjalan dengan baik.

Pada data *raw cycle summary*, parameter waktu disimpan dalam satuan *millisecond (ms)* yang diperoleh dari fungsi penghitung waktu internal ESP32 (*millis*). Penggunaan satuan *millisecond* bertujuan untuk memperoleh pencatatan waktu yang lebih presisi terhadap setiap tahapan siklus *furnace*, yaitu *START*, *REACH*, dan *STOP*. Nilai tersebut tidak menunjukkan waktu kalender atau waktu sebenarnya (*real-time clock*), melainkan waktu relatif yang dihitung sejak ESP32 mulai beroperasi. Oleh karena itu, nilai waktu dalam satuan *millisecond* digunakan

sebagai acuan untuk menghitung durasi pemanasan (*heating time*) dan durasi penahanan temperatur (*holding time*) secara akurat. Gambar 4.12 memperlihatkan *pilot lamp* hijau yang menyala karena hasil perhitungan efisiensi menyatakan efisien.



Gambar 4. 12. Pilot Lamp Hijau Menyala sebagai Indikator Hasil Efisien

Pada Gambar 4.12 terlihat pilot lamp hijau menyala ketika ESP32 menerima hasil klasifikasi efisien dari Node-RED. Aktifnya *pilot lamp* hijau membuktikan bahwa komunikasi dari Node-RED menuju ESP32 juga dapat berlangsung sesuai dengan status hasil yang dikirimkan. Pada gambar 4.13 dapat dilihat contoh jika hasil efisiensi yang dikirim menyatakan tidak efisien, yaitu *pilot lamp* merah menyala.



Gambar 4. 13. Jika Pilot Lamp Merah Menyala sebagai Indikator Hasil Tidak Efisien

Pada Gambar 4.13 terlihat *pilot lamp* merah menyala setelah ESP32 menerima hasil klasifikasi tidak efisien dari Node-RED. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pesan hasil telah berhasil dikirim oleh Node-RED melalui broker MQTT, diterima oleh ESP32, kemudian diterjemahkan menjadi perintah untuk mengaktifkan pilot lamp merah.

Dengan demikian, pengujian tidak hanya dilakukan dengan mengamati pesan pada node *debug*, tetapi juga melalui respons perangkat keras. Node *debug* digunakan untuk membuktikan penerimaan data pada Node-RED, sedangkan *pilot lamp* merah dan hijau digunakan untuk membuktikan bahwa ESP32 dapat menerima kembali hasil pengolahan dari Node-RED.

Berdasarkan Gambar 4.11 hingga 4.13 dapat diketahui bahwa komunikasi MQTT antara ESP32 dan Node-RED berhasil dilakukan dalam dua arah. Pada komunikasi pertama, ringkasan siklus yang dikirimkan ESP32 berhasil diterima dan ditampilkan pada node *debug* Node-RED. Hal tersebut menunjukkan bahwa ESP32 dapat melakukan publikasi data melalui broker MQTT dan Node-RED dapat menerima data pada topik yang sesuai.

Pada komunikasi sebaliknya, hasil klasifikasi yang dikirim oleh Node-RED berhasil diterima oleh ESP32. Keberhasilan tersebut ditunjukkan oleh aktifnya pilot lamp merah untuk status tidak efisien dan pilot lamp hijau untuk status efisien. Perbedaan respons pilot lamp menunjukkan bahwa ESP32 tidak hanya menerima pesan, tetapi juga mampu membaca isi status dan menjalankan logika indikator sesuai data yang diterima.

Berdasarkan hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa komunikasi MQTT antara ESP32 dan Node-RED telah berjalan sesuai rancangan. Data ringkasan siklus dapat dikirim dari ESP32 menuju Node-RED, sedangkan hasil klasifikasi dapat dikirim kembali dari Node-RED menuju ESP32. Keberhasilan komunikasi dua arah tersebut mendukung fungsi sistem monitoring dan penyampaian informasi efisiensi operasional *furnace*.

4.3.2 Pengujian Sistem Alarm

Pengujian sistem alarm dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mendeteksi temperatur berlebih dan memberikan respons sesuai dengan batas alarm yang telah ditetapkan. Sistem alarm bekerja secara lokal pada ESP32 dengan membandingkan temperatur aktual terhadap *setpoint*. Oleh karena itu, fungsi alarm tetap dapat berjalan tanpa bergantung pada komunikasi MQTT maupun Node-RED.

Pada sistem yang dirancang terdapat tiga kondisi alarm. Kondisi pertama adalah *warning*, yaitu ketika temperatur aktual melebihi *setpoint* lebih dari 50°C, tetapi belum melebihi batas 100°C. Kondisi kedua adalah *trip*, yaitu ketika temperatur aktual melebihi *setpoint* lebih dari 100°C. Kondisi ketiga yaitu *low temperature alarm*, yaitu ketika suhu menurun lebih dari 6% ketika sudah mencapai *setpoint*.

Pemeriksaan kondisi *trip* harus memiliki prioritas lebih tinggi daripada *warning*. Hal tersebut karena temperatur yang telah melebihi *setpoint* lebih dari 100°C juga secara matematis telah melewati batas 50°C. Dengan prioritas tersebut, sistem akan langsung memberikan respons *trip* ketika batas kedua terlampaui. Sementara itu, *low temperature alarm* berada pada batas bawah yang akan aktif ketika suhu menurun ketika sudah mencapai *setpoint*.

Pengujian dilakukan pada tiga kondisi, yaitu temperatur aktual melebihi *setpoint* lebih dari 50°C dan temperatur aktual melebihi *setpoint* lebih dari 100°C, dan temperature aktual menurun lebih dari 6% setelah mencapai *setpoint*. Respons sistem diamati melalui pesan pada HMI, status sistem, buzzer, dan kondisi keluaran pemanas. Tabel 4.13 memperlihatkan hasil pengujian dari sistem alarm pada sistem ini.

Tabel 4. 13. Hasil Pengujian Sistem Alarm

No.	Setpoint	Temperatur aktual	Selisih temperatur	Kondisi alarm	Respons sistem	Hasil
1	119°C	182,8°C	63,8°C	<i>Warning</i>	HMI menampilkan pesan <i>warning</i> dan buzzer aktif	Sesuai

Tabel 4. 13. Lanjutan

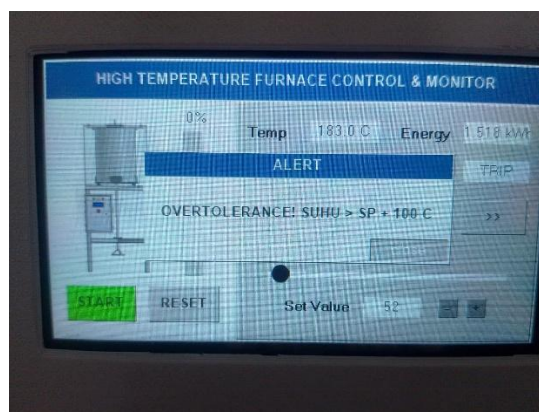
No.	Setpoint	Temperatur aktual	Selisih temperatur	Kondisi alarm	Respons sistem	Hasil
2	52°C	183,0°C	131,0°C	<i>Trip</i>	HMI menampilkan pesan <i>trip</i> , buzzer aktif, dan proses dihentikan	Sesuai
3	200	187, setelah <i>setpoint</i>	-13°C	Low Temperature Alarm	HMI menampilkan pesan <i>warning</i> dan buzzer aktif	sesuai

Berdasarkan Tabel 4.13, sistem alarm menunjukkan respons yang sesuai pada kedua kondisi pengujian. Pada *setpoint* 119°C dengan temperatur aktual 182,8°C, selisih temperatur sebesar 63,8°C menyebabkan sistem mengaktifkan kondisi *warning*, menampilkan pesan peringatan pada HMI, serta mengaktifkan buzzer tanpa menghentikan operasi *furnace*. Selanjutnya, pada *setpoint* 52°C dengan temperatur aktual 183°C, selisih temperatur sebesar 131°C menyebabkan sistem mengaktifkan kondisi *trip*, menampilkan pesan *overtolerance*, mengaktifkan buzzer, dan menghentikan keluaran pemanas. Terakhir, pada saat suhu telah mencapai *setpoint* 200°C lalu turun hingga suhu terbaca mencapai 187°C, dengan penurunan 13°C, menyebabkan sistem mengaktifkan kondisi *low alarm temperature*, mengaktifkan buzzer dan menampilkan pesan peringatan pada *HMI Nextion* tanpa menghentikan proses pemanasan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi penyimpangan temperatur baik pada sisi bawah maupun sisi atas dari kondisi operasi yang ditentukan. Pada Gambar 4.14 dapat dilihat tampilan HMI Nextion jika terjadi kondisi *warning*.



Gambar 4. 14. Tampilan HMI pada Kondisi Warning

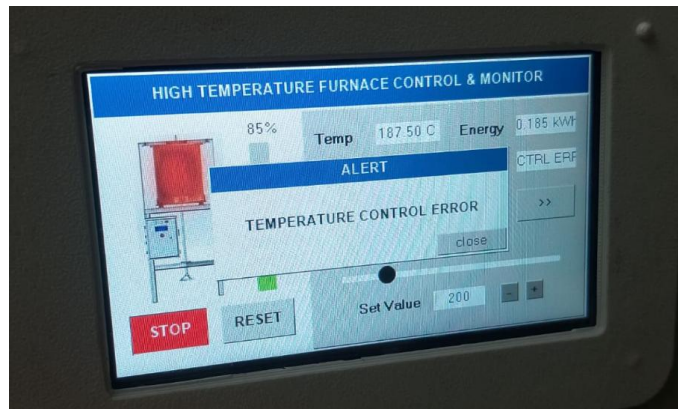
Berdasarkan Gambar 4.14, HMI menampilkan pesan “**WARNING! FURNACE OVERHEAT**” dan status sistem berubah menjadi *WARNING*. Pada kondisi tersebut, *buzzer* diaktifkan untuk memberikan peringatan kepada pengguna. Tombol *STOP* masih tersedia karena kondisi *warning* tidak secara otomatis menghentikan proses pengoperasian *furnace*. Pengguna masih dapat menghentikan proses secara manual apabila kondisi temperatur dianggap tidak aman. Gambar 4.15 menampilkan bagaimana HMI menampilkan pesan saat kondisi *TRIP*.



Gambar 4. 15 Tampilan HMI pada Kondisi Trip

Berdasarkan Gambar 4.15, HMI menampilkan pesan “**OVERTOLERANCE! SUHU > SP + 100 C**” dan status sistem berubah menjadi *TRIP*. Pada kondisi tersebut, *buzzer* diaktifkan dan keluaran pemanas dihentikan untuk mencegah peningkatan temperatur lebih lanjut. Setelah kondisi *trip* terjadi, sistem berada dalam keadaan terkunci sehingga proses tidak dapat langsung dijalankan kembali.

Pengguna harus menekan tombol RESET terlebih dahulu untuk menghapus status *trip* dan mengembalikan sistem ke kondisi siap digunakan. Mekanisme tersebut digunakan untuk memastikan bahwa sistem tidak kembali beroperasi tanpa tindakan pemeriksaan dari pengguna. Gambar 4.16 menampilkan bagaimana HMI menampilkan pesan saat kondisi *low temperature alarm*.



Gambar 4.16. Tampilan HMI pada Kondisi Low Alarm Warning

Berdasarkan Gambar 4.16, HMI menampilkan pesan **“TEMPERATURE CONTROL ERROR”** ketika temperatur aktual turun melewati batas 6% di bawah *setpoint* setelah *setpoint* tercapai. Pada kondisi tersebut, *buzzer* diaktifkan sebagai peringatan kepada pengguna bahwa temperatur mengalami penurunan diluar batas toleransi. Berbeda dengan kondisi *trip*, *low temperature alarm* tidak menonaktifkan keluaran pemanas karena fungsi utamanya adalah memberikan peringatan terhadap penurunan temperatur ketika proses masih berlangsung.

Berdasarkan hasil pengujian terhadap sistem alarm, dapat diketahui bahwa ESP32-S3 mampu membedakan tiga kondisi penyimpangan temperatur sesuai dengan batas yang telah ditetapkan. *Low temperature alarm* memberikan peringatan ketika temperatur turun lebih dari 6% di bawah *setpoint* setelah *setpoint* tercapai, *warning* memberikan peringatan ketika temperatur melebihi *setpoint* lebih dari 50°C, sedangkan *trip* memberikan proteksi dengan menghentikan keluaran pemanas ketika temperatur melebihi *setpoint* lebih dari 100°C. Seluruh kondisi alarm diproses secara lokal oleh ESP32-S3 sehingga fungsi peringatan dan proteksi tetap dapat berjalan tanpa bergantung pada Node-RED maupun komunikasi MQTT.

4.3.3 Pengujian Perhitungan *HEI* dan *HER*

Pengujian perhitungan *Heating Energy Index (HEI)* dan *Holding Energy Rate (HER)* dilakukan untuk memastikan bahwa Node-RED mampu mengolah data *START*, *REACH*, dan *STOP* menjadi parameter penggunaan energi secara benar. Nilai *HEI* digunakan untuk menunjukkan energi listrik yang dibutuhkan pada fase pemanasan untuk setiap kenaikan temperatur sebesar 1°C, sedangkan nilai *HER* menunjukkan penggunaan energi rata-rata per menit selama fase *holding*.

Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan manual terhadap hasil perhitungan yang dihasilkan oleh Node-RED. Data yang digunakan harus berasal dari identitas siklus yang sama agar data *START*, *REACH*, *STOP*, *HEI*, dan *HER* dapat ditelusuri sebagai satu rangkaian pengujian. Pada pengujian ini digunakan data ringkasan siklus dengan identitas FURNACE-A994-55434 dan *setpoint* sebesar 800°C. Tabel selanjutnya akan berisikan data dari siklus yang diterima Node-RED sesuai dengan Gambar 4.11 pada subab 4.3.1.

Tabel 4. 14. Data Ringkasan Siklus Berdasarkan Gambar 4.11

Parameter	<i>START</i>	<i>REACH</i>	<i>STOP</i>
Waktu (ms)	55.435	1.538.242	1.890.710
Temperatur (°C)	264,00	792,25	759,50
Energi (kWh)	4,766	5,223	5,309

Berdasarkan Tabel 4.15 dapat kita lihat data mentah yang diterima Node-RED seperti waktu, suhu, dan energi dalam satu siklus pemanasan, dari data mentah ini Node-RED selanjutnya menghitung *HEI* dan *HER* sesuai *input* yang dibutuhkan *fuzzy*. Untuk menghitung *HEI* dibutuhkan $E_{heating}$, *Set Point*, serta suhu saat *START*.

$E_{heating}$ merupakan energi yang digunakan selama fase pemanasan berlangsung, ini diperoleh dari selisih energi pada titik *REACH* dan *START*. Karena pembacaan energi menggunakan satuan kWh, hasil selisih dikalikan 1.000 agar diperoleh satuan Wh. Energi saat fase pemanasan ini dapat dihitung sesuai dengan persamaan 2.6, perhitungan $E_{heating}$ dapat dihitung sebagai berikut:

$$E_{heating} = (E_{reach} - E_{start}) * 1.000$$

$$E_{heating} = (5,223 - 4,766) * 1.000$$

$$E_{heating} = 457 Wh$$

Kemudian nilai *HEI* dapat dihitung menggunakan persamaan 2.7, dengan set point sebesar 800 dan suhu saat *START* sebesar 264°C, perhitungan *HEI* dapat dilihat sebagai berikut:

$$HEI = \frac{E_{heatinng}}{SP - T_{start}}$$

$$HEI = \frac{457}{800 - 256}$$

$$HEI = 0,8526 Wh/_{\circ}C$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa selama fase pemanasan, *furnace* menggunakan energi rata-rata sebesar 0,8526 Wh untuk setiap kenaikan temperatur sebesar 1°C dari temperatur awal menuju *setpoint*. Selanjutnya akan dipaparkan perhitungan untuk mengetahui besaran *HER* sebagai *input* kedua *fuzzy*. Untuk menghitung nilai *HER* dibutuhkan $E_{holding}$ dan $t_{holding}$.

$E_{holding}$ merupakan energi yang terpakai selama fase holding yang didapatkan dari selisih antara energi yang terbaca pada saat *STOP* dan pada saat *REACH*. $E_{holding}$ dapat dihitung menggunakan persamaan 2.8 yang dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$E_{holding} = (E_{stop} - E_{reach}) * 1.000$$

$$E_{holding} = (5,309 - 5,223) * 1.000$$

$$E_{holding} = 86 Wh$$

Selanjutnya $t_{holding}$ seberapa lama fase holding berlangsung yang dapat dihitung dari selisih waktu *STOP* dan *REACH*. Nilai waktu dalam milidetik dibagi 60.000 agar diperoleh satuan menit. Besaran nilai $t_{holding}$ ini dapat dihitung langsung sebagai berikut:

$$t_{holding} = \frac{t_{stop} - t_{reach}}{60.000}$$

$$t_{holding} = \frac{1.890.710 - 1.538.242}{60.000}$$

$$t_{holding} = 5,8745 \text{ menit}$$

Setelah mendapat kena Eholding dan tholding kita dapat menghitung besaran *HER* menggunakan persamaan 2.9 sebagai berikut:

$$HER = \frac{E_{holding}}{t_{holding}}$$

$$HER = \frac{86}{5,8745}$$

$$HER = 14,6396 \text{ Wh/menit}$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa selama fase *holding*, *furnace* menggunakan energi rata-rata sebesar 14,6396 Wh setiap menit untuk mempertahankan kondisi temperatur setelah titik *REACH* tercapai.

Tabel 4. 15 Perbandingan Hasil Perhitungan Rumus Fuzzy dan Node-RED

Parameter	Perhitungan Rumus Fuzzy	Node-RED	Selisih
Energi pemanasan	457 Wh	457 Wh	0
<i>HEI</i>	0,8526 Wh/°C	0,85261194 Wh/°C	0,0000
Energi <i>holding</i>	86 Wh	86 Wh	0
Durasi <i>holding</i>	5,8745 menit	5,8745 menit	0
<i>HER</i>	14,6396 Wh/menit	14,63962686 Wh/menit	0,0000

Berdasarkan Tabel 4.15, hasil perhitungan dengan rumus fuzzy dan hasil perhitungan Node-RED menunjukkan nilai yang sama. Perbedaan yang terlihat hanya berasal dari jumlah angka di belakang koma karena Node-RED menampilkan hasil dengan presisi desimal yang lebih tinggi, sedangkan pada perhitungan manual dilakukan pembulatan hingga empat angka di belakang koma. Hal tersebut

menunjukkan bahwa algoritma perhitungan *HEI* dan *HER* yang diimplementasikan pada Node-RED telah sesuai dengan persamaan yang digunakan dalam penelitian.

Selain menghasilkan nilai *HEI* dan *HER*, Node-RED juga secara otomatis melanjutkan proses normalisasi terhadap *baseline* dan inferensi menggunakan metode Fuzzy Sugeno. Pada pengujian ini diperoleh nilai I_{HEI} sebesar 98,92 dan I_{HER} sebesar 97,60, sehingga sistem menghasilkan skor akhir sebesar 100 dengan status EFISIEN. Informasi tersebut menunjukkan bahwa nilai *HEI* dan *HER* yang dihitung berada di bawah nilai *baseline* yang digunakan sebagai acuan sehingga konsumsi energi pada fase pemanasan maupun *holding* masih berada dalam kategori normal.

Berdasarkan hasil pengujian tersebut, dapat disimpulkan bahwa Node-RED mampu menghitung nilai *HEI* dan *HER* secara otomatis menggunakan data ringkasan siklus yang dikirimkan oleh ESP32. Kesesuaian antara hasil perhitungan manual dan hasil yang ditampilkan pada Node-RED menunjukkan bahwa implementasi algoritma perhitungan telah berjalan dengan benar. Dengan demikian, nilai *HEI* dan *HER* yang dihasilkan dapat digunakan sebagai dasar pada tahap normalisasi terhadap *baseline* dan proses klasifikasi efisiensi menggunakan metode Fuzzy Sugeno.

4.3.4 Pengujian Sistem Fuzzy Sugeno

Pengujian sistem Fuzzy Sugeno dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh tahapan analisis efisiensi pada Node-RED dapat berjalan sesuai dengan rancangan. Tahapan pengujian dimulai dari normalisasi nilai *HEI* dan *HER* terhadap *baseline*, fuzzifikasi nilai indeks *HEI* dan *HER*, aktivasi basis aturan menggunakan operator MIN, perhitungan keluaran Sugeno dengan metode *weighted average*, hingga penentuan status akhir efisiensi.

Sistem Fuzzy Sugeno pada penelitian ini digunakan untuk menganalisis efisiensi operasional setelah satu siklus *furnace* selesai. Hasil analisis tidak digunakan untuk mengatur atau mengendalikan proses pemanasan. Pengujian dilakukan menggunakan data siklus *FURNACE-A994-55434* pada *setpoint* 800°C.

Data ringkasan siklus yang diterima oleh Node-RED ditunjukkan pada Gambar 4.14.

Setelah mendapatkan nilai *HEI* dan *HER* pada satu siklus sesuai dengan pengujian pada subab sebelumnya, data tersebut tidak langsung digunakan untuk *input* fuzzy, karena kebutuhan energi pada setiap *setpoint* berbeda. Oleh karena itu, kedua nilai tersebut dibandingkan dengan *baseline* pada set point 800°C. Dengan yang diketahui nilai *baseline* yang digunakan pada set point 800°C yaitu:

$$HEI_{baseline(800)} = 0,8619 \text{ Wh}/^{\circ}\text{C}$$

$$HER_{baseline(800)} = 15 \text{ Wh}/\text{menit}$$

Normaslisasi *HEI* dilakukan dengan persamaan 2.12, perhitungan normalisasi *HEI* dapat dilihat sebagai berikut:

$$I_{HEI} = \frac{HEI_{aktual}}{HEI_{baseline(800)}} * 100$$

$$I_{HEI} = \frac{0,8526}{0,8619} * 100$$

$$I_{HEI} = 98,92$$

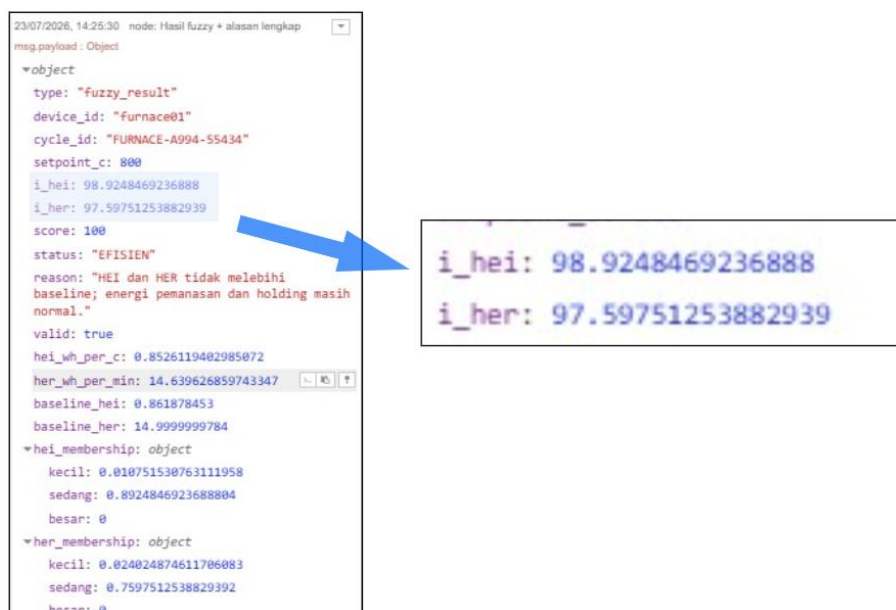
Lalu normalisasi *Her* dilakukan dengan persamaan 2.13, perhitungan normalisasi *HER* dapat dilihat sebagai berikut:

$$I_{HER} = \frac{HER_{aktual}}{HER_{baseline(800)}} * 100$$

$$I_{HER} = \frac{14,6396}{15,0000} * 100$$

$$I_{HER} = 97,59$$

Nilai yang didapat dari hasil normalisasi lebih rendah dibandingkan dengan nilai *baseline* menunjukkan penggunaan energi pada fase heating dan holding tidak melebihi kondisi referensi. Gambar selanjutnya memperlihatkan hasil perhitungan pada node-red yang dapat dilihat pada gambar 4.17.



Gambar 4. 17 Hasil Perhitungan Normalisasi pada Node-RED

Pada gambar 4.17 dapat dilihat bahwa hasil perhitungan pada Node-RED pada proses normalisasi nilai *HEI* dan *HER* sesuai dengan perhitungan yang telah dilakukan diatas, hal ini menunjukkan pembuatan normalisasi pada node-red sudah sesuai dengan rancangan yang seharusnya. Setelah proses normalisasi, selanjutnya akan dijelaskan proses mengenai fuzzifikasi dari nilai indeks *HEI* dan *HER*.

Tahap fuzzifikasi dilakukan untuk menentukan derajat keanggotaan nilai indeks terhadap kategori kecil, sedang, dan besar. Satu nilai indeks dapat memiliki keanggotaan pada lebih dari satu kategori karena terdapat daerah perpotongan antarfungsi keanggotaan. Kondisi tersebut memungkinkan perubahan keputusan berlangsung secara bertahap dan tidak bersifat kaku. Dalam menentukan derajat keanggotaan indeks terhadap setiap kategori keanggotaan digunakan persamaan 2.14 hingga 2.16 dengan fungsi keanggotaan yang dapat dilihat pada tabel 3.4.

Nilai I_{HEI} sebesar **98,92** berada pada rentang $90 < I_{HEI} < 100$, serta nilai I_{HER} sebesar **97,59** berada pada rentang $90 < I_{HER} < 100$. Kedua nilai indeks ini berada pada rentang kecil dan sedang, derajat keanggotaan kecil untuk I_{HEI} dan I_{HER} dapat dihitung sebagai berikut:

$$\mu_{HEI, kecil} = \frac{100 - 98.92}{100 - 0}$$

$$\mu_{HEI, kecil} = 0.0108$$

&

$$\mu_{HER, kecil} = \frac{100 - 97.59}{100 - 0}$$

$$\mu_{HER, kecil} = 0.0241$$

Derajat keanggotaan sedang untuk I_{HEI} dan I_{HER} dapat dihitung sebagai berikut:

$$\mu_{HEI, sedang} = \frac{98.92 - 90}{100 - 90}$$

$$\mu_{HEI, sedang} = 0.8924$$

&

$$\mu_{HER, sedang} = \frac{97.59 - 90}{100 - 90}$$

$$\mu_{HER, sedang} = 0.7597$$

Sementara itu, karena nilai I_{HEI} dan I_{HER} masih berada di bawah batas awal kategori besar, derajat keanggotaan besar untuk kedua indeks ialah 0. Pada tabel 4.16 dapat dilihat seluruh hasil fuzzyfikasi.

Tabel 4. 16. Hasil Fuzzifikasi I_{HEI} dan I_{HER}

Input Fuzzy	Himpunan	Derajat Keanggotaan
I_{HEI}	kecil	0.0108
	sedang	0.8924
	besar	0
I_{HER}	kecil	0.0241
	sedang	0.7597
	besar	0

Berdasarkan Tabel 4.16, nilai I_{HEI} dan I_{HER} memiliki keanggotaan terbesar pada kategori sedang. Artinya, penggunaan energi pemanasan lebih dominan berada pada

kondisi yang mendekati *baseline*, meskipun masih memiliki sebagian kecil keanggotaan pada kategori kecil. Tahap selanjutnya yaitu aktivasi basis aturan menggunakan operator min.

Setelah seluruh derajat keanggotaan diperoleh, tahap berikutnya adalah menentukan kekuatan aktivasi setiap aturan. Operator AND yang digunakan dalam sistem adalah operator MIN. Nilai aktivasi aturan ditentukan dengan mengambil nilai terkecil dari derajat keanggotaan kedua anteseden sesuai dengan persamaan 2.17. Karena derajat keanggotaan *HEI* besar dan *HER* besar bernilai nol, aturan yang melibatkan kategori besar tidak memberikan kontribusi terhadap hasil akhir. Dengan demikian, hanya empat aturan yang mempunyai bobot lebih dari nol. Selanjutnya akan dijelaskan aktivasi keempat aturan yang memiliki bobot.

Berdasarkan tabel 3.5 dapat diketahui Pada aturan R1, yaitu IF *HEI* Kecil AND *HER* Kecil THEN Efisien, diperoleh $w_1 = \min(0.0108; 0.0241) = 0.0108$ dengan konsekuen $z_1 = 100$. Aturan R2, yaitu IF *HEI* Kecil AND *HER* Sedang THEN Efisien, menghasilkan $w_2 = \min(0.0108; 0.7597) = 0.0108$ dengan konsekuen $z_2 = 100$. Selanjutnya, aturan R4 berupa IF *HEI* Sedang AND *HER* Kecil THEN Efisien menghasilkan $w_4 = \min(0.8924; 0.0241) = 0.0241$ dengan konsekuen $z_4 = 100$. Adapun aturan R5, yaitu IF *HEI* Sedang AND *HER* Sedang THEN Efisien, menghasilkan $w_5 = \min(0.8924; 0.7597) = 0.7597$ dengan konsekuen $z_5 = 100$. Hasil aktivasi seluruh aturan yang memiliki bobot lebih dari nol disajikan pada Tabel 4.18.

Tabel 4. 17. Hasil Aktivasi Aturan Fuzzy

Aturan	Kombinasi kondisi	Bobot aturan	Konsekuen
R1	<i>HEI</i> Kecil– <i>HER</i> Kecil	0.0108	100
R2	<i>HEI</i> Kecil– <i>HER</i> Sedang	0.0108	100
R4	<i>HEI</i> Sedang– <i>HER</i> Kecil	0.0241	100
R5	<i>HEI</i> Sedang– <i>HER</i> Sedang	0.7597	100

Berdasarkan tabel 4.17, R5 menjadi aturan dominan karena memiliki bobot tertinggi, yaitu 0,7597. Dominasi R5 sesuai dengan hasil fuzzifikasi sebelumnya karena nilai *HEI* dan *HER* sama-sama memiliki derajat keanggotaan terbesar pada

kategori sedang. Seluruh aturan aktif memiliki konsekuen efisien sehingga tidak terdapat kontribusi aturan tidak efisien pada pengujian ini. Selanjutnya akan dijelaskan mengenai tahapan perhitungan keluaran fuzzy sugeno.

Setelah bobot dan konsekuen setiap aturan diperoleh, keluaran akhir sistem dihitung menggunakan metode *weighted average*. Pada metode ini, setiap konsekuen dikalikan dengan bobot aturannya, kemudian jumlah seluruh kontribusi dibagi dengan jumlah bobot aturan yang aktif. Perhitungan dengan metode ini sesuai dengan persamaan 2.18-2.21, perhitungan keluaran akhir dapat dilihat sebagai berikut:

$$\sum w_i = 0.0108 + 0.0108 + 0.0241 + 0,7597$$

$$\sum w_i = 0,8054$$

Jumlah kontribusi seluruh aturan dihitung sebagai berikut:

$$\sum w_i z_i = (0.0108 * 100) + (0.0108 * 100) + (0.0241 * 100) + (0,7597 * 100)$$

$$\sum w_i z_i = 80,54$$

Dengan demikian, nilai keluaran Sugeno adalah:

$$Z = \frac{\sum w_i z_i}{\sum w_i}$$

$$Z = \frac{80,54}{0,8054}$$

$$Z = 100$$

Nilai keluaran sebesar 100 diperoleh karena seluruh aturan yang aktif memiliki konsekuen yang sama, yaitu efisien dengan nilai 100. Oleh karena itu, berapa pun perbedaan bobot setiap aturan, hasil *weighted average* tetap menghasilkan nilai 100 selama tidak terdapat aturan tidak efisien yang aktif. Tahapan selanjutnya yang akan dijelaskan yaitu klasifikasi hasil akhir.

Tahap terakhir dilakukan dengan membandingkan nilai keluaran Sugeno terhadap batas keputusan yang telah ditetapkan. Sistem menggunakan nilai 60 sebagai batas klasifikasi, sehingga apabila $Z \geq 60$, hasil dikategorikan efisien, sedangkan apabila $Z < 60$, hasil dikategorikan tidak efisien. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, diperoleh nilai keluaran sebesar $Z = 100$. Karena nilai tersebut memenuhi kondisi $100 \geq 60$, maka hasil akhir pengujian diklasifikasikan sebagai **EFISIEN**. Hasil perhitungan manual tersebut selanjutnya dibandingkan dengan hasil yang ditampilkan oleh Node-RED. Gambar 4.18 memperlihatkan hasil fuzzy pada Node-RED.



Gambar 4. 18 Hasil Output Fuzzy pada Node-RED

Berdasarkan keluaran Node-RED yang dapat dilihat pada gambar 4.18, diperoleh nilai I_{HEI} sebesar 98,92, nilai I_{HER} sebesar 97,59, skor sebesar 100, serta status EFISIEN. Node-RED juga menghasilkan alasan bahwa *HEI* dan *HER* tidak melebihi *baseline* sehingga penggunaan energi pada fase pemanasan dan *holding* masih berada dalam kondisi normal. Perbandingan hasil perhitungan fuzzy dengan yang ditampilkan pada Node-RED dapat dilihat pada tabel 4.18.

Tabel 4. 18. Perbandingan Hasil Perhitungan Manual dan Node-RED

Parameter	Perhitungan fuzzy	Hasil Node-RED	Kesesuaian
I_{HEI}	98,92	98,92485	Sesuai
I_{HER}	97,59	97,59751	Sesuai
Aturan dominan	R5	R5	Sesuai
Skor Sugeno	100	100	Sesuai
Status	Efisien	Efisien	Sesuai

Berdasarkan Tabel 4.18, hasil pengolahan Node-RED memiliki kesesuaian dengan perhitungan fuzzy pada seluruh tahap. Nilai *HEI* dan *HER* berhasil dihitung dari data ringkasan siklus, kemudian dinormalisasi menggunakan *baseline setpoint* 800°C. Hasil normalisasi dapat dipetakan ke dalam fungsi keanggotaan *HEI* dan *HER*, sehingga diperoleh empat aturan aktif dengan R5 sebagai aturan dominan.

Aktivasi aturan menggunakan operator MIN dan perhitungan keluaran menggunakan metode *weighted average* menghasilkan skor sebesar 100. Nilai tersebut berada di atas batas keputusan 60 sehingga siklus dikategorikan efisien. Kesesuaian antara hasil manual dan hasil Node-RED menunjukkan bahwa seluruh algoritma Fuzzy Sugeno telah diterapkan dengan benar.

Berdasarkan hasil pengujian, sistem Fuzzy Sugeno pada Node-RED telah mampu menjalankan seluruh tahapan analisis, mulai dari perhitungan *HEI* dan *HER*, normalisasi terhadap *baseline*, fuzzifikasi, aktivasi aturan, perhitungan keluaran Sugeno, hingga klasifikasi akhir. Siklus *FURNACE-A994-55434* pada *setpoint* 800°C dinyatakan efisien karena penggunaan energi pada fase pemanasan dan *holding* tidak melebihi *baseline* yang digunakan sebagai kondisi referensi.

4.3.5 Pengujian Sistem Secara Keseluruhan

Pengujian sistem secara keseluruhan dilakukan untuk mengetahui keberhasilan integrasi seluruh fungsi monitoring, pencatatan siklus, komunikasi data, analisis efisiensi, indikator hasil, dan sistem alarm pada *furnace*. Pengujian ini tidak dilakukan sebagai pengujian baru yang terpisah, tetapi disusun berdasarkan hasil pengujian pada subbab sebelumnya untuk menilai keterhubungan antarfungsi dalam satu sistem.

Proses pengujian dimulai ketika pengguna menentukan *setpoint* dan menjalankan *furnace*. ESP32 kemudian memantau temperatur dan parameter kelistrikan selama proses berlangsung serta mencatat data waktu, temperatur, dan energi pada tahapan *START*, *REACH*, dan *STOP*. Sistem hanya menjalankan fungsi monitoring dan pencatatan, sedangkan proses pengendalian temperatur dilakukan oleh sistem kendali *furnace* yang terpisah.

Setelah siklus selesai, ringkasan data dikirimkan dari ESP32 menuju Node-RED melalui protokol MQTT. Node-RED menerima dan memvalidasi data tersebut sebelum menghitung nilai *HEI* dan *HER*. Nilai *HEI* dan *HER* selanjutnya dinormalisasi terhadap *baseline* sesuai *setpoint*, kemudian diproses menggunakan metode Fuzzy Sugeno untuk menghasilkan skor dan status efisiensi operasional.

Hasil analisis selanjutnya dikirimkan kembali dari Node-RED menuju ESP32. Status efisien ditunjukkan melalui pilot lamp hijau, sedangkan status tidak efisien ditunjukkan melalui pilot lamp merah. Selain fungsi analisis efisiensi, ESP32 juga menjalankan sistem alarm lokal. Alarm *warning* aktif ketika temperatur aktual melebihi *setpoint* lebih dari 50°C, sedangkan alarm *trip* aktif ketika temperatur aktual melebihi *setpoint* lebih dari 100°C. Tabel 4.19 memperlihatkan status keberhasilan pengujian sistem secara menyeluruh.

Tabel 4. 19. Hasil Pengujian Sistem Secara Keseluruhan

No.	Fungsi yang diuji	Hasil pengujian	Status
1	Monitoring temperatur dan kelistrikan	Data dapat dibaca dan ditampilkan pada HMI	Berhasil
2	Pencatatan <i>START-REACH-STOP</i>	Waktu, temperatur, dan energi tercatat secara berurutan	Berhasil
3	Komunikasi ESP32 menuju Node-RED	Data ringkasan siklus diterima pada Node-RED	Berhasil
4	Perhitungan <i>HEI</i> dan <i>HER</i>	Hasil Node-RED sesuai dengan perhitungan manual	Berhasil
5	Normalisasi terhadap <i>baseline</i>	Nilai I_{HEI} dan I_{HER} diperoleh sesuai <i>baseline setpoint</i>	Berhasil
6	Klasifikasi Fuzzy Sugeno	Sistem menghasilkan skor dan status efisiensi	Berhasil
7	Komunikasi Node-RED menuju ESP32	Hasil klasifikasi diterima kembali oleh ESP32	Berhasil

Tabel 4.19. Lanjutan

No.	Fungsi yang diuji	Hasil pengujian	Status
8	Pilot lamp hasil efisiensi	Lampu hijau dan merah menyala sesuai status	Berhasil
9	Alarm warning	Peringatan aktif ketika ($T > SP + 50^{\circ}C$)	Berhasil
10	Alarm trip	Sistem trip ketika ($T > SP + 100^{\circ}C$)	Berhasil

Berdasarkan Tabel 4.19, seluruh fungsi dalam ruang lingkup penelitian dapat berjalan secara terintegrasi. ESP32 berhasil melakukan monitoring dan pencatatan kondisi operasi *furnace*, sedangkan Node-RED berhasil menerima data siklus, menghitung *HEI* dan *HER*, melakukan normalisasi, serta menjalankan klasifikasi Fuzzy Sugeno. Hasil klasifikasi juga berhasil dikirim kembali menuju ESP32 dan ditampilkan melalui pilot lamp sesuai dengan status efisiensi yang diperoleh.

Sistem alarm mampu bekerja secara lokal tanpa bergantung pada Node-RED maupun komunikasi MQTT. Kondisi *warning* dan *trip* dapat dibedakan berdasarkan selisih temperatur aktual terhadap *setpoint*. Dengan demikian, gangguan pada komunikasi data tidak menghilangkan fungsi monitoring lokal dan sistem alarm pada *furnace*.

Berdasarkan pengujian secara keseluruhan, sistem yang dirancang telah mampu menjalankan fungsi monitoring parameter *furnace*, pencatatan siklus operasi, analisis efisiensi menggunakan Fuzzy Sugeno, penyampaian hasil melalui pilot lamp, serta pemberian alarm temperatur berlebih. Sistem fuzzy hanya berfungsi sebagai sistem analisis dan tidak memengaruhi sistem pengendalian temperatur *furnace*.

4.3.6 Pengujian Penyimpanan Data hasil ke CSV

Pengujian penyimpanan data dilakukan untuk memastikan bahwa hasil pengolahan satu siklus *furnace* pada Node-RED dapat dicatat secara otomatis ke dalam berkas berformat *Comma-Separated Values (CSV)*. Penyimpanan tersebut digunakan sebagai dokumentasi hasil pengujian dan memudahkan proses pemeriksaan kembali terhadap data *START*, *REACH*, *STOP*, perhitungan *HEI* dan *HER*, *baseline*, hasil normalisasi, serta klasifikasi Fuzzy Sugeno.

Pada sistem yang dirancang, penyimpanan dilakukan setelah Node-RED menerima ringkasan siklus yang valid dan menyelesaikan seluruh proses pengolahan data. Data hasil kemudian disusun dalam bentuk satu baris untuk setiap siklus pengoperasian dan ditambahkan ke dalam berkas *hasil_fuzzy_furnace.csv*. Berkas tersebut disimpan pada penyimpanan lokal komputer yang menjalankan Node-RED sehingga data dapat diakses kembali menggunakan perangkat lunak pengolah angka, seperti Microsoft Excel.

Pengujian dilakukan dengan menjalankan beberapa siklus pengoperasian *furnace* pada *setpoint* yang berbeda. Setelah hasil pengolahan muncul pada Node-RED, berkas *CSV* dibuka untuk memastikan bahwa data baru telah ditambahkan dan setiap parameter tersimpan pada kolom yang sesuai. Gambar 4.19 memperlihatkan isi dari *CSV* dari hasil pengolahan fuzzy.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	setpoint.c	start.time.ms	start.temp.c	start.energy.kwh	reach.time.ms	reach.temp.c	reach.energy.kwh	stop.time.ms	stop.temp.c	stop.energy.kwh	heat.energy.wh	holding.energy.wh	holding.minutes	hei.wh.per.c	baseline.hei
2	400	1919553	219.75	0.394	2143746	395.5	0.458	2482956	415.25	0.493	64	35	5.6535	0.355062413	94.44
3	setpoint.c	start.time.ms	start.temp.c	start.energy.kwh	reach.time.ms	reach.temp.c	reach.energy.kwh	stop.time.ms	stop.temp.c	stop.energy.kwh	heat.energy.wh	holding.energy.wh	holding.minutes	hei.wh.per.c	baseline.hei
4	600	1000000	32	15	2020000	600.5	15.313	2200000	601	15.354	313	41	3	0.551056338	0.550866282
5	setpoint.c	start.time.ms	start.temp.c	start.energy.kwh	reach.time.ms	reach.temp.c	reach.energy.kwh	stop.time.ms	stop.temp.c	stop.energy.kwh	heat.energy.wh	holding.energy.wh	holding.minutes	hei.wh.per.c	baseline.hei
6	600	1000000	32	15	2020000	600.5	15.313	2200000	601	15.354	313	41	3	0.551056338	0.550866282
7	setpoint.c	start.time.ms	start.temp.c	start.energy.kwh	reach.time.ms	reach.temp.c	reach.energy.kwh	stop.time.ms	stop.temp.c	stop.energy.kwh	heat.energy.wh	holding.energy.wh	holding.minutes	hei.wh.per.c	baseline.hei
8	150	392806	31.25	0.65	608135	145.75	0.699	999697	150.25	0.706	49	7	6.526033333	0.412631579	0.422693047
9	200	1143933	47	0	1397089	195.5	0.764	1640149	196.25	0.771	764	7	4.051	4.993464052	0.341984733
10	300	1753028	183.25	0.772	1968445	295.25	0.821	2293533	296.5	0.842	49	21	5.401466667	0.419700214	0.396330273
11	setpoint.c	start.time.ms	start.temp.c	start.energy.kwh	reach.time.ms	reach.temp.c	reach.energy.kwh	stop.time.ms	stop.temp.c	stop.energy.kwh	heat.energy.wh	holding.energy.wh	holding.minutes	hei.wh.per.c	baseline.hei
12	200	885192	37	0	1412757	195.25	1.294	1802756	197.75	1.314	1294	20	6.499983333	7.938650307	0.341984733
13	600	1000000	32	15	2020000	600.5	15.313	2200000	601	15.354	313	41	3	0.551056338	0.550866282
14	setpoint.c	start.time.ms	start.temp.c	start.energy.kwh	reach.time.ms	reach.temp.c	reach.energy.kwh	stop.time.ms	stop.temp.c	stop.energy.kwh	heat.energy.wh	holding.energy.wh	holding.minutes	hei.wh.per.c	baseline.hei
15	600	1000000	32	15	2020000	600.5	15.313	2200000	601	15.354	313	41	3	0.551056338	0.550866282
16	600	1000000	32	15	2020000	600.5	15.313	2200000	601	15.354	313	41	3	0.551056338	0.550866282

Gambar 4.19. Tampilan *CSV* Hasil Pengolahan Fuzzy

Berdasarkan Gambar 4.19, hasil pengolahan sistem Fuzzy Sugeno berhasil disimpan ke dalam berkas *hasil_fuzzy_furnace.csv* pada penyimpanan lokal komputer. Data yang tersimpan antara lain meliputi *setpoint*, waktu *START*, temperatur *START*, energi *START*, waktu *REACH*, temperatur *REACH*, energi *REACH*, waktu *STOP*, temperatur *STOP*, energi *STOP*, energi pemanasan, energi *holding*, durasi *holding*, nilai *HEI*, serta *baseline HEI*. Kolom berikutnya juga

digunakan untuk menyimpan parameter lanjutan, seperti indeks normalisasi, derajat keanggotaan, skor fuzzy, status efisiensi, dan alasan hasil klasifikasi berdasarkan hasil *output* fuzzy.

Setiap baris data merepresentasikan satu hasil pengolahan siklus *furnace*. Dengan demikian, data dari beberapa pengujian dapat disimpan secara berurutan dalam satu berkas tanpa menggantikan hasil pengujian sebelumnya. Penyimpanan dalam bentuk *CSV* juga memudahkan proses pengelompokan, perbandingan, dan analisis data berdasarkan *setpoint* maupun identitas siklus.

Penyimpanan dilakukan secara lokal sehingga proses pencatatan tidak memerlukan layanan penyimpanan berbasis *cloud*. Namun, Node-RED dan komputer penyimpanan harus berada dalam kondisi aktif ketika hasil siklus diproses. Apabila komputer atau Node-RED tidak aktif, hasil analisis tidak dapat langsung dicatat ke dalam berkas *CSV*.

Berdasarkan hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa sistem berhasil menyimpan data hasil analisis efisiensi operasional *furnace* ke dalam berkas *CSV* pada penyimpanan lokal komputer. Data yang tersimpan dapat ditelusuri berdasarkan setiap siklus pengoperasian dan dapat digunakan untuk mendukung dokumentasi serta pembahasan hasil penelitian.