

BAB IV PENGUJIAN DAN HASIL ANALISA

Setelah proses fabrikasi alat pasteurisasi susu otomatis selesai, dilakukan tahap pengujian dan pengambilan data secara bertahap serta berulang guna memvalidasi kinerja sistem. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa setiap komponen berfungsi sesuai dengan spesifikasi teknisnya, serta untuk memverifikasi bahwa hasil pengukuran sensor seperti suhu dan level ketinggian susu relevan dan akurat dibandingkan dengan metode konvensional. Selain itu, data yang diperoleh dari pengujian ini juga digunakan untuk mengevaluasi apakah sistem telah bekerja sesuai dengan logika *fuzzy* yang dirancang dan apakah output yang dihasilkan mendekati kondisi ideal dalam proses pasteurisasi, yakni menjaga suhu stabil di sekitar 64°C selama periode waktu tertentu.

4.1 Pengukuran

Dalam pelaksanaan tahap pengukuran serta pengujian ini, penulis menyiapkan peralatan pengukuran dengan alat seperti berikut:

Tabel 4.1 Alat ukur yang digunakan

No	Alat Ukur	Jumlah	Keterangan
1	Multimeter Digital	1	Mengukur tegangan
2	Multimerer Digital	1	Pengukuran suhu
3	Penggaris	1	Pengukuran jarak
4	Laptop	1	Pengambilan data

4.2 Aturan Pengukuran dan Pengujian

Pada tahap ini dilakukan serangkaian pengukuran dan pengujian terhadap komponen utama yang terpasang pada sistem pasteurisasi susu otomatis untuk memastikan keakuratan dan kestabilan fungsinya. Pengujian pertama dilakukan pada sensor ultrasonik HY-SRF05 dengan cara membandingkan hasil pembacaan level ketinggian susu yang ditampilkan oleh sistem dengan pengukuran manual menggunakan penggaris. Hal ini bertujuan untuk memverifikasi bahwa sensor

dapat membaca jarak secara konsisten dan akurat. Selanjutnya, dilakukan pengujian pada sensor suhu DS18B20 dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap suhu sebenarnya yang diukur menggunakan termometer digital. Pengujian ini dilakukan pada berbagai kondisi suhu untuk mengevaluasi keandalan pembacaan sensor selama proses pemanasan. Setelah itu, dilakukan pengujian terhadap modul *AC Light Dimmer* yang digunakan untuk mengatur intensitas daya pemanas berdasarkan *output fuzzy logic*. Pengujian dilakukan dengan mengamati respons perubahan *duty cycle* PWM terhadap suhu dan level susu yang dibaca oleh sistem. Terakhir, dilakukan validasi terhadap implementasi logika *fuzzy* dengan cara membandingkan antara sistem dengan *fuzzy logic* dan tanpa *fuzzy logic* serta membandingkan output sistem nyata (ESP32) dengan hasil simulasi pada MATLAB, guna melihat apakah nilai keluaran seperti daya pemanas sudah sesuai dengan rancangan logika fuzzy. Semua hasil pengujian dicatat secara sistematis dan digunakan sebagai dasar dalam proses kalibrasi serta evaluasi kinerja sistem secara keseluruhan.

4.3 Pengukuran dan Pengujian Komponen

Pengukuran dan pengujian komponen ini bertujuan agar dapat mengetahui serta menganalisis kemungkinan *error* yang dihasilkan oleh sensor, yang mana dari *error* tersebut dapat dilakukannya kalibrasi agar sensor pada alat dapat berjalan sesuai dengan spesifikasinya dan menghasilkan data yang benar. Berikut beberapa pengukuran, pengujian serta kalibrasi sensor yang dilakukan:

4.3.1 Pengukuran catu daya (*power supply*)

Pengujian pada *power supply* 12V 5A dilakukan untuk memastikan bahwa perangkat ini mampu mengubah tegangan AC dari sumber listrik menjadi tegangan DC secara stabil dan sesuai kebutuhan sistem pasteurisasi. Pengukuran dilakukan menggunakan multimeter digital, karena alat ini mampu membaca baik tegangan AC maupun DC dengan akurasi tinggi dalam satu perangkat.

Tabel 4.2. Besaran nilai pengukuran catu daya.

Tegangan Input AC (V)	Tegangan Output DC (V)
220	12,03

Hasil pengujian menunjukkan bahwa konversi dari input AC ke *output* DC berjalan dengan baik, dengan arus keluaran sebesar 5A. Setelah dilakukan pengukuran sebanyak tiga kali, diperoleh rata-rata tegangan *output* sebesar 12,03 V seperti ditunjukkan pada Tabel 4.2. Nilai tersebut sangat mendekati spesifikasi tegangan ideal (12V), dengan tingkat error yang sangat kecil, yaitu sekitar 0,25%. Hasil ini menunjukkan bahwa *power supply* berada dalam kondisi baik dan layak digunakan untuk menyuplai kebutuhan daya sistem pasteurisasi secara stabil.

4.3.2 Pengukuran Tangki Susu

Pengukuran pada tangki susu dilakukan untuk mengetahui kapasitas dari tangki susu yang digunakan untuk alat pasteurisasi susu. Pengukuran ini bertujuan untuk menentukan kapasitas maksimum tangki, sehingga dapat diketahui volume susu maksimum yang dapat diproses dalam satu siklus pasteurisasi. Informasi ini penting sebagai dasar dalam perancangan sistem kendali suhu dan volume, serta untuk memastikan proses pasteurisasi berjalan optimal sesuai dengan kapasitas alat yang dirancang. Hasil pengukuran disajikan pada Tabel 4.3 berikut:

Tabel 4. 3 Pengukuran Tangki

Tinggi Tangki (cm)	Jari-Jari Tangki (cm)
18	13.5

Dari Tabel 4. 3 dapat dilihat bahwa tinggi tangki adalah 18cm, namun dengan mempertimbangkan jarak aman antara tinggi dinding dengan tutup tangka maka penulis menggunakan jarak aman 3cm yang mengubah ketinggian maksimum menjadi 15cm sehingga dapat dihitung volume menggunakan rumus 2.5 sebagai berikut.

$$V = \pi . r^2 . t$$

$$V = 3.14 . 13.5^2 . 15$$

$$V = 8.58 \ell$$

Kemudian untuk menghitung persentase volume susu dapat menggunakan rumus 2.6 sebagai berikut.

$$\text{persentase } V = \frac{x}{V \text{ total}} \times 100\%$$

$$\text{persentase } V = \frac{8.58}{8.58} \times 100\%$$

$$\text{persentase } V = 100\%$$

Kesimpulan yang didapat adalah kapasitas volume maksimum dari tangki susu dalam satu kali proses pasteurisasi adalah sebanyak 8.58 ℓ dengan persentase yang tertera adalah 100%.

4.3.3 Pengukuran Heater

Pengukuran pada heater dilakukan untuk memastikan bahwa daya yang digunakan sesuai dengan kebutuhan sistem pemanas dan untuk mengetahui besarnya konsumsi energi selama proses pemanasan berlangsung.

Tabel 4. 4 Pengukuran Heater

Tegangan Input AC (V)	Tegangan Output DC (V)
220	210

Perhitungan dilakukan dengan menggunakan rumus 2.1 dengan volume susu sebanyak 8.58 ℓ , suhu awal susu adalah 27°C, dan set point 64°C adalah sebagai berikut.

$$Q = m.c.\Delta T$$

$$Q = 8.58.3900.(64 - 27)$$

$$Q = 1,238,094 \text{ Joule}$$

Kemudian untuk menghitung besar daya dari heater yang diperlukan maka penulis menggunakan waktu misalkan 30 menit dengan rumus 2.2 sebagai berikut.

$$P = Q/t$$

$$P = 1,238,094/1800$$

$$P = 687 \text{ Watt}$$

Berdasarkan perhitungan di atas diketahui bahwa untuk memanaskan 8,58 ℓ susu dari suhu awal 27°C hingga mencapai suhu 64°C dibutuhkan energi sebesar

sekitar 1.238.094 joule. Dengan asumsi proses pemanasan berlangsung selama 30 menit (1800 detik), maka daya minimum yang dibutuhkan adalah sekitar 689 Watt.

Dalam implementasi alat, penulis menggunakan heater berdaya 1000 Watt, yang berarti daya yang tersedia melebihi kebutuhan teoritis sistem. Dengan demikian, proses pemanasan dapat berlangsung lebih cepat dari waktu perhitungan teoritis.

4.3.4 Pengukuran dan Pengujian Sensor Ultrasonik

Pengujian dan pengukuran sensor ultrasonik dilakukan untuk memastikan bahwa data jarak yang diperoleh dari sensor bersifat valid dan akurat. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap pengukuran manual menggunakan alat ukur konvensional seperti penggaris atau meteran. Selisih antara hasil sensor dan alat ukur tersebut digunakan sebagai dasar untuk menghitung tingkat kesalahan (*error*), yang selanjutnya dapat digunakan dalam proses kalibrasi sensor agar pembacaan menjadi lebih presisi.

Tabel 4.5 Pengukuran dan Pengujian Sensor Ultrasonik

Jarak (cm)	Hasil Pembacaan Sensor HY-SRF05 (cm)	Hasil Penggaris (cm)	Error
3	2.9	3	0,034
6	5.92	6	0,013
9	9.4	9	0,042
13	12.57	12	0,034
18	17.92	18	0,005
Standar Deviasi			0,0158

Dari Tabel 4.5 dapat dilihat bahwa tidak terdapat *error* yang perlu dilakukan kalibrasi, sebab hasil yang terukur oleh sensor ultrasonik dan hasil yang dihasilkan oleh pengukuran konvensional terukur valid dengan standar deviasi sebesar 0,0158.

4.3.5 Pengukuran dan Pengujian Sensor DS18B20

Pengujian dan pengukuran sensor suhu DS18B20 dilakukan untuk memastikan bahwa pembacaan suhu oleh sistem sesuai dengan nilai suhu aktual

yang diukur menggunakan alat ukur konvensional, seperti termometer digital. Proses validasi dilakukan dengan membandingkan data suhu yang ditampilkan oleh sensor DS18B20 dengan hasil pembacaan multimeter digital yang dapat mengukur suhu pada saat yang sama. Selisih antara kedua nilai ini digunakan untuk menghitung error relatif yang kemudian menjadi acuan dalam proses evaluasi atau kalibrasi sensor. Hasil pengukuran tersebut disajikan dalam Tabel 4.6 berikut:

Tabel 4.6 Pengukuran dan Pengujian Sensor DS18B20

Hasil Pembacaan Sensor Suhu (°C)	Hasil Termometer (°C)	Error
27.29	27.7	0,015
38.1	38.6	0,013
53.54	54.7	0,021
63.25	64.6	0,021
Standar deviasi		0,00412

Berdasarkan hasil pengujian yang ditampilkan pada Tabel 4.6, dapat disimpulkan bahwa sensor suhu DS18B20 memberikan hasil pembacaan yang cukup akurat, dengan standar deviasi sebesar 0,00412. Hal ini menunjukkan bahwa sensor berfungsi dengan baik dan tidak memerlukan proses kalibrasi tambahan.

4.3.6 Pengukuran dan Pengujian AC Light Dimmer

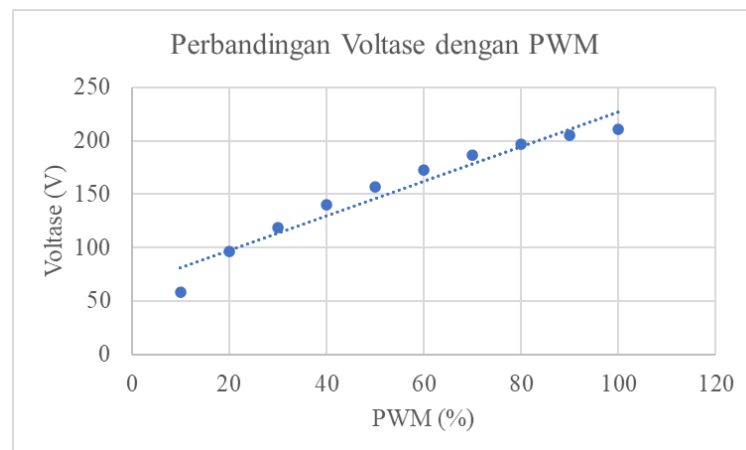
Pengukuran dan pengujian *AC Light Dimmer* dilakukan agar dapat melihat hasil *input* masukan dan *output* yang diberikan ke motor DC dengan nilai variasi yang diatur dengan PWM. Adapun hasil pengukuran dan pengujian modul dengan multimeter sebagai berikut:

Tabel 4.7 Pengukuran dan Pengujian *AC Light Dimmer*

No	PWM (%)	Tegangan Output (V)
1	10	58.67
2	20	96
3	30	119
4	40	140

5	50	157.2
6	60	172.4
7	70	186.2
8	80	196.9
9	90	205.5
10	100	210.7

Berdasarkan hasil pengukuran dan pengujian yang disajikan pada Tabel 4.7, dapat diamati bahwa terdapat hubungan yang searah antara nilai PWM dengan tegangan output yang dihasilkan oleh modul AC Light Dimmer. Semakin besar nilai PWM yang diberikan, maka tegangan output yang dihasilkan juga semakin tinggi. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa modul ini mampu mengatur tegangan output secara bertahap sesuai variasi sinyal PWM, sehingga efektif digunakan untuk mengendalikan beban seperti elemen pemanas. Kemudian, sebuah grafik diperlukan untuk menunjukkan hubungan antara keduanya. Berdasarkan data yang diperoleh, dapat dilihat bahwa hubungan tersebut tidak bersifat linier, sehingga diperlukan pendekatan fungsi non-linear untuk merepresentasikan karakteristik perubahan tegangan terhadap nilai PWM secara lebih akurat.



Gambar 4. 1 Grafik Perbandingan Voltase dengan PWM

Berdasarkan Gambar 4.1, dapat dianalisis bahwa data perbandingan antara nilai PWM dan tegangan output, diperoleh persamaan regresi linear dan koefisien determinasi seperti pada gambar di atas. Dalam hal ini, y merupakan nilai tegangan

(voltase) dan x adalah nilai PWM. Berdasarkan gambar di atas dapat diambil kesimpulan bahwa bahwa model ini dapat merepresentasikan bahwa adanya perbedaan besar PWM dapat memengaruhi besarnya tegangan, meskipun tidak sepenuhnya linier.

4.4 Pengujian Antarmuka Delphi

Pengujian antarmuka komputer dilakukan untuk memastikan seluruh tombol dan fitur yang tersedia dalam aplikasi Delphi dapat berjalan sesuai dengan fungsinya. Tujuan utama pengujian ini adalah untuk mengevaluasi apakah interaksi pengguna (*input*) mampu menghasilkan respons sistem yang sesuai. Pengujian dinyatakan berhasil jika setiap tombol dapat menjalankan fungsinya dan memberikan umpan balik atau data yang sesuai.

Tabel 4.8 Pengujian Antarmuka

No	Nama Tombol / Fitur	Input Pengguna	Hasil Pengujian	Status
1	<i>Connect</i>	Klik	Terhubung dengan ESP32, status berubah	Berhasil
2	<i>Disconnect</i>	Klik	Koneksi ke ESP32 terputus	Berhasil
3	<i>Refresh</i>	Klik	Daftar port serial diperbarui	Berhasil
4	<i>Close</i>	Klik	Aplikasi tertutup	Berhasil
5	<i>Reset</i>	Klik	Grafik, waktu pasteurisasi, dan caption kembali seperti semula	
6	<i>Temperature Data Chart</i>	Sistem otomatis menampilkan grafik	Grafik suhu tampil <i>real-time</i> dengan sumbu waktu dan suhu	Berhasil
7	<i>Panel Data</i>	Sensor aktif	Data suhu, level susu, dan dimmer tampil <i>real-time</i>	Berhasil
8	Status Pasteurisasi	Sistem berjalan	Menampilkan status proses (<i>Waiting, On Process, Selesai</i>)	Berhasil
9	<i>Progress Bar</i>	Sistem berjalan	Menampilkan progres persentase pasteurisasi	Berhasil

Berdasarkan Tabel 4.8. seluruh fitur dan tombol pada antarmuka komputer untuk sistem pasteurisasi susu telah diuji dan menunjukkan hasil yang sesuai dengan fungsinya. Fitur seperti tombol *Connect*, *Refresh*, dan grafik suhu *real-time* telah memberikan respons yang akurat dan mendukung monitoring yang

efisien. Karena fitur chart dan status berjalan otomatis, maka validitasnya dibuktikan melalui tampilan output data yang tampil dengan stabil dan real-time, serta perubahannya sesuai dengan kondisi sensor. Dengan demikian, antarmuka komputer dapat dinyatakan berjalan dengan berhasil dan layak digunakan untuk memantau sistem pasteurisasi secara langsung.

4.5 Pengujian dan Pengukuran Alat Pasteurisasi Susu

Pada tahap ini, dilakukan pengujian terhadap sistem pasteurisasi susu otomatis untuk memastikan bahwa alat dapat bekerja sesuai dengan logika dan kondisi yang telah dirancang. Pengujian dilakukan dengan memantau respons sistem terhadap berbagai kondisi suhu dan level susu di dalam tangki. Sistem diuji mulai dari kondisi suhu rendah hingga mencapai suhu pasteurisasi (64°C), dengan volume susu bervariasi. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memastikan bahwa pemanas menyala dan mati secara otomatis sesuai dengan output fuzzy logic, serta bahwa suhu dapat dijaga stabil selama proses berlangsung. Selain itu, dilakukan observasi terhadap waktu pemanasan dan kestabilan suhu, sebagai indikator keberhasilan sistem dalam mempertahankan metode pasteurisasi LTLT (*Low Temperature Long Time*).

4.5.1 Desain Keanggotaan Fuzzy dan Penyesuaian Keanggotaan (*Trial and Error*)

Fungsi keanggotaan untuk masing-masing variabel (suhu, level susu, dan output daya pemanas) terlebih dahulu dirancang berdasarkan teori dan pendekatan awal dari studi literatur. Namun, karena karakteristik sistem pasteurisasi yang sebenarnya memiliki respons dinamis dan tidak selalu linier, maka dilakukan proses penyesuaian fungsi keanggotaan secara bertahap menggunakan metode *trial and error*.

Tujuan dari proses ini adalah untuk menyempurnakan bentuk dan rentang fungsi keanggotaan agar menghasilkan kontrol yang lebih stabil dan sesuai dengan kondisi nyata, khususnya untuk menjaga suhu susu tetap pada kisaran $63\text{--}65^{\circ}\text{C}$. Untuk mendapatkan bentuk fungsi keanggotaan fuzzy yang paling sesuai dengan karakteristik sistem, dilakukan serangkaian percobaan *trial and error* pada tiga skenario volume susu yang berbeda, yaitu 3 liter, 5 liter, dan 8 liter dengan

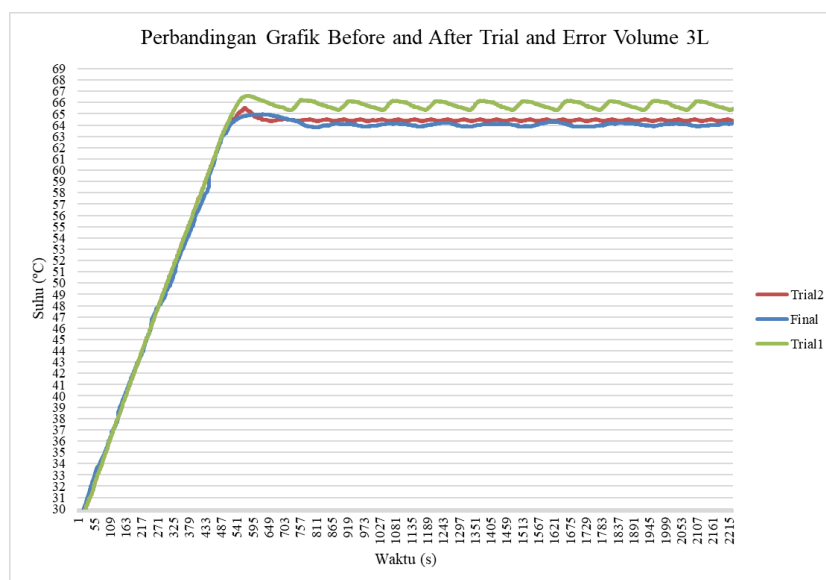
menggunakan fungsi keanggotaan yang berbeda pula pada setiap percobaan seperti pada Tabel 4. 9 berikut.

Tabel 4. 9 Tabel Fungsi Keanggotaan *Fuzzy Logic*

No.	Percobaan	Parameter Suhu	Parameter Level Susu	Parameter Output
1.	Trial 1	Dingin: (-6, 0, 10, 20)	Kosong: (0, 0, 10, 20)	Level0: (0, 0, 0, 0)
		Normal: (18, 30, 45, 64)	Dangkal: (20, 30, 30, 45)	Level1: (10, 25, 40, 60)
		Hangat: (63.5, 64, 64, 65.5)	Sedang: (45, 50, 50, 70)	Level2: (60, 70, 80, 90)
		Panas: (65, 66, 75, 80)	Penuh: (65, 75, 100, 100)	Level3: (90, 100, 100, 100)
2.	Trial 2	Dingin: (-6, 0, 10, 20)	Kosong: (0, 0, 10, 20)	Level0: (0, 0, 0, 0)
		Normal: (18, 30, 45, 63.56)	Dangkal: (20, 30, 30, 45)	Level1: (30, 40, 40, 50)
		Hangat: (63, 63.69, 63.69, 64.5)	Sedang: (45, 50, 50, 70)	Level2: (60, 70, 80, 90)
		Panas: (64, 66, 75, 80)	Penuh: (65, 75, 100, 100)	Level3: (90, 100, 100, 100)
3.	Final	Dingin: (-6, 0, 20, 45)	Kosong: (0, 0, 10, 20)	Level0: (0, 0, 0, 0)
		Normal: (35, 50, 50, 63)	Dangkal: (20, 30, 30, 50)	Level1: (30, 40, 40, 50)
		Hangat: (62, 63.94, 63.94, 64.06)	Sedang: (45, 60, 60, 70)	Level2: (50, 60, 60, 70)
		Panas: (63.69, 66, 75, 80)	Penuh: (65, 75, 100, 100)	Level3: (85, 90, 95, 100)

Grafik-grafik berikut menampilkan perbandingan hasil pengukuran suhu berdasarkan fungsi keanggotaan awal (before trial) dan fungsi keanggotaan hasil

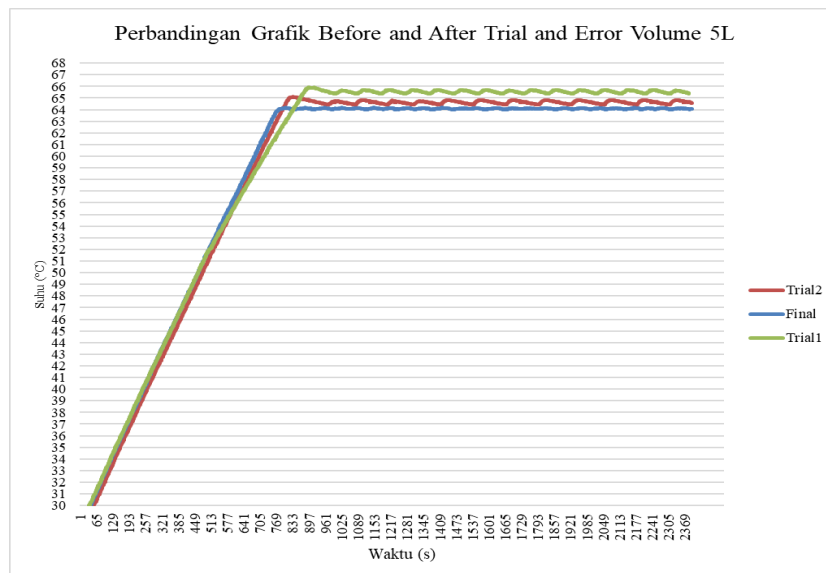
akhir (after trial) yang telah disesuaikan berdasarkan hasil pengujian pada volume 3L, 5L, dan 8L.



Gambar 4. 2 Grafik *Trial and Error* Volume 3L

Pada percobaan volume susu sebanyak 3 liter dilakukan melalui tiga tahap *trial and error*, yaitu *Trial1*, *Trial2*, dan *Final*, dengan tujuan menyempurnakan pengendalian suhu agar stabil dan sesuai dengan target pasteurisasi sekitar 64°C. Pada *Trial1*, suhu rata-rata mencapai 65,77°C dengan *overshoot* mencapai 4%, menunjukkan bahwa pemanasan terlalu tinggi dan belum stabil, terbukti dari standar deviasi suhu yang masih besar yaitu 0,402. Pada *Trial2*, terdapat perbaikan signifikan dengan suhu rata-rata turun menjadi 64,44°C dan *overshoot* menurun ke 2,34%, serta standar deviasi suhu sedikit menurun menjadi 0,373. Sementara itu, pada percobaan *Final*, sistem menunjukkan performa terbaik dengan suhu rata-rata 64,11°C, *overshoot* hanya 1,56%, dan standar deviasi suhu paling kecil yaitu 0.267. Berdasarkan grafik respon suhu pada volume 3 liter, sistem mencapai kondisi stabil pada rentang suhu pasteurisasi 63–65°C sekitar detik ke-550, yang menunjukkan *settling time sistem*. Setelah mencapai kondisi tersebut, suhu berfluktuasi kecil di sekitar nilai *setpoint* 64°C. Suhu rata-rata pada kondisi *steady state* sebesar 64,1°C, sehingga *steady-state error* yang dihasilkan relatif kecil dan

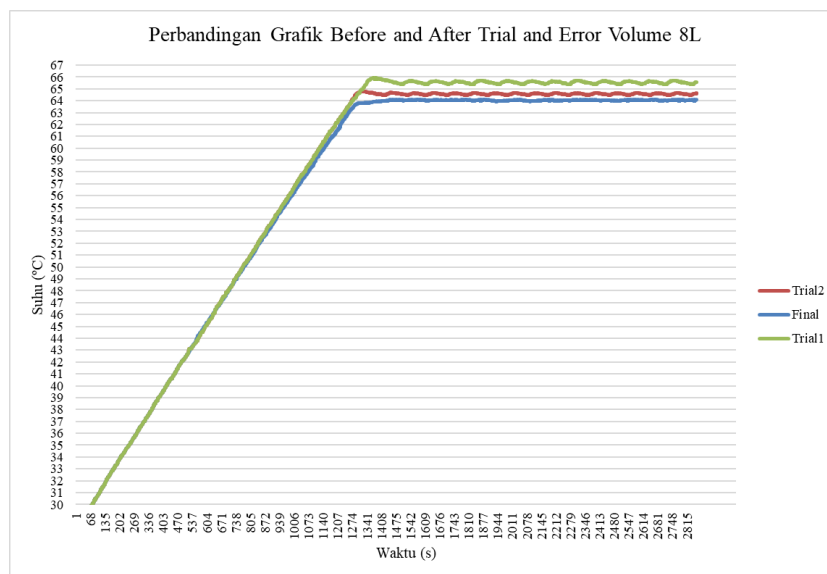
masih dalam batas toleransi pasteurisasi. Hasil ini membuktikan bahwa sistem fuzzy logic mampu menjaga suhu secara stabil dan adaptif.



Gambar 4. 3 Grafik *Trial and Error* Volume 5L

Pada percobaan volume susu sebanyak 5 liter dilakukan melalui tiga tahap *trial and error*, yaitu *Trial1*, *Trial2*, dan *Final*, dengan tujuan menyempurnakan pengendalian suhu agar stabil dan sesuai dengan target pasteurisasi sekitar 64°C. Pada *Trial1*, suhu rata-rata masih terlalu tinggi yakni 65,49°C dengan *overshoot* mencapai 3,03%. Selain itu, fluktuasi pemanasan cukup besar, ditunjukkan dengan standar deviasi suhu sebesar 0,339. Hal ini menunjukkan bahwa kontrol suhu belum stabil. Pada *Trial2*, terjadi perbaikan cukup signifikan dengan suhu rata-rata menurun menjadi 64,63°C dan *overshoot* menurun ke 1,75%. Fluktuasi sistem juga mulai menurun dengan standar deviasi suhu sebesar 0,204. Meskipun masih belum optimal, sistem mulai menunjukkan respons yang lebih terkendali terhadap proses pemanasan. Pada percobaan *Final* menunjukkan performa terbaik. Suhu rata-rata mencapai 64,07°C yang sangat dekat dengan suhu target 64°C, dengan *overshoot* terendah yakni 0,297%. Stabilitas sistem juga meningkat tajam dengan standar deviasi suhu hanya 0,089. Berdasarkan grafik respon suhu pada volume 5 liter, sistem mencapai kondisi stabil pada rentang suhu pasteurisasi 63–65°C sekitar detik ke-650 hingga 700, yang menunjukkan *settling time sistem*. Setelah mencapai kondisi stabil, suhu berfluktuasi kecil di sekitar nilai *setpoint*

64°C. Suhu rata-rata pada kondisi steady state sebesar 64,0°C, sehingga steady-state error yang dihasilkan sangat kecil dan masih berada dalam batas toleransi pasteurisasi. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem fuzzy logic mampu menyesuaikan daya pemanas secara adaptif terhadap peningkatan volume susu tanpa menimbulkan fluktuasi suhu yang signifikan.



Gambar 4. 4 Grafik *Trial and Error* Volume 8L

Pada percobaan volume susu sebanyak 8 liter dilakukan melalui tiga tahap *trial and error*, yaitu *Trial1*, *Trial2*, dan *Final*, dengan tujuan menyempurnakan pengendalian suhu agar stabil dan sesuai dengan target pasteurisasi sekitar 64°C. Pada *Trial1*, suhu rata-rata masih terlalu tinggi, yaitu 65,47°C dengan *overshoot* mencapai 3,03%. Nilai standar deviasi suhu sebesar 0,376 menunjukkan bahwa fluktuasi suhu cukup besar. Pada *Trial2*, terlihat adanya peningkatan performa. Suhu rata-rata turun menjadi 64,52°C dan *overshoot* menurun ke 1,27%, yang berarti sistem mulai lebih akurat mendekati target suhu pasteurisasi. Standar deviasi suhu juga berkurang menjadi 0,268. Pada percobaan *Final*, sistem mencapai performa terbaik. Suhu rata-rata adalah 64,03°C, sangat dekat dengan target 64°C. *Overshoot* hanya 0,19%, merupakan yang terendah dari semua percobaan. Standar deviasi suhu pun paling kecil, yaitu 0,1217. Pada pengujian dengan volume 8 liter, grafik menunjukkan bahwa sistem mencapai kondisi stabil pada rentang suhu 63–65°C sekitar detik ke-800 hingga 850. Waktu ini lebih lama

dibandingkan volume yang lebih kecil, yang disebabkan oleh peningkatan massa termal susu. Setelah kondisi *steady state* tercapai, suhu berfluktuasi kecil di sekitar *setpoint* 64°C dengan suhu rata-rata sebesar 63,9°C. *Steady-state error* yang dihasilkan relatif kecil dan masih dalam batas toleransi pasteurisasi. Hal ini membuktikan bahwa sistem fuzzy logic tetap mampu menjaga kestabilan suhu secara konsisten meskipun terjadi perubahan volume susu yang signifikan.

4.5.2 Pengujian Fuzzy Logic

Pengujian *fuzzy logic* yang dihasilkan oleh alat memiliki tujuan untuk melihat hasil yang berjalan. Berikut data yang telah diambil:

Tabel 4.10 Pengujian Perbandingan

No.	Kondisi Sistem	Level Susu (%)	Suhu (°C)	PWM Output (%)	Keterangan Output	Keterangan Sistem
1	Suhu Panas, Level Susu Dangkal	33	65	0	Level 0	Daya Heater dimatikan agar suhu tidak melebihi <i>set point</i>
2	Suhu Hangat, Level Susu Dangkal	33	62	60	Level 2	Daya Heater sedang karena volume sedikit agar suhu bisa mendekati <i>set point</i>
3	Suhu Normal, Level Susu Sedang	60	40	77	Level 3	Daya Heater maksimum agar suhu bisa mendekati <i>set point</i>
4	Suhu Hangat, Level Susu Penuh	100	63	39	Level 1	Daya Heater dikurangi agar tidak melewati <i>set point</i>
5	Suhu Panas, Level Susu Penuh	100	64.06	0	Level 0	Daya Heater dimatikan karena suhu sudah mencapai <i>set point</i>

6	Suhu Panas, Level Susu Penuh, dan Suhu stabil selama 30 menit	100	64.06	0	Level 0	Daya dimatikan karena proses pasteurisasi LTLT sudah selesai	Heater
---	---	-----	-------	---	---------	--	--------

Berdasarkan Tabel 4.10 dan pengamatan pada sistem, dapat disimpulkan bahwa implementasi *fuzzy logic* pada alat pasteurisasi susu berjalan secara konsisten dan sesuai dengan rancangan logika yang telah dibuat. Setiap perubahan kondisi suhu dan level susu menghasilkan respons sistem berupa pengaturan daya pemanas (PWM) yang sesuai dengan aturan *fuzzy*. Misalnya, saat suhu sudah tinggi dan volume susu sedikit, sistem secara otomatis mematikan pemanas. Sebaliknya, saat volume susu penuh dan suhu masih hangat, sistem memberikan *output* daya tinggi untuk mempercepat proses pemanasan.

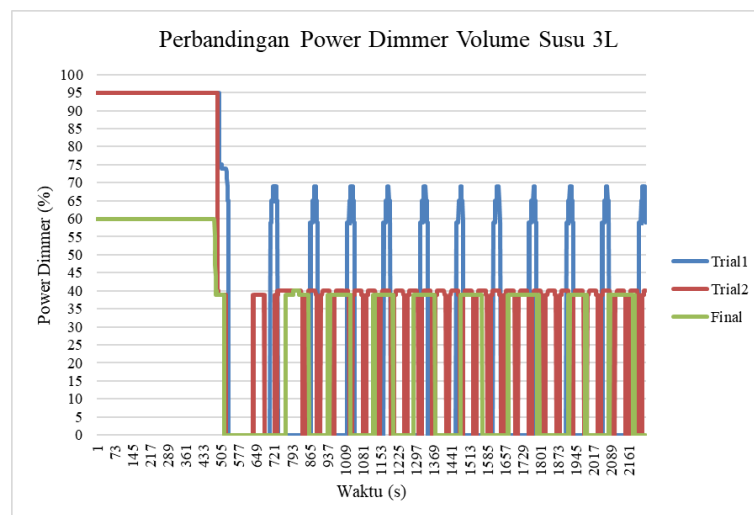
Sistem juga menunjukkan kemampuan adaptif dalam menjaga suhu tetap stabil. Setelah suhu mencapai 64°C dan dipertahankan selama 30 menit, pemanas dimatikan secara otomatis. Jika suhu menurun setelahnya, sistem kembali mengaktifkan pemanas untuk mempertahankan suhu ideal proses pasteurisasi LTLT. Hal ini membuktikan bahwa *fuzzy logic* yang diterapkan dapat mengatur daya pemanas secara real time dan efisien berdasarkan kondisi suhu dan level cairan di dalam tangki.

4.5.3 Perbandingan Output Fuzzy Logic

Pengujian terhadap output fuzzy dilakukan untuk memastikan bahwa sistem fuzzy logic yang diterapkan berfungsi sesuai dengan rancangan. Pengujian ini dilakukan dengan membandingkan nilai output hasil perhitungan teori menggunakan rumus defuzzifikasi (nilai Z) dengan data hasil aktual yang diperoleh dari sistem saat pengujian. Perbandingan ini bertujuan untuk mengevaluasi sejauh mana kesesuaian antara logika fuzzy yang dirancang dan perilaku sistem di lapangan, serta untuk menilai akurasi dan stabilitas kendali fuzzy dalam menghasilkan output yang diharapkan.

1. Perbandingan Output Fuzzy Logic Volume 3 Liter

Pengujian pada volume susu sebesar 3 liter dilakukan untuk mengevaluasi performa sistem pengendalian suhu berbasis logika fuzzy dalam menjaga kestabilan pemanasan yang mewakili kondisi dangkal. Selain memantau parameter suhu, grafik *dimPower* (nilai daya yang diberikan ke pemanas) juga dianalisis untuk melihat pola kerja sistem dalam menyesuaikan outputnya terhadap kondisi suhu aktual. Melalui Gambar 4. 5 berikut, dapat diamati bagaimana perubahan nilai output fuzzy (*dimPower*) berperan dalam mempertahankan suhu mendekati nilai target secara efisien dan stabil selama proses pasteurisasi berlangsung.



Gambar 4. 5 Grafik *Power Dimmer* Volume 3L

Berdasarkan grafik *Power Dimmer* untuk volume susu 3 liter, terlihat adanya perbedaan pola pemberian daya pemanas (*dimPower*) antara *Trial1*, *Trial2*, dan *Final*. Pada *Trial1*, nilai *dimPower* awalnya tinggi dan kemudian menunjukkan fluktuasi besar yang tajam, dengan rata-rata sebesar 31,65%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem masih belum stabil, dan kontrol fuzzy belum mampu menyesuaikan daya pemanas secara efisien. Pada *Trial2*, sistem terlihat lebih responsif terhadap suhu dengan mengurangi daya lebih cepat, ditunjukkan dengan penurunan tajam dari nilai awal 100% ke sekitar 40%. Namun, fluktuasi *dimPower* tetap terjadi secara periodik, dengan rata-rata lebih tinggi yaitu 42,75%, yang

mengindikasikan bahwa sistem memberikan energi lebih banyak untuk menjaga suhu tetap mendekati target. Sementara itu, pada percobaan *Final*, pola dimPower menjadi jauh lebih tenang dan konsisten, dengan nilai rata-rata paling rendah yaitu 26,19%. Grafik menunjukkan bahwa setelah mencapai suhu target, sistem memberikan daya yang relatif konstan dengan sedikit perubahan, menandakan bahwa fuzzy logic telah dioptimalkan dengan baik. Hasil ini sejalan dengan grafik suhu *Final* sebelumnya yang menunjukkan kestabilan terbaik, tanpa *overshoot* besar maupun fluktuasi yang mencolok. Dengan demikian, percobaan *Final* tidak hanya menunjukkan kestabilan suhu yang lebih presisi, tetapi juga efisiensi dalam penggunaan daya pemanas, menjadikannya sebagai hasil terbaik dari seluruh proses trial and error.

Jika suhu susu adalah 30°C dengan level susu adalah 40%. Berikut cara menghitung dengan logika fuzzy untuk mengetahui *output crisp* yang dihasilkan. Berdasarkan kondisi tersebut, maka *rule* fuzzy yang aktif adalah aturan ke-14, yaitu jika suhu **Dingin** dan level **Dangkal**, maka output adalah **Level 2**. Level 2 memiliki fungsi keanggotaan tringular [50 60 70]. Sehingga dengan metode centroid, nilai crisp output dapat dihitung menggunakan rumus 2.8 sebagai berikut.

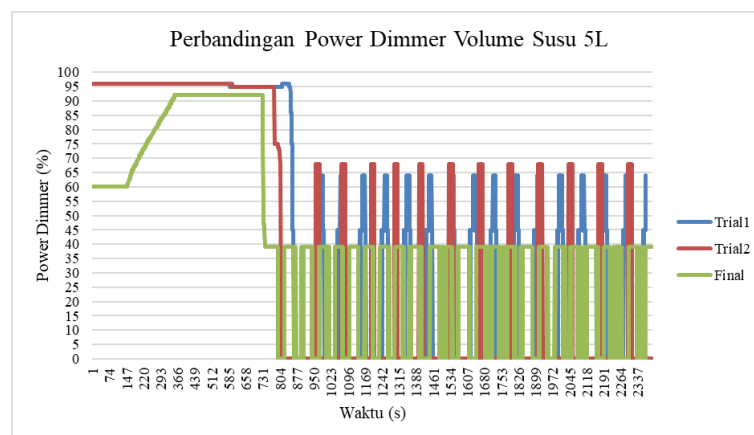
$$Z = \frac{50 + 60 + 70}{3} = \frac{180}{3} = 60$$

Hasil perhitungan tersebut digunakan untuk membuktikan bahwa proses *defuzzifikasi* secara teoritis menghasilkan output yang sama dengan data hasil percobaan pada Lampiran 1 yang telah dilakukan.

2. Perbandingan Output *Fuzzy Logic* Volume 5 Liter

Pengujian pada volume susu sebesar 5 liter dilakukan untuk mengevaluasi performa sistem pengendalian suhu berbasis logika fuzzy dalam menjaga kestabilan pemanasan yang mewakili kondisi sedang. Selain memantau parameter suhu, grafik dimPower (nilai daya yang diberikan ke pemanas) juga dianalisis untuk melihat pola kerja sistem dalam menyesuaikan outputnya terhadap kondisi suhu aktual. Melalui

Gambar 4. 6 berikut, dapat diamati bagaimana perubahan nilai output fuzzy (dimPower) berperan dalam mempertahankan suhu mendekati nilai target secara efisien dan stabil selama proses pasteurisasi berlangsung.



Gambar 4. 6 Grafik *Power Dimmer* Volume 5L

Berdasarkan grafik *Power Dimmer* untuk volume susu 5 liter, terlihat adanya perbedaan pola pemberian daya pemanas (dimPower) antara *Trial1*, *Trial2*, dan *Final*. Pada *Trial1*, nilai dimPower awalnya tinggi dan kemudian menunjukkan fluktuasi besar yang tajam, dengan rata-rata sebesar 44,31%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem masih belum stabil, dan kontrol fuzzy belum mampu menyesuaikan daya pemanas secara efisien. Pada *Trial2*, sistem terlihat lebih responsif terhadap suhu dengan mengurangi daya lebih cepat. Namun, fluktuasi dimPower tetap terjadi secara periodik, dengan rata-rata lebih tinggi yaitu 37,19%. Sementara itu, pada percobaan *Final*, pola dimPower menjadi jauh lebih tenang dan konsisten walaupun secara rata-rata sedikit di atas *Trial2* yaitu sebesar 40,71%. Grafik menunjukkan bahwa setelah mencapai suhu target, sistem memberikan daya yang relatif konstan dengan sedikit perubahan, menandakan bahwa fuzzy logic telah dioptimalkan dengan baik. Hasil ini sejalan dengan grafik suhu *Final* sebelumnya yang menunjukkan kestabilan terbaik, tanpa *overshoot* besar maupun fluktuasi yang mencolok. Dengan demikian, percobaan *Final* menunjukkan kestabilan suhu yang lebih presisi dengan penggunaan daya yang tepat menjadikannya sebagai hasil terbaik dari seluruh proses trial and error.

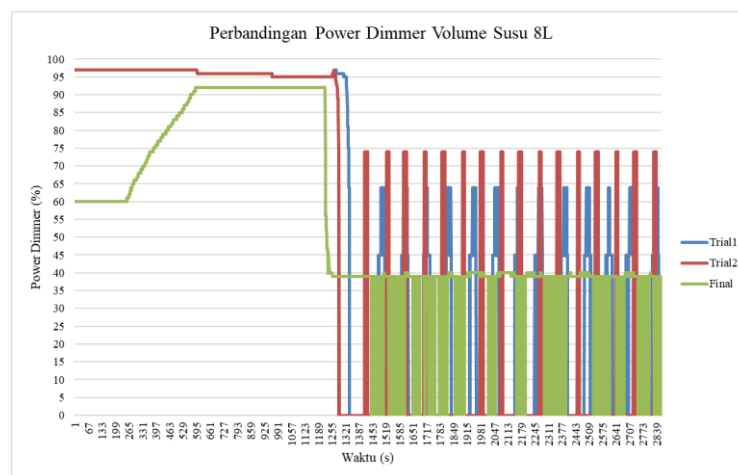
Jika suhu susu adalah 50°C dengan level susu adalah 60%, berikut cara menghitung dengan logika fuzzy untuk mengetahui output *crisp* yang dihasilkan, Berdasarkan input suhu 50°C dan level susu 60%, rule fuzzy yang aktif adalah aturan ke-11, yaitu jika suhu **Normal** dan level **Sedang**, maka output adalah **Level 3**. Level 3 memiliki fungsi keanggotaan trapezoid [85 90 95 100], Sehingga dengan metode centroid, nilai crisp output dapat dihitung menggunakan rumus 2.7 sebagai berikut.

$$Z = \frac{85 + 180 + 190 + 100}{6} = \frac{555}{6} = 92.5$$

Hasil perhitungan tersebut digunakan untuk membuktikan bahwa proses *defuzzifikasi* secara teoritis menghasilkan output yang sama dengan data hasil percobaan pada Lampiran 1 yang telah dilakukan.

3. Perbandingan Output *Fuzzy Logic* Volume 8 Liter

Pengujian pada volume susu sebesar 8 liter dilakukan untuk mengevaluasi performa sistem pengendalian suhu berbasis logika fuzzy dalam menjaga kestabilan pemanasan yang mewakili kondisi penuh. Selain memantau parameter suhu, grafik *dimPower* (nilai daya yang diberikan ke pemanas) juga dianalisis untuk melihat pola kerja sistem dalam menyesuaikan outputnya terhadap kondisi suhu aktual. Melalui Gambar 4. 7 berikut, dapat diamati bagaimana perubahan nilai output fuzzy (*dimPower*) berperan dalam mempertahankan suhu mendekati nilai target secara efisien dan stabil selama proses pasteurisasi berlangsung.



Gambar 4. 7 Grafik *Power Dimmer* Volume 8L

Berdasarkan grafik *Power Dimmer* untuk volume susu 8 liter, terlihat adanya perbedaan pola pemberian daya pemanas (*dimPower*) antara *Trial1*, *Trial2*, dan *Final*. Pada *Trial1*, nilai *dimPower* awalnya tinggi dan kemudian menunjukkan fluktuasi besar yang tajam, dengan rata-rata sebesar 52,25%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem masih belum stabil, dan kontrol fuzzy belum mampu menyesuaikan daya pemanas secara efisien. Pada *Trial2*, sistem terlihat lebih responsif terhadap suhu dengan mengurangi daya lebih cepat. Namun, fluktuasi *dimPower* tetap terjadi secara periodik, dengan rata-rata lebih tinggi yaitu 48,09%. Sementara itu, pada percobaan *Final*, pola *dimPower* menjadi jauh lebih tenang dan konsisten walaupun secara rata-rata sedikit di atas *Trial2* yaitu sebesar 53,42%. Hal ini menandakan bahwa sistem secara aktif mengendalikan suhu agar sesuai dengan *set point* yang diberikan, sistem memberikan daya yang relatif konstan dengan sedikit perubahan. Hasil ini sejalan dengan grafik suhu *Final* sebelumnya yang menunjukkan kestabilan terbaik, tanpa *overshoot* besar maupun fluktuasi yang mencolok. Dengan demikian, percobaan *Final* menunjukkan kestabilan suhu yang lebih presisi dengan penggunaan daya yang tepat menjadikannya sebagai hasil terbaik dari seluruh proses trial and error.

Jika suhu susu adalah 30°C dengan level susu adalah 100%, berikut cara menghitung dengan logika fuzzy untuk mengetahui output *crisp* yang

dihasilkan, Berdasarkan input suhu 30°C dan level susu 100%, rule fuzzy yang aktif adalah aturan ke-16, yaitu jika suhu **Dingin** dan level **Penuh**, maka output adalah **Level 2**. Level 2 memiliki fungsi keanggotaan tringular [50 60 60 70]. Sehingga dengan metode centroid, nilai crisp output dapat dihitung menggunakan rumus 2.8 sebagai berikut.

$$Z = \frac{50 + 60 + 70}{3} = \frac{180}{3} = 60$$

Hasil perhitungan tersebut digunakan untuk membuktikan bahwa proses *defuzzifikasi* secara teoritis menghasilkan output yang sama dengan data hasil percobaan pada Lampiran 1 yang telah dilakukan.

4.5.4 Pengujian Perbandingan Metode *Fuzzy logic* Dibanding dengan Metode On-Off

Berdasarkan hasil data pada Lampiran 3 (data suhu dengan *Fuzzy logic*) dan Lampiran 4 (data suhu tanpa *Fuzzy logic*), dilakukan pengolahan data yang kemudian disajikan dalam Tabel 4. 12, Tabel 4. 13, dan Tabel 4. 14. Tabel tersebut memperlihatkan perbandingan statistik suhu antara sistem pengendalian dengan dan tanpa penerapan logika fuzzy.

Tabel 4. 11 Pengujian Perbandingan Volume 3 liter

Parameter	Dengan <i>Fuzzy logic</i>	On-Off
Rata rata suhu (°C)	64.1	65.67
Set point suhu (°C)	64	64
Overshoot (%)	1.56	9.17
Standar deviasi	0.26	1.66
Rata Rata PWM Dimmer	23.81	27.58

Dari hasil Tabel 4. 11, sistem pengendalian suhu dengan *fuzzy logic* menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan tanpa *fuzzy logic*. Suhu rata-rata yang dihasilkan lebih mendekati target yaitu 64,10°C, dibandingkan dengan 65,67°C pada sistem tanpa fuzzy. Selain itu, dengan *set point* suhu 64°C, *overshoot* pada sistem dengan fuzzy hanya mencapai 1,56%, jauh lebih rendah dibanding 9,17%. Stabilitas suhu juga terlihat jauh lebih baik pada sistem fuzzy

dengan standar deviasi hanya 0,26, sedangkan tanpa fuzzy mencapai 1,66. Ini menunjukkan bahwa suhu pada sistem non-fuzzy cenderung berfluktuasi tinggi dan kurang stabil. Selain itu, Rata-rata PWM yang lebih rendah pada sistem fuzzy menunjukkan bahwa *fuzzy logic* mampu memberikan kontrol pemanasan yang lebih efisien.

Tabel 4. 12 Pengujian Perbandingan Volume 5 liter

Parameter	Dengan <i>Fuzzy logic</i>	On-Off
Rata-rata suhu (°C)	64.07	64.28
Set point suhu (°C)	64	64
Overshoot (%)	0.297	1.56
Standar Deviasi	0.09	0.45
Rata-rata PWM Dimmer	37.89	35.99

Dari hasil Tabel 4. 12, suhu rata-rata sistem fuzzy adalah 64,07°C yang sangat dekat dengan target, sedangkan tanpa fuzzy mencapai 64,28°C. Selain itu, dengan *set point* suhu 64°C, *overshoot* pada sistem fuzzy hanya 0,297%, sedangkan tanpa fuzzy naik hingga 1,56%. Standar deviasi pada sistem fuzzy jauh lebih rendah yaitu 0,09 dibandingkan 0,45, yang kembali menegaskan bahwa suhu lebih stabil dengan *fuzzy logic*. Selain itu, nilai rata-rata PWM dimmer pada fuzzy sedikit lebih tinggi, menandakan sistem secara aktif menyesuaikan pemanasan agar suhu tetap stabil.

Tabel 4. 13 Pengujian Perbandingan Volume 8 liter

Parameter	Dengan <i>Fuzzy logic</i>	On-Off
Rata-rata suhu (°C)	64.03	64.15
Set point suhu (°C)	64	64
Overshoot (%)	0.19	1.27
Standar Deviasi	0.12	0.39
Rata-rata PWM Dimmer	50.15	52.54

Selanjutnya, dari hasil Tabel 4. 13, hasilnya tetap konsisten. Sistem dengan *fuzzy logic* mampu menjaga suhu rata-rata sebesar 64,03°C, lebih tepat dibandingkan 64,15°C tanpa fuzzy. Selain itu, dengan *set point* suhu 64°C,

overshoot juga lebih rendah, yaitu 0,19% dibandingkan 1,27%. Standar deviasi pada sistem fuzzy adalah 0,12, jauh lebih kecil dari sistem tanpa fuzzy yang mencapai 0,39. Rata-rata PWM yang lebih rendah pada sistem fuzzy menunjukkan bahwa *fuzzy logic* mampu memberikan kontrol pemanasan yang lebih efisien terhadap beban volume yang besar.

Berdasarkan hasil dari ketiga pengujian tersebut dapat disimpulkan bahwa penggunaan *fuzzy logic* dalam pengendalian suhu memberikan hasil yang lebih akurat, stabil, dan konsisten untuk berbagai volume. Sistem fuzzy mampu menjaga suhu mendekati target 64°C dengan *overshoot* yang kecil dan fluktuasi suhu yang minim. Rata-rata PWM yang lebih tinggi juga menunjukkan bahwa sistem fuzzy secara aktif dan cerdas menyesuaikan daya pemanas agar sesuai dengan kondisi aktual. Dengan demikian, *fuzzy logic* terbukti lebih efektif dibandingkan metode konvensional on/off dalam proses pasteurisasi susu. Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa logika *fuzzy* berhasil diimplementasikan pada perangkat keras dan mampu mengontrol proses pemanasan susu dengan akurat dan stabil, tanpa memerlukan kalibrasi ulang secara manual dalam setiap perubahan kondisi.

Berdasarkan ketiga pengujian tersebut juga menunjukkan bahwa waktu proses pasteurisasi yang dibutuhkan seluruhnya tidak ada yang melebihi waktu yang dicapai oleh referensi [3] yang menggunakan metode PID, yaitu 2 jam 56 menit 51 detik. Meskipun pada percobaan menggunakan PID tidak dicantumkan secara spesifik volume susu yang digunakan, hasil ini tetap menunjukkan bahwa metode fuzzy mampu menyesuaikan waktu pemanasan secara lebih efisien terhadap perubahan volume susu. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan logika fuzzy memberikan kinerja yang lebih efisien dalam hal waktu proses dibandingkan dengan metode PID, tanpa mengorbankan kestabilan suhu pasteurisasi yang diinginkan.