

BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISA ALAT

5.1 Pengujian Alat dan Analisa Alat

Pada bab ini membahas mengenai pengujian dari sistem pendingin panel surya berbasis logika fuzzy dengan ESP32 yang telah dirancang dan dirangkai pada bab sebelumnya. Pengujian ini dilakukan untuk memastikan seluruh komponen dan sistem yang dibuat dapat bekerja sesuai dengan fungsi pada perancangan yang telah dibuat. Selain itu, pengujian ini dilakukan untuk melihat sistem efektif dalam menurunkan suhu panel surya dan kemampuannya dalam menjalankan proses pendinginan menggunakan logika fuzzy.

Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian terhadap komponen-komponen penting pada sistem, meliputi sensor suhu DS18B20, sensor intensitas cahaya BH1750, sensor *water flow* YF-S201, pengujian metode kontrol logika fuzzy untuk mengatur output pompa air, serta pengiriman data monitoring ke *Google Spreadsheet*. Hasil dari setiap pengujian selanjutnya akan dianalisis untuk melihat keberhasilan sistem dan efektivitas dalam proses pendinginan panel surya.

Hasil yang diperoleh dari setiap pengujian selanjutnya dianalisis untuk mengetahui tingkat kinerja dan keberhasilan sistem pendingin panel surya yang telah dirancang. Melalui analisis tersebut diharapkan dapat diketahui apakah sistem telah bekerja sesuai dengan fungsi dan tujuan dari sistem yang dirancang.

5.1.1 Pengujian dan Analisa Sensor Suhu DS18B20

Pengujian sensor suhu DS18B20 bertujuan untuk mengetahui tingkat akurasi, ketelitian, dan kestabilan sensor dalam mengukur suhu permukaan panel surya. Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa sensor mampu memberikan hasil pengukuran yang mendekati nilai sebenarnya sehingga layak digunakan sebagai masukan (*input*) pada sistem logika fuzzy dalam menentukan volume air pendinginan panel surya. Selain itu, pengujian juga bertujuan untuk mengetahui perbedaan hasil pengukuran antara sensor DS18B20 dengan alat ukur acuan sehingga dapat diperoleh nilai *error* sensor.

Sebelum dilakukan pengujian pembandingan terhadap alat ukur acuan, terlebih dahulu dilakukan pengamatan terhadap hasil pembacaan masing-masing sensor DS18B20 untuk mengetahui tingkat kesesuaian pengukuran antara sensor 1 dan sensor 2. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa kedua sensor memberikan hasil pembacaan yang relatif seragam ketika ditempatkan pada kondisi pengukuran yang sama. Hasil pengujian ditunjukkan pada tabel 5.1.

Tabel 5.1 Pengukuran Pada Sensor DS18B20

No	Pengukuran Sensor 1	Pengukuran Sensor 2	Rata-Rata Pengukuran Sensor 1 dan Sensor 2	Dokumentasi
1.	39.56°C	39.06°C	39.31°C	Sensor 0 : 39.56 C Sensor 1 : 39.06 C Rata-rata Suhu : 39.31 C
2.	40.44°C	40.06°C	40.25°C	Sensor 0 : 40.44 C Sensor 1 : 40.06 C Rata-rata Suhu : 40.25 C
3.	41.44°C	41.25°C	41.34°C	Sensor 0 : 41.44 C Sensor 1 : 41.25 C Rata-rata Suhu : 41.34 C
4.	42.44°C	42.06°C	42.25°C	Sensor 0 : 42.44 C Sensor 1 : 42.06 C Rata-rata Suhu : 42.25 C
5.	43.69°C	43.44°C	43.56°C	Sensor 0 : 43.69 C Sensor 1 : 43.44 C Rata-rata Suhu : 43.56 C
6.	43.81°C	43.69°C	43.75°C	Sensor 0 : 43.81 C Sensor 1 : 43.69 C Rata-rata Suhu : 43.75 C
7.	44.56°C	44.44°C	44.50°C	Sensor 0 : 44.56 C Sensor 1 : 44.44 C Rata-rata Suhu : 44.50 C
8.	45.44°C	45.31°C	45.38°C	Sensor 0 : 45.44 C Sensor 1 : 45.31 C Rata-rata Suhu : 45.38 C
9.	46.50°C	46.44°C	46.47°C	Sensor 0 : 46.50 C Sensor 1 : 46.44 C Rata-rata Suhu : 46.47 C
10.	47.25°C	47.38°C	47.31°C	Sensor 0 : 47.25 C Sensor 1 : 47.38 C Rata-rata Suhu : 47.31 C

Selanjutnya yaitu pengujian sensor terhadap alat ukur acuan dimana prosedur pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil rata-rata pembacaan dua buah sensor suhu DS18B20 terhadap alat ukur acuan berupa termometer digital. Kedua sensor dipasang pada bagian belakang panel surya sesuai dengan posisi

pemasangan pada sistem yang telah dirancang, sedangkan pengukuran menggunakan termometer digital dilakukan pada lokasi yang berdekatan dengan sensor agar mendapatkan nilai pengukuran dengan kondisi suhu yang sama. Pengujian dilaksanakan pada beberapa kondisi suhu panel yang berbeda, mulai dari kondisi suhu rendah pada pagi hari hingga suhu tinggi ketika panel menerima paparan sinar matahari secara langsung pada siang hari. Pada setiap kondisi pengujian, sistem dinyalakan dan sensor melakukan pembacaan suhu secara otomatis dimana nilai dari pembacaan tersebut dapat dilihat pada serial LCD. Nilai yang muncul pada LCD merupakan hasil rata-rata dari pembacaan dua sensor suhu pada panel surya. Selanjutnya nilai suhu yang terbaca pada kedua sensor DS18B20 dan termometer digital dicatat secara bersamaan. Nilai sensor DS18B20 yang muncul pada LCD dibandingkan dengan hasil pengukuran alat ukur acuan untuk memperoleh nilai *error* sensor. Seluruh data hasil pengujian dicatat dan dianalisis untuk mengetahui performa sensor dalam mengukur suhu permukaan panel surya serta mengevaluasi kelayakannya sebagai masukan pada sistem logika fuzzy.

Perhitungan tingkat kesalahan (*error*) sensor dilakukan menggunakan persamaan 5.1.

$$Error(\%) = \frac{|T_{sensor} - T_{alat\ ukur}|}{T_{alat\ ukur}} \times 100\% \quad (5.1)$$

Tabel 5.2 Hasil Pengujian Sensor DS18B20

No	Suhu Alat Ukur	Suhu Sensor	Selisih	Error (%)	Dokumentasi
1.	35.3°C	35.8°C	0.5	1.41%	
2.	36°C	36.5°C	0.5	1.38%	

No	Suhu Alat Ukur	Suhu Sensor	Selisih	Error (%)	Dokumentasi
3.	37.4°C	37.8°C	0.4	1.06%	
4.	37.7°C	38.1°C	0.4	1.06%	

Tabel 5.2 merupakan hasil pengujian dari sensor suhu DS18B20 dimana sensor mampu memberikan hasil pengukuran yang sangat mendekati nilai yang ditunjukkan oleh alat ukur acuan. Pengujian dilakukan pada beberapa variasi suhu, yaitu mulai dari 35°C hingga 38°C. Dari hasil tersebut diperoleh selisih pengukuran berkisar antara 0,4°C hingga 0,5 °C, dengan nilai persentase *error* sebesar 1,06% hingga 1,41%.

Nilai persentase *error* yang didapat masih tergolong kecil sehingga menunjukkan bahwa sensor DS18B20 memiliki tingkat akurasi yang baik dalam mengukur suhu permukaan panel surya karena mengingat spesifikasi DS18B20 memang menyatakan akurasi $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ pada rentang kerja umum, maka hasil pengujian yang mendekati nilai tersebut menunjukkan bahwa sensor bekerja sesuai karakteristik dasarnya. Dengan demikian, sensor DS18B20 dapat dinyatakan memiliki performa yang baik dan layak digunakan sebagai masukan (*input*) pada sistem logika fuzzy untuk menentukan volume air pendinginan panel surya.

5.1.2 Pengujian dan Analisa Sensor Intensitas Cahaya BH1750

Pengujian sensor intensitas cahaya BH1750 bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sensor dalam mengukur intensitas cahaya yang diterima oleh panel surya. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan sensor dalam menghasilkan data pengukuran yang akurat dan konsisten sehingga dapat digunakan sebagai variabel masukan pada sistem logika fuzzy. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap alat ukur acuan berupa lux meter

untuk mengetahui tingkat kesesuaian hasil pengukuran. Berdasarkan hasil perbandingan tersebut, dapat dihitung nilai *error* sensor sebagai dasar untuk mengevaluasi kelayakan sensor BH1750 sebagai masukan sistem logika fuzzy pada proses pengendalian pendinginan panel surya.

Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor BH1750 terhadap alat ukur acuan berupa lux meter. Sensor BH1750 dan lux meter ditempatkan berdampingan pada posisi yang sama dengan arah menghadap sumber cahaya yang identik, sehingga keduanya menerima intensitas cahaya yang sama selama proses pengujian. Pengujian dilaksanakan pada beberapa kondisi intensitas cahaya yang berbeda, mulai dari kondisi cahaya rendah hingga kondisi penyinaran matahari yang tinggi pada siang hari. Pada setiap kondisi pengujian, nilai intensitas cahaya yang terbaca oleh sensor BH1750 dan lux meter dicatat secara bersamaan setelah pembacaan keduanya stabil. Selanjutnya, hasil pengukuran sensor BH1750 dibandingkan dengan hasil pengukuran alat ukur acuan untuk menghitung nilai *error* sensor. Seluruh data hasil pengujian kemudian dianalisis untuk mengevaluasi performa sensor BH1750 dalam mengukur intensitas cahaya sebagai masukan sistem logika fuzzy pada proses pengendalian pendinginan panel surya.

Perhitungan tingkat kesalahan (*error*) sensor dilakukan menggunakan persamaan 5.2.

$$Error(\%) = \frac{|Lux_{sensor} - Lux_{alat\ ukur}|}{Lux_{alat\ ukur}} \times 100\% \quad (5.2)$$

Tabel 5.3 Hasil Pengujian Sensor Intensitas Cahaya BH1750

No	Lux Alat Ukur	Lux Sensor	Selisih	Error (%)	Dokumentasi
1.	15540 lux	14835 lux	705 lux	4.53%	 
2.	19450 lux	18470 lux	980 lux	5.03%	 
3.	25300 lux	24179 lux	1121 lux	4.43 %	 

No	Lux Alat Ukur	Lux Sensor	Selisih	Error (%)	Dokumentasi
4.	30700 lux	29217 lux	1483 lux	4.83%	

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada tabel 5.3, sensor intensitas cahaya BH1750 mampu menghasilkan nilai pengukuran yang sangat mendekati hasil pengukuran alat ukur acuan. Pengujian dilakukan pada beberapa variasi intensitas cahaya, mulai dari 15000 lux hingga 30700 lux, untuk mengetahui kemampuan sensor dalam mengukur intensitas cahaya pada kondisi pencahayaan rendah hingga tinggi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa selisih pembacaan antara sensor BH1750 dan alat ukur acuan berada pada rentang 705 lux hingga 1483 lux, dengan persentase *error* sebesar 4,43% hingga 5,03%.

Nilai selisih pada pengukuran intensitas cahaya yang tinggi terlihat lebih besar, persentase *error* yang dihasilkan tetap rendah karena dibandingkan dengan nilai intensitas cahaya yang juga besar. Hal ini menunjukkan bahwa sensor BH1750 memiliki kemampuan yang baik dalam mempertahankan akurasi pengukuran pada berbagai kondisi intensitas cahaya. Dengan demikian, sensor BH1750 dapat dinyatakan bekerja dengan baik dan layak digunakan sebagai masukan (input) pada sistem logika fuzzy dalam menentukan volume air pendinginan panel surya berdasarkan kondisi intensitas cahaya yang diterima.

5.1.3 Pengujian dan Analisa Sensor *Water Flow* YF-S201

Pengujian sensor debit air YF-S201 dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sensor dalam mengukur volume air yang dialirkan oleh pompa pada sistem pendinginan panel surya. Sensor ini digunakan sebagai alat monitoring untuk

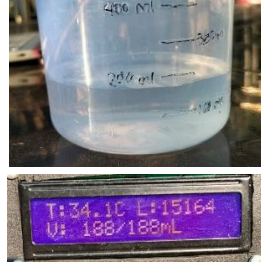
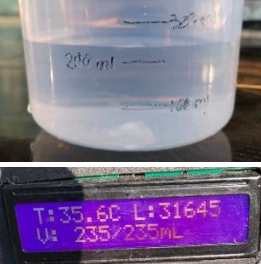
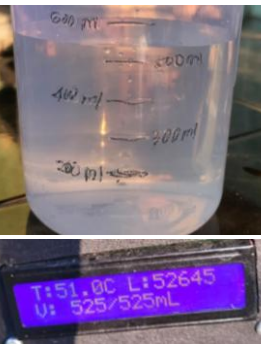
mengetahui jumlah volume air yang keluar dari pompa selama proses pendinginan berlangsung. Hasil pengukuran sensor kemudian dibandingkan dengan volume target yang dihasilkan dari perhitungan logika fuzzy, sehingga dapat diketahui kesesuaian antara volume air yang direncanakan oleh sistem dengan volume air yang benar-benar dialirkan oleh pompa. Oleh karena itu, pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat ketelitian sensor YF-S201 dalam mengukur volume air yang mengalir. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor YF-S201 terhadap volume air yang diukur menggunakan gelas ukur sebagai alat ukur acuan. Berdasarkan hasil perbandingan tersebut, dihitung nilai *error* yang kemudian digunakan untuk mengevaluasi kemampuan sensor dalam mengukur volume air secara akurat, sehingga volume air yang tercatat oleh sistem dapat merepresentasikan volume air aktual yang dikeluarkan oleh pompa.

Pengujian dilakukan dengan memasang sensor debit air YF-S201 pada saluran keluaran pompa sesuai dengan konfigurasi sistem yang telah dirancang. Air yang dipompa terlebih dahulu mengalir melewati sensor YF-S201 untuk diukur volume alirannya, kemudian dialirkan menuju panel surya melalui *nozzle*, dan selanjutnya ditampung menggunakan gelas ukur sebagai alat ukur acuan. Pengujian dilakukan pada beberapa variasi volume yang dialirkan oleh pompa air. Pada setiap pengujian, volume air yang terbaca oleh sensor YF-S201 dicatat dan dibandingkan dengan volume air yang diukur menggunakan gelas ukur. Seluruh data hasil pengujian selanjutnya dianalisis dengan menghitung nilai *error*. Selain itu, hasil pengujian juga digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian antara volume yang dibaca oleh sensor YF-S201 dan volume air aktual yang dikeluarkan oleh pompa berdasarkan hasil pengukuran menggunakan gelas ukur.

Perhitungan tingkat kesalahan (*error*) sensor dilakukan menggunakan persamaan 5.3.

$$Error(\%) = \frac{|Volume_{sensor} - Volume_{alat\ ukur}|}{Volume_{alat\ ukur}} \times 100\% \quad (5.3)$$

Tabel 5.4 Hasil Pengujian Sensor *Water Flow* YF-S201

No	Volume Alat Ukur	Volume Terukur Sensor	Selisih	Error (%)	Dokumentasi
1.	180 mL	188 mL	8 mL	4.44%	
2.	230 mL	235 mL	5 mL	2.17%	
3.	345 mL	348 mL	3 mL	0.8%	
4.	520 mL	525 mL	5 mL	0.96%	

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada tabel 5.4, sensor *water flow* YF-S201 mampu mengukur volume air yang dialirkan oleh pompa dengan hasil yang mendekati volume yang diukur menggunakan gelas ukur sebagai alat

ukur acuan. Pengujian dilakukan pada empat variasi volume air untuk mengetahui tingkat ketelitian sensor dalam mengukur volume air yang mengalir pada sistem pendinginan panel surya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa selisih antara volume yang terbaca oleh sensor dengan volume hasil pengukuran menggunakan gelas ukur berada pada rentang 3 mL hingga 8 mL, dengan persentase *error* sebesar 0,8% hingga 4,44%.

Selisih volume pada setiap pengujian relatif hampir sama, persentase *error* cenderung menurun seiring bertambahnya volume air yang diukur. Hal ini disebabkan karena pengaruh selisih pengukuran menjadi lebih kecil dibandingkan dengan nilai volume total yang semakin besar. Pada datasheet, akurasi tipikal sensor ini sekitar $\pm 10\%$, berdasarkan hasil pengujian persentase *error* masih berada dibawah dari 10% sehingga hal ini menunjukkan bahwa sensor YF-S201 mampu memberikan informasi volume air yang cukup akurat.

5.1.4 Pengujian dan Analisa Logika Fuzzy

Pengujian dan analisa logika fuzzy dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem logika fuzzy Mamdani yang telah diimplementasikan pada mikrokontroler ESP32 dalam menentukan volume air pendinginan panel surya berdasarkan nilai masukan (*input*) berupa suhu permukaan panel surya dan intensitas cahaya. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa algoritma logika fuzzy yang diterapkan pada ESP32 telah sesuai dengan rancangan yang dibuat pada perangkat lunak MATLAB, serta mampu menghasilkan keputusan yang dapat direalisasikan oleh aktuator sesuai dengan kondisi pengoperasian sistem. Oleh karena itu, pengujian logika fuzzy dibagi menjadi dua tahapan, yaitu validasi hasil perhitungan logika fuzzy antara MATLAB dan ESP32 untuk memastikan kesesuaian implementasi algoritma, serta pengujian respon aktuator untuk mengevaluasi kemampuan pompa air dalam merealisasikan volume air hasil keluaran (*output*) logika fuzzy. Melalui kedua tahapan pengujian tersebut, dapat diketahui bahwa sistem logika fuzzy tidak hanya menghasilkan keluaran yang sesuai dengan hasil perancangan, tetapi juga mampu mengendalikan proses pendinginan panel surya secara bertahap dan adaptif sesuai dengan perubahan suhu permukaan panel surya dan intensitas cahaya.

5.1.4.1 Validasi Perhitungan Logika Fuzzy Pada MATLAB dan ESP32

Pengujian validasi perhitungan logika fuzzy dilakukan untuk memastikan bahwa implementasi algoritma logika fuzzy Mamdani pada mikrokontroler ESP32 telah sesuai dengan hasil perhitungan yang diperoleh menggunakan perangkat lunak MATLAB. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kesesuaian hasil keluaran (*output*) berupa volume air pendinginan yang dihasilkan oleh kedua platform ketika diberikan nilai masukan (*input*) yang sama, yaitu suhu panel surya dan intensitas cahaya. Dengan adanya pengujian ini, dapat dipastikan bahwa proses fuzzifikasi, evaluasi aturan (*rule evaluation*), hingga defuzzifikasi yang diimplementasikan pada ESP32 telah berjalan sesuai dengan rancangan sistem logika fuzzy yang dibuat pada MATLAB.

Pengujian dilakukan dengan memberikan beberapa kombinasi nilai suhu panel surya dan intensitas cahaya sebagai data masukan pada sistem logika fuzzy di MATLAB dan program yang diimplementasikan pada ESP32. Nilai keluaran berupa volume air pendinginan dari kedua platform kemudian dicatat dan dibandingkan untuk mengetahui tingkat kesesuaiannya. Hasil perbandingan tersebut dianalisis untuk memastikan bahwa logika fuzzy pada ESP32 mampu menghasilkan keputusan yang sama atau memiliki selisih yang sangat kecil dibandingkan dengan hasil perhitungan pada MATLAB. Dengan demikian, validasi ini menunjukkan bahwa algoritma logika fuzzy telah berhasil diimplementasikan dengan benar pada sistem yang dirancang.

Tabel 5.5 Validasi Perhitungan Logika Fuzzy

No	Suhu (°C)	Intensitas Cahaya (lux)	Volume Perhitungan MATLAB (mL)	Volume Perhitungan ESP32 (mL)	Dokumentasi
1.	33.5	10713	0	0	
2.	34.4	54612	229	229	
3.	35.4	54612	235	235	

No	Suhu (°C)	Intensitas Cahaya (lux)	Volume Perhitungan MATLAB (mL)	Volume Perhitungan ESP32 (mL)	Dokumentasi
4.	36.4	17352	235	235	
5.	37.2	54612	235	235	
6.	39.5	54612	462	462	
7.	40.0	18988	235	235	
8.	41.6	54612	525	525	
9.	43.4	54612	525	525	
10.	48.1	54612	525	525	

Berdasarkan hasil pengujian pada tabel 5.5, dapat diketahui bahwa hasil perhitungan logika fuzzy menggunakan MATLAB memiliki kesesuaian dengan hasil perhitungan yang diimplementasikan pada ESP32. Pada setiap kombinasi nilai suhu permukaan panel surya dan intensitas cahaya yang diuji, kedua platform menghasilkan nilai keluaran (output) berupa volume air pendinginan yang sama, seperti pada kondisi suhu 33,5°C dan intensitas cahaya 10.713 lux yang menghasilkan keluaran sebesar 0 mL, suhu 34,4°C dan intensitas cahaya 54.612 lux menghasilkan keluaran sebesar 229 mL, hingga suhu 48,1°C dan intensitas cahaya 54.612 lux menghasilkan keluaran sebesar 525 mL. Kesamaan hasil tersebut menunjukkan bahwa proses implementasi algoritma logika fuzzy Mamdani pada ESP32 telah sesuai dengan rancangan yang dibuat pada MATLAB. Dengan demikian, tidak terdapat perbedaan hasil perhitungan antara MATLAB dan ESP32

pada seluruh data pengujian, sehingga implementasi logika fuzzy pada ESP32 dapat dinyatakan telah tervalidasi dan mampu menghasilkan keluaran yang sesuai untuk digunakan sebagai pengendalian pompa air pada sistem pendinginan panel surya.

5.1.4.2 Pengujian Logika Fuzzy Pada Respon Aktuator

Pengujian logika fuzzy pada respon aktuator dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mengendalikan aktuator berupa pompa air berdasarkan hasil keluaran (*output*) perhitungan logika fuzzy. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah perubahan nilai masukan (*input*) berupa suhu permukaan panel surya dan intensitas cahaya dapat diproses dengan baik oleh sistem logika fuzzy sehingga menghasilkan volume air pendinginan yang sesuai untuk mengendalikan kerja pompa secara bertahap dan adaptif. Selain itu, pengujian ini juga bertujuan untuk memastikan bahwa pompa air mampu merespons setiap keputusan yang dihasilkan oleh logika fuzzy dengan mengalirkan air sesuai volume target yang telah ditentukan.

Pengujian dilakukan dengan memberikan beberapa variasi nilai suhu panel surya dan intensitas cahaya yang diperoleh dari hasil pembacaan sensor DS18B20 dan BH1750. Nilai kedua parameter tersebut kemudian diproses menggunakan metode logika fuzzy Mamdani untuk menghasilkan keluaran berupa volume target air pendinginan. Selanjutnya, sistem mengaktifkan pompa air melalui modul relay hingga volume air yang dialirkan mencapai nilai target. Selama proses tersebut, sensor *water flow* YF-S201 digunakan untuk memonitor volume air yang keluar dari pompa sehingga dapat diketahui kesesuaian antara volume target hasil perhitungan logika fuzzy dengan volume air aktual yang dialirkan. Hasil pengujian selanjutnya dianalisis dengan membandingkan hubungan antara parameter masukan, volume target yang dihasilkan berdasarkan perhitungan logika fuzzy, serta respon pompa air selama proses pendinginan. Analisis tersebut bertujuan untuk mengetahui apakah aktuator mampu bekerja sesuai dengan keputusan logika fuzzy, sehingga sistem dapat mengatur proses pendinginan panel surya secara bertahap sesuai dengan perubahan kondisi suhu dan intensitas cahaya.

Tabel 5.6 Hasil Pengujian Logika Fuzzy Pada Respon Aktuator

No	Suhu (°C)	Intensitas Cahaya (lux)	Volume Berdasarkan Perhitungan Logika Fuzzy (mL)	Volume Aktual (mL)	Kondisi Pompa Air
1.	33.44	12497.50	0.00	0.00	OFF
2.	34.13	11196.67	200.35	200.35	Menyala
3.	35.09	54612.50	235.36	235.36	Menyala
4.	40.53	21000.43	391.16	391.16	Menyala

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada tabel 5.6, logika fuzzy berhasil mengendalikan respon aktuator berupa pompa air berdasarkan kondisi suhu panel surya dan intensitas cahaya yang diterima sebagai masukan (*input*). Pengujian dilakukan pada beberapa variasi nilai suhu dan intensitas cahaya untuk mengetahui apakah keluaran (*output*) logika fuzzy berupa volume air mampu direalisasikan dengan baik oleh pompa air.

Pada pengujian pertama, suhu panel surya sebesar 33,44 °C dengan intensitas cahaya 12.497,50 lux menghasilkan volume air sebesar 0 mL, sehingga pompa berada pada kondisi OFF. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem bekerja sesuai dengan aturan logika fuzzy yang telah dirancang, yaitu pompa tidak diaktifkan ketika kondisi panel belum memerlukan proses pendinginan. Selanjutnya, pada pengujian kedua dengan suhu 34,13 °C dan intensitas cahaya 11.196,67 lux, sistem menghasilkan volume target sebesar 200,35 mL yang kemudian direalisasikan oleh pompa dengan volume aktual sebesar 200,35 mL, sehingga pompa berada pada kondisi menyala. Sementara itu, pada pengujian ketiga dengan intensitas cahaya 54.612,50 lux serta suhu masing-masing 35,09 °C, sistem menghasilkan volume target sebesar 235,36 mL dan volume aktual yang dialirkan pompa juga sebesar 235,36 mL. Pada pengujian keempat dengan intensitas cahaya 21000,43 lux serta suhu masing-masing 40,5°C, sistem menghasilkan volume target sebesar 391.16 mL dan volume aktual yang dialirkan pompa juga sebesar 391.16 mL. Kesesuaian antara volume target hasil perhitungan logika fuzzy dan volume aktual yang direalisasikan oleh pompa menunjukkan

bahwa aktuator mampu menjalankan perintah yang diberikan oleh sistem secara tepat.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa aktuator berupa pompa air mampu merespons setiap keputusan yang dihasilkan oleh logika fuzzy dengan baik. Perubahan kondisi masukan berupa suhu dan intensitas cahaya menghasilkan keputusan yang berbeda terhadap volume air pendinginan, yang selanjutnya direalisasikan oleh pompa sesuai volume target. Selain itu, kesesuaian antara volume hasil perhitungan logika fuzzy dan volume aktual menunjukkan bahwa mekanisme pengendalian pompa serta pemantauan volume menggunakan sensor *water flow* YF-S201 telah bekerja dengan baik. Dengan demikian, implementasi logika fuzzy pada sistem berhasil mengendalikan respon aktuator sesuai dengan kondisi operasi panel surya, sehingga tujuan penggunaan logika fuzzy sebagai metode pengendali proses pendinginan dapat tercapai.

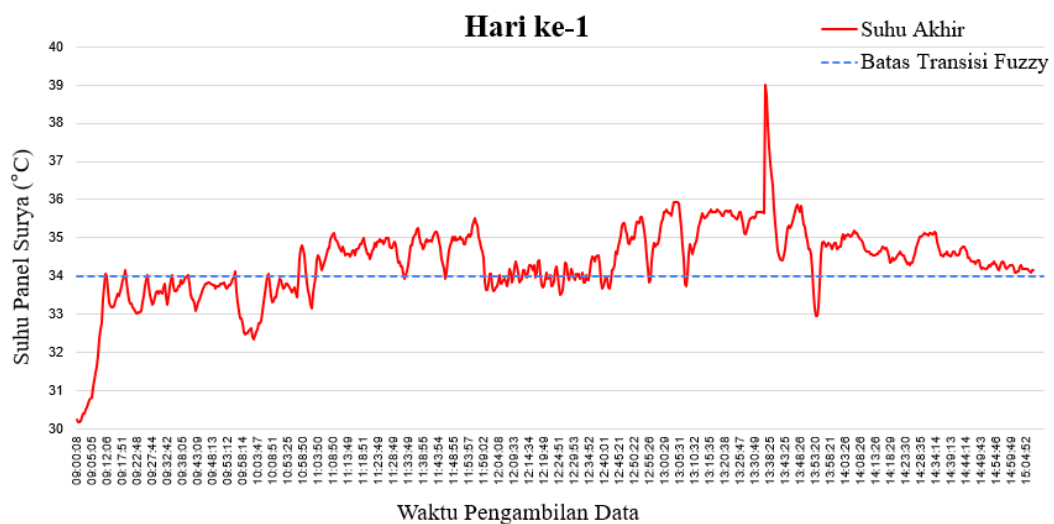
5.1.5 Pengujian dan Analisa Kinerja Pendinginan Panel Surya Menggunakan Logika Fuzzy

Pengujian kinerja pendinginan panel surya menggunakan logika fuzzy dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas sistem dalam menjaga suhu permukaan panel surya selama proses pengoperasian. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja pendinginan panel surya apakah mampu menjaga suhu agar tetap pada kondisi efektif sehingga dapat menjaga panel surya dapat menghasilkan listrik yang optimal. Evaluasi dilakukan dengan mengamati perubahan suhu permukaan panel surya selama sistem bekerja untuk mengetahui apakah terjadi penurunan suhu setelah proses pendinginan dilakukan. Hasil pengamatan tersebut digunakan untuk menilai kemampuan logika fuzzy dalam sistem pendinginan panel surya.

Pengujian dilakukan selama lima hari berturut-turut, mulai pukul 09.00 WIB hingga 15.00 WIB, dengan menempatkan panel surya pada area terbuka sehingga memperoleh paparan sinar matahari secara langsung. Pada pengujian ini, nilai suhu 34°C ditetapkan sebagai batas transisi antara kategori dingin dan normal pada fungsi keanggotaan logika fuzzy karena pada kategori dingin, sistem tidak

melakukan pendinginan karena keluaran aturan fuzzy berupa OFF. Sebaliknya, ketika suhu memasuki kategori normal, aturan fuzzy mulai menghasilkan target volume air sebagai keluaran sistem. Target volume tersebut digunakan oleh ESP32 untuk mengaktifkan relay dan pompa air, sehingga proses pendinginan dimulai sebelum suhu panel meningkat ke kategori yang lebih tinggi.

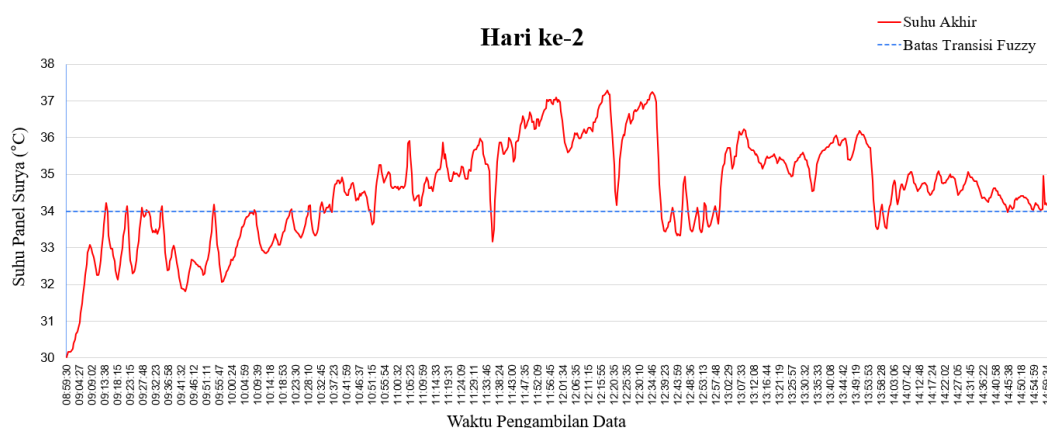
Sebelum pengujian dimulai, seluruh komponen sistem dipastikan berfungsi dengan baik, meliputi sensor suhu DS18B20, sensor intensitas cahaya BH1750, sensor *water flow* YF-S201, pompa air, serta sistem monitoring berbasis Google *Spreadsheet*. Selanjutnya sistem dioperasikan secara otomatis, dimana sensor DS18B20 dan BH1750 melakukan pembacaan suhu permukaan panel surya dan intensitas cahaya secara berkala. Data hasil pembacaan tersebut kemudian diproses oleh mikrokontroler ESP32 menggunakan metode logika fuzzy Mamdani untuk menentukan volume air pendinginan yang harus dialirkan oleh pompa.



Gambar 5.1 Hasil Pengujian Kinerja Pendinginan Pada Panel Surya Hari Ke-1

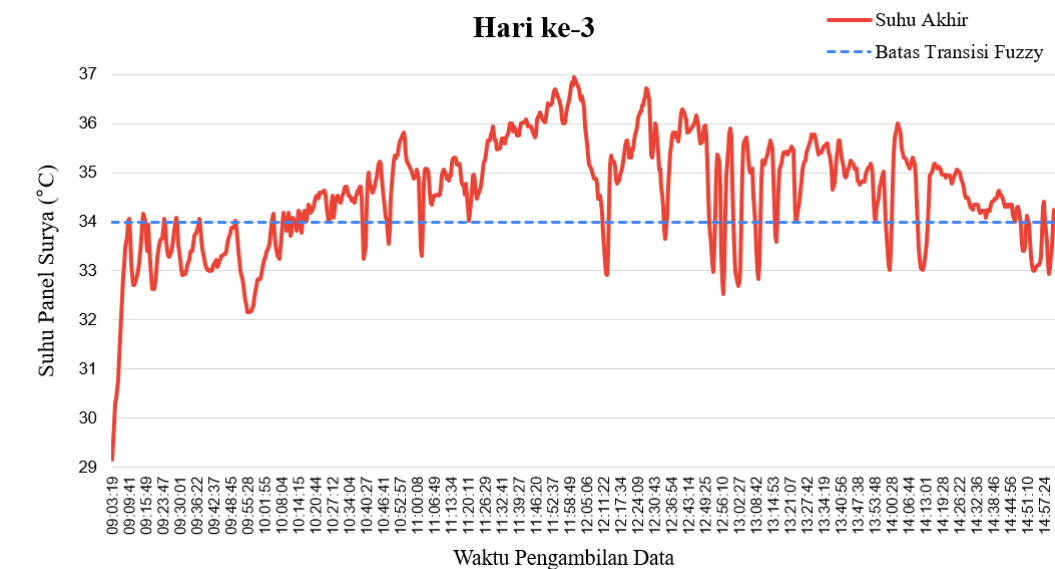
Berdasarkan gambar 5.1, hasil pengujian pada hari pertama menunjukkan bahwa suhu permukaan panel surya mengalami fluktuasi selama proses pengujian berlangsung. Kondisi tersebut dipengaruhi oleh perubahan intensitas penyinaran matahari karena cuaca pada saat pengujian cenderung cerah namun sesekali tertutup awan. Berdasarkan grafik terlihat bahwa setelah suhu melampaui 34°C, sistem mampu memberikan respons sehingga suhu panel kembali menurun dan berada di sekitar nilai ambang yang telah ditentukan. Pada rentang waktu 10.12 WIB hingga

10.52 WIB, proses pengujian sempat terhenti akibat terjadinya pemadaman listrik, sehingga tidak dilakukan proses monitoring maupun pendinginan selama interval waktu tersebut. Selain itu, pada sekitar pukul 13.40 WIB terlihat adanya lonjakan suhu hingga mencapai sekitar 39 °C, kondisi tersebut disebabkan oleh kabel sistem yang secara tidak sengaja terlepas sehingga pompa tidak dapat melakukan proses pendinginan. Setelah kabel dipasang kembali, sistem kembali beroperasi secara normal dan suhu panel berhasil diturunkan hingga mendekati set point.



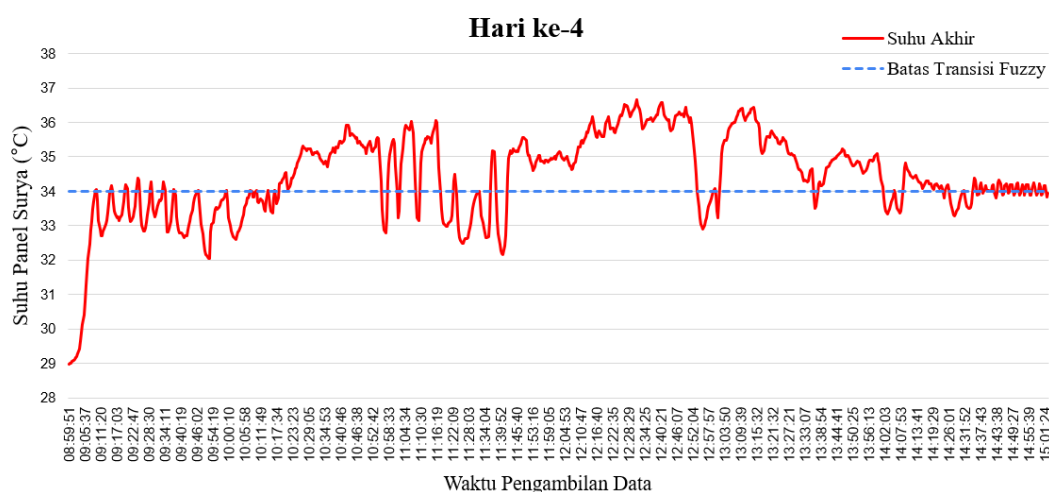
Gambar 5.2 Hasil Pengujian Kinerja Pendinginan Pada Panel Surya Hari Ke-2

Gambar 5.2 merupakan hasil pengujian pada hari kedua yang menunjukkan bahwa sistem pendinginan panel surya berbasis logika fuzzy mampu bekerja dengan baik tanpa mengalami kendala selama proses pengujian. Suhu permukaan panel surya mengalami fluktuasi akibat perubahan intensitas penyinaran matahari sepanjang waktu pengujian, dengan suhu beberapa kali berada di atas nilai 34°C. Ketika suhu melebihi nilai tersebut, sistem logika fuzzy secara otomatis mengaktifkan pompa air dan menentukan volume pendinginan sesuai dengan kondisi suhu dan intensitas cahaya yang terbaca oleh sensor. Berdasarkan grafik terlihat bahwa setelah proses pendinginan berlangsung, suhu panel kembali menurun sehingga menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan respons yang adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan.



Gambar 5.3 Hasil Pengujian Kinerja Pendinginan Pada Panel Surya Hari Ke-3

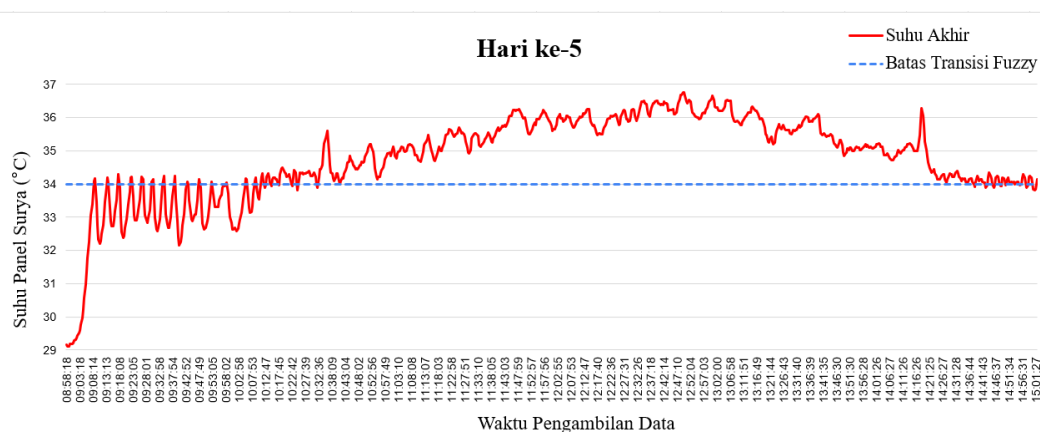
Hasil pengujian pada hari ketiga pada gambar 5.3 menunjukkan bahwa sistem pendinginan panel surya berbasis logika fuzzy mampu beroperasi secara stabil selama proses pengujian berlangsung. Fluktuasi suhu yang terlihat pada grafik menunjukkan respons sistem terhadap perubahan kondisi lingkungan, namun secara keseluruhan sistem mampu menjaga suhu panel tetap terkendali tanpa mengalami gangguan selama pengujian.



Gambar 5.4 Hasil Pengujian Kinerja Pendinginan Pada Panel Surya Hari Ke-4

Berdasarkan gambar 5.4, hasil pengujian pada hari keempat menunjukkan bahwa sistem pendinginan panel surya berbasis logika fuzzy dapat bekerja dengan

baik selama proses pengujian berlangsung. Selama pengujian hari keempat tidak ditemukan kendala pada perangkat keras maupun perangkat lunak, sehingga seluruh komponen sistem dapat bekerja secara terintegrasi sesuai dengan perancangan yang telah dibuat. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem memiliki kinerja yang baik dalam menjaga suhu panel surya agar tetap berada di sekitar nilai aktivasi pompa air selama kondisi operasi berlangsung.



Gambar 5.5 Hasil Pengujian Kinerja Pendinginan Pada Panel Surya Hari Ke-5

Gambar 5.5 merupakan hasil pengujian pada hari kelima yang menunjukkan bahwa sistem pendinginan panel surya berbasis logika fuzzy mampu bekerja secara konsisten selama proses pengujian berlangsung. Grafik menunjukkan bahwa meskipun suhu mengalami fluktuasi akibat perubahan kondisi lingkungan, sistem tetap mampu memberikan respons yang sesuai sehingga suhu panel dapat dipertahankan berada di sekitar nilai batas transisi fuzzy. Selama pengujian hari kelima tidak ditemukan kendala pada sistem, baik pada perangkat keras maupun perangkat lunak, sehingga seluruh proses monitoring, pengolahan logika fuzzy, dan pengendalian pompa air dapat berlangsung dengan baik sesuai dengan perancangan yang telah dibuat.

Berdasarkan hasil pengujian selama lima hari, sistem pendinginan panel surya berbasis logika fuzzy mampu bekerja sesuai dengan perancangan yang telah dibuat. Sistem mengaktifkan pompa air secara otomatis ketika suhu panel melebihi nilai 34°C karena merupakan nilai batas transisi fuzzy, sedangkan pada suhu di bawah nilai tersebut pompa tidak bekerja. Selama pengujian, suhu panel surya cenderung

berfluktuasi pada kisaran 34–37°C. Fluktuasi tersebut terjadi karena panel surya beroperasi pada kondisi lingkungan nyata, sehingga intensitas penyinaran matahari dan kondisi cuaca terus berubah selama pengujian. Perubahan tersebut menyebabkan jumlah panas yang diterima panel surya juga berubah-ubah. Di sisi lain, metode logika fuzzy mengatur volume air pendinginan secara bertahap sesuai kombinasi suhu dan intensitas cahaya, sehingga pompa tidak selalu mengalirkan debit maksimum, melainkan hanya memberikan pendinginan sesuai kebutuhan. Akibatnya, suhu panel tidak dipertahankan pada satu nilai tetap, tetapi berada pada kisaran yang stabil di sekitar 34–37°C. Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu merespons perubahan kondisi lingkungan secara adaptif dan menjaga suhu panel surya tetap berada pada rentang kerja yang diinginkan.

Selain hasil pengujian yang diperoleh selama lima hari, evaluasi terhadap efektivitas sistem pendinginan juga dilakukan menggunakan kamera termal. Dokumentasi ini bertujuan untuk memberikan bukti visual mengenai perubahan distribusi suhu permukaan panel surya sebelum dan sesudah sebagai dampak dari proses pendinginan yang dikendalikan oleh logika fuzzy.



Gambar 5.6 Distribusi Suhu Sebelum Pendinginan

Berdasarkan gambar 5.6, kondisi panel surya sebelum proses pendinginan menunjukkan bahwa sebagian besar permukaan panel didominasi oleh warna yang merepresentasikan temperatur tinggi pada kamera termal. Hal ini mengindikasikan bahwa panel telah menyerap panas akibat paparan sinar matahari sehingga terjadi akumulasi panas pada permukaannya. Distribusi warna pada kamera termal juga menunjukkan bahwa panas tersebar hampir merata di seluruh permukaan panel, sehingga kondisi tersebut menjadi dasar bagi sistem pendinginan untuk melakukan proses pendinginan melalui penyemprotan air sesuai dengan keluaran logika fuzzy.



Gambar 5.7 Distribusi Suhu Setelah Pompa Berhenti

Gambar 5.7 menunjukkan kondisi permukaan panel surya sesaat setelah pompa berhenti bekerja. Berdasarkan hasil pengamatan menggunakan kamera termal, distribusi suhu pada permukaan panel belum sepenuhnya merata. Bagian tengah panel didominasi oleh warna biru keunguan yang menunjukkan area dengan temperatur relatif lebih rendah, sedangkan pada bagian tepi panel masih tampak warna ungu kemerahan yang menunjukkan temperatur relatif lebih tinggi. Perbedaan distribusi suhu tersebut dipengaruhi oleh penyebaran air pendingin yang lebih banyak mengenai bagian tengah panel dibandingkan bagian tepi, sehingga proses pelepasan panas pada bagian tengah berlangsung lebih efektif. Meskipun pompa telah berhenti bekerja, lapisan air yang masih berada pada permukaan panel

masih berperan dalam menyerap panas sehingga efek pendinginan masih berlangsung.



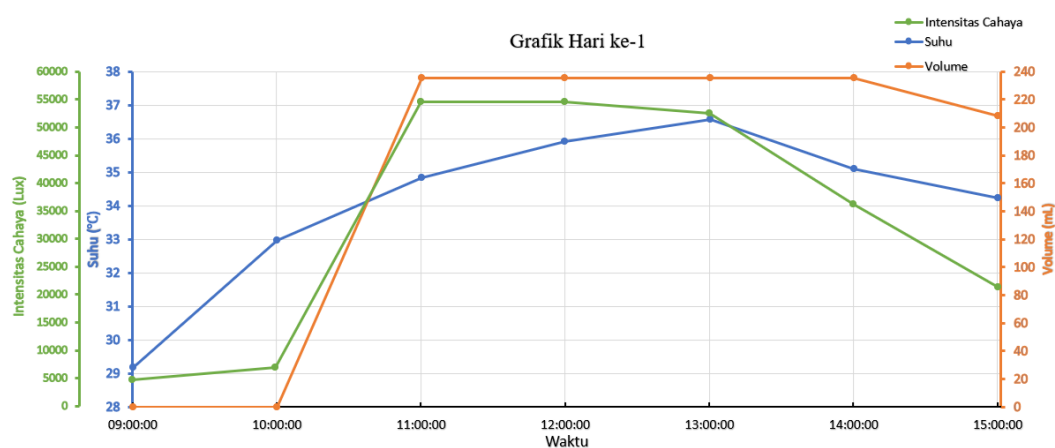
Gambar 5.8 Distribusi Suhu Setelah Air Menyerap

Gambar 5.8 memperlihatkan kondisi permukaan panel surya beberapa saat setelah pompa berhenti bekerja. Pada kondisi ini, sebagian besar air hasil penyemprotan telah terserap ke permukaan panel sehingga tidak lagi membentuk lapisan air yang tebal. Berdasarkan hasil pengamatan menggunakan kamera termal, distribusi suhu pada permukaan panel terlihat lebih merata yang ditunjukkan dengan dominasi warna biru keunguan pada hampir seluruh bagian panel. Meskipun masih terdapat beberapa area di bagian atas dan sisi panel yang menunjukkan warna berbeda, luas area tersebut relatif kecil dibandingkan dengan keseluruhan permukaan panel. Hal ini menunjukkan bahwa proses pendinginan yang dilakukan mampu menurunkan dan menyebarkan suhu permukaan panel secara lebih seragam. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa efek pendinginan masih tetap bertahan meskipun pompa telah berhenti bekerja dan air pada permukaan panel mulai berkurang.

5.1.6 Pengujian dan Analisa Antara Input Dan Output Sistem Berdasarkan Logika Fuzzy Mamdani

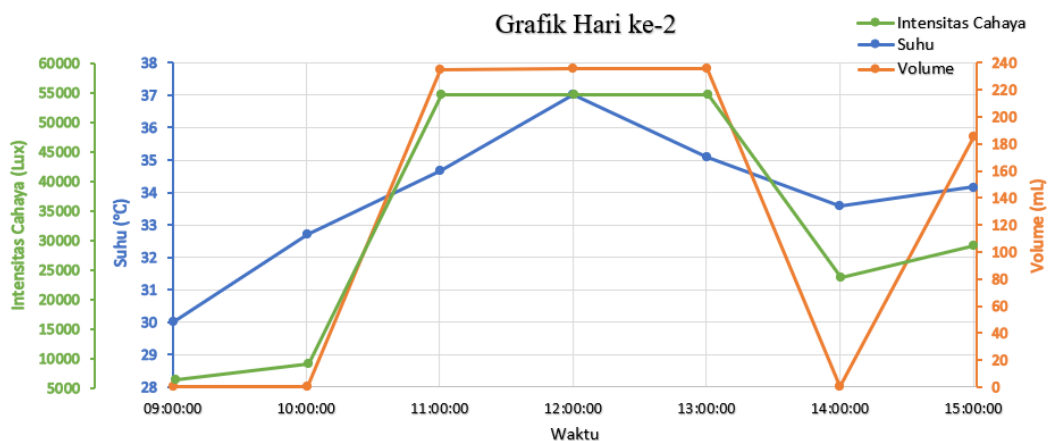
Pengujian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara parameter input berupa suhu panel surya dan intensitas cahaya terhadap output sistem berupa

volume air yang dihasilkan oleh logika fuzzy Mamdani. Selama proses pengujian, ESP32 mengirimkan data hasil pembacaan sensor ke *Google Spreadsheet* setiap 20 detik sebagai media monitoring secara real-time. Namun, karena jumlah data yang dihasilkan selama pengujian dari pukul 09.00 WIB hingga 15.00 WIB sangat banyak, maka pada subbab ini hanya ditampilkan cuplikan data setiap satu jam. Pengambilan data per jam dipilih agar grafik lebih mudah dibaca dan mampu merepresentasikan perubahan kondisi sistem selama waktu pengujian, tanpa mengurangi makna analisis hubungan antara input dan output logika fuzzy.



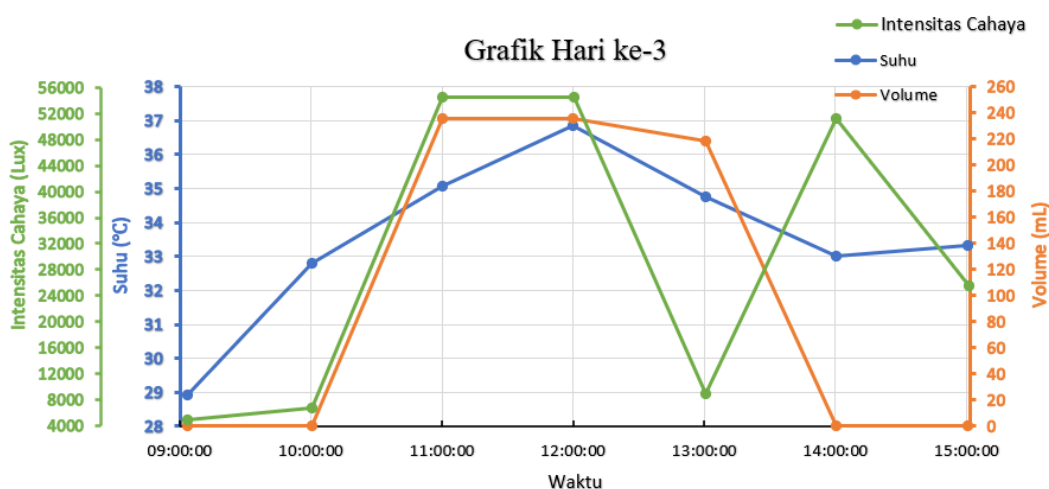
Gambar 5.9 Grafik Input dan Output Sistem Hari Pertama

Berdasarkan gambar 5.9 merupakan cuplikan data hasil pengujian pada hari pertama, sistem menunjukkan bahwa volume air yang dihasilkan mengikuti perubahan suhu panel surya dan intensitas cahaya. Pada pukul 09.00–10.00 WIB, suhu panel masih berada di bawah batas aktivasi sehingga volume air yang dihasilkan sebesar 0 mL. Memasuki pukul 11.00 WIB hingga 13.00 WIB, peningkatan suhu panel dan intensitas cahaya menyebabkan logika fuzzy menghasilkan volume air antara 185,29–235,36 mL. Selanjutnya pada pukul 14.00–15.00 WIB, ketika intensitas cahaya mulai menurun, volume air juga mengalami penurunan menjadi 218,5 mL, menunjukkan bahwa sistem mampu menyesuaikan kebutuhan pendinginan terhadap perubahan kondisi lingkungan.



Gambar 5.10 Grafik Input dan Output Sistem Hari Kedua

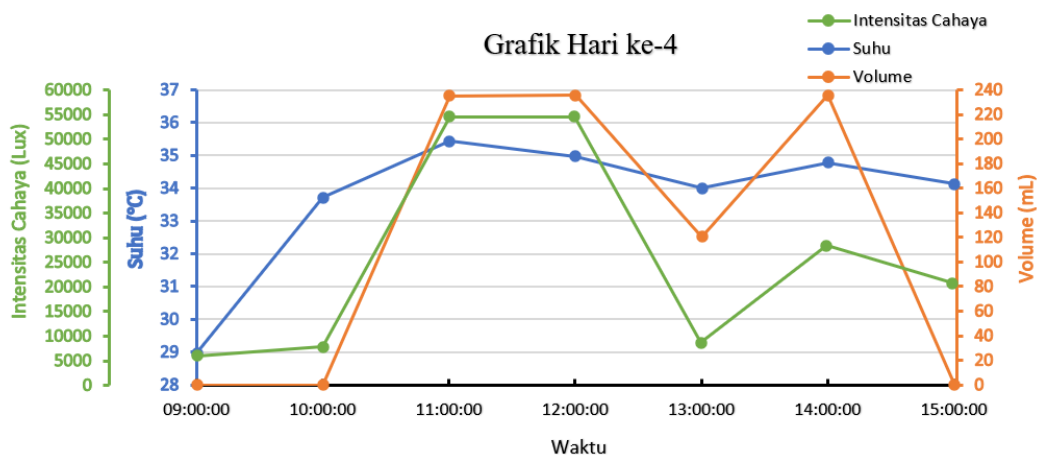
Berdasarkan gambar 5.10 merupakan cuplikan data hasil pengujian pada hari kedua, sistem kembali menghasilkan output yang mengikuti perubahan parameter input. Volume air masih 0 mL pada pukul 09.00–10.00 WIB karena suhu panel belum mencapai kondisi pendinginan. Saat suhu meningkat hingga $37,03^{\circ}\text{C}$ dengan intensitas cahaya tinggi pada pukul 11.00–13.00 WIB, sistem menghasilkan volume air maksimum sebesar 235,36 mL. Ketika suhu turun pada pukul 14.00 WIB, pompa kembali tidak bekerja, kemudian pada pukul 15.00 WIB volume air meningkat menjadi 185,29 mL akibat kombinasi suhu dan intensitas cahaya yang kembali mengaktifkan aturan fuzzy.



Gambar 5.11 Grafik Input dan Output Sistem Hari Ketiga

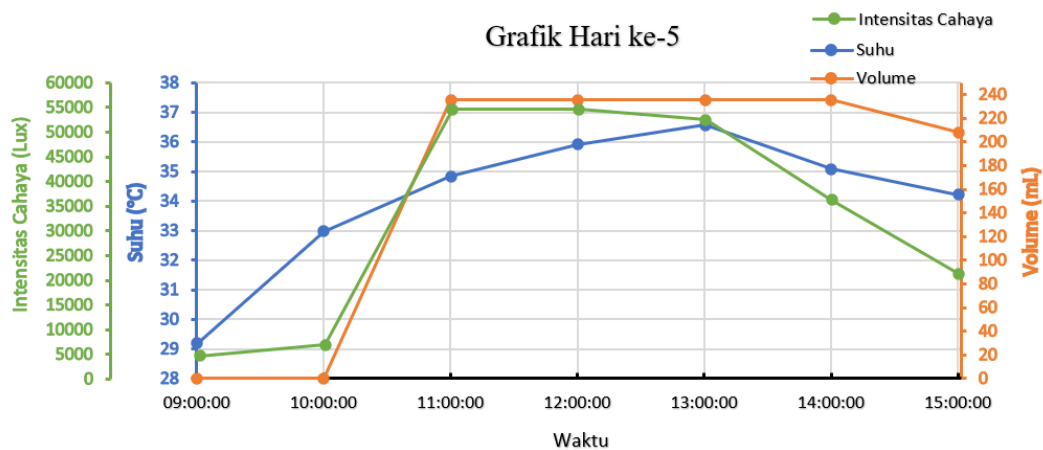
Berdasarkan gambar 5.11, cuplikan data hasil pengujian hari ketiga menunjukkan bahwa volume air meningkat ketika suhu panel dan intensitas cahaya

berada pada kondisi tinggi. Pada pukul 09.00–10.00 WIB sistem belum melakukan pendinginan karena suhu masih rendah. Volume air maksimum sebesar 235,36 mL diperoleh pada pukul 11.00–12.00 WIB, kemudian menurun menjadi 218,5 mL pada pukul 13.00 WIB akibat penurunan suhu dan intensitas cahaya. Pada pukul 14.00–15.00 WIB sistem tidak mengaktifkan pompa karena kondisi panel telah kembali berada pada rentang yang tidak memerlukan pendinginan.



Gambar 5.12 Grafik Input dan Output Sistem Hari Keempat

Berdasarkan gambar 5.12 merupakan cuplikan data hasil pengujian pada hari keempat, sistem menghasilkan respons yang lebih bervariasi. Pendinginan belum dilakukan pada pukul 09.00–10.00 WIB. Saat intensitas cahaya mencapai nilai maksimum pada pukul 11.00–12.00 WIB, volume air yang dihasilkan sebesar 235,48 mL. Ketika intensitas cahaya menurun pada pukul 13.00 WIB, volume air ikut berkurang menjadi 120,49 mL. Selanjutnya pada pukul 14.00 WIB volume air kembali meningkat menjadi 235,58 mL, kemudian turun menjadi 0 mL pada pukul 15.00 WIB karena kondisi input tidak lagi memenuhi aturan untuk melakukan pendinginan.



Gambar 5.13 Grafik Input dan Output Sistem Hari Kelima

Berdasarkan gambar 5.13 merupakan cuplikan data hasil pengujian pada hari kelima, pola kerja sistem relatif stabil dibandingkan hari-hari sebelumnya. Volume air masih 0 mL pada pukul 09.00–10.00 WIB, kemudian meningkat menjadi 235,63 mL pada pukul 11.00 WIB dan bertahan hingga pukul 14.00 WIB seiring suhu panel dan intensitas cahaya yang masih tinggi. Menjelang pukul 15.00 WIB, penurunan kedua parameter input menyebabkan volume air berkurang menjadi 208,16 mL, sehingga menunjukkan bahwa sistem tetap memberikan pendinginan secara bertahap sesuai kondisi panel surya.

Berdasarkan hasil pengujian selama lima hari, dapat diketahui bahwa sistem pendinginan berbasis logika fuzzy Mamdani mampu menghasilkan output volume air yang mengikuti perubahan suhu panel surya dan intensitas cahaya. Pada seluruh hari pengujian, sistem tidak mengaktifkan pompa ketika suhu panel masih berada di bawah batas aktivasi, sehingga volume air yang dihasilkan sebesar 0 mL. Sebaliknya, ketika suhu panel meningkat dan intensitas cahaya berada pada kondisi tinggi, sistem menghasilkan volume air antara 120,49 mL hingga 235,63 mL sesuai hasil inferensi fuzzy.

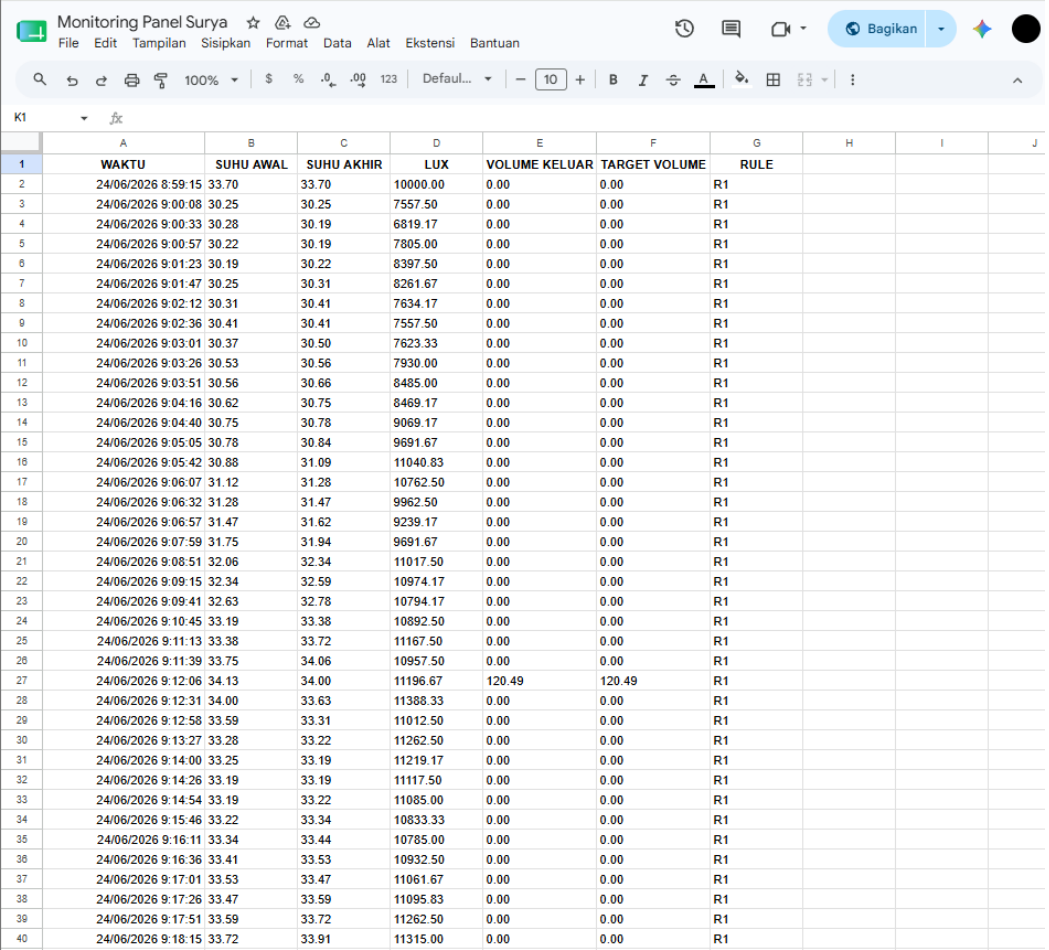
Secara umum, nilai volume air terbesar muncul pada rentang pukul 11.00–14.00 WIB, yaitu ketika suhu panel dan intensitas cahaya mencapai kondisi tertinggi selama pengujian. Setelah intensitas cahaya mulai menurun pada sore hari, volume air yang dihasilkan juga ikut berkurang atau bahkan kembali menjadi 0 mL apabila kondisi panel tidak lagi memerlukan pendinginan. Hasil tersebut

menunjukkan bahwa metode logika fuzzy Mamdani mampu memberikan keputusan pendinginan secara bertahap berdasarkan kombinasi kedua parameter input.

5.1.7 Pengujian dan Analisa Monitoring Pada Google *Spreadsheet*

Pengujian sistem monitoring menggunakan Google *Spreadsheet* dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mengirimkan dan menampilkan data hasil pembacaan sensor serta keluaran logika fuzzy secara *real-time*. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh parameter yang dihasilkan oleh sistem dapat dikirim dengan baik melalui jaringan internet menggunakan modul WiFi pada ESP32 dan tersimpan secara otomatis pada Google *Spreadsheet* sebagai media monitoring. Parameter yang dikirim meliputi suhu awal panel surya, suhu akhir panel surya, intensitas cahaya, volume target hasil logika fuzzy, volume air yang dialirkan pompa, serta *rule* logika fuzzy yang aktif selama proses pendinginan.

Pengujian dilakukan dengan mengoperasikan sistem pendinginan panel surya hingga seluruh sensor melakukan pembacaan data. ESP32 kemudian mengirimkan data berupa suhu awal, suhu akhir, intensitas cahaya, volume target hasil logika fuzzy, volume air yang dialirkan pompa, dan *rule* logika fuzzy yang aktif ke Google *Spreadsheet* melalui koneksi WiFi menggunakan Google Apps Script. Proses pengiriman dilakukan secara berkala setiap 20 detik sesuai dengan interval yang telah diprogram pada ESP32. Selanjutnya dilakukan analisis untuk memastikan bahwa seluruh parameter berhasil dikirim dan ditampilkan secara tepat, lengkap, dan berurutan tanpa mengalami kehilangan data, sehingga sistem monitoring berbasis Google *Spreadsheet* dapat berfungsi sebagai media pemantauan kondisi sistem secara *real-time* dan jarak jauh.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	WAKTU	SUHU AWAL	SUHU AKHIR	LUX	VOLUME KELUAR	TARGET VOLUME	RULE			
2	24/06/2026 8:59:15	33.70	33.70	10000.00	0.00	0.00	R1			
3	24/06/2026 9:00:08	30.25	30.25	7557.50	0.00	0.00	R1			
4	24/06/2026 9:00:33	30.28	30.19	6819.17	0.00	0.00	R1			
5	24/06/2026 9:00:57	30.22	30.19	7805.00	0.00	0.00	R1			
6	24/06/2026 9:01:23	30.19	30.22	8397.50	0.00	0.00	R1			
7	24/06/2026 9:01:47	30.25	30.31	8261.67	0.00	0.00	R1			
8	24/06/2026 9:02:12	30.31	30.41	7634.17	0.00	0.00	R1			
9	24/06/2026 9:02:36	30.41	30.41	7557.50	0.00	0.00	R1			
10	24/06/2026 9:03:01	30.37	30.50	7623.33	0.00	0.00	R1			
11	24/06/2026 9:03:26	30.53	30.56	7930.00	0.00	0.00	R1			
12	24/06/2026 9:03:51	30.56	30.66	8485.00	0.00	0.00	R1			
13	24/06/2026 9:04:16	30.62	30.75	8469.17	0.00	0.00	R1			
14	24/06/2026 9:04:40	30.75	30.78	9069.17	0.00	0.00	R1			
15	24/06/2026 9:05:05	30.78	30.84	9691.67	0.00	0.00	R1			
16	24/06/2026 9:05:42	30.88	31.09	11040.83	0.00	0.00	R1			
17	24/06/2026 9:06:07	31.12	31.28	10762.50	0.00	0.00	R1			
18	24/06/2026 9:06:32	31.28	31.47	9962.50	0.00	0.00	R1			
19	24/06/2026 9:06:57	31.47	31.62	9239.17	0.00	0.00	R1			
20	24/06/2026 9:07:59	31.75	31.94	9691.67	0.00	0.00	R1			
21	24/06/2026 9:08:51	32.06	32.34	11017.50	0.00	0.00	R1			
22	24/06/2026 9:09:15	32.34	32.59	10974.17	0.00	0.00	R1			
23	24/06/2026 9:09:41	32.63	32.78	10794.17	0.00	0.00	R1			
24	24/06/2026 9:10:45	33.19	33.38	10892.50	0.00	0.00	R1			
25	24/06/2026 9:11:13	33.38	33.72	11167.50	0.00	0.00	R1			
26	24/06/2026 9:11:39	33.75	34.06	10957.50	0.00	0.00	R1			
27	24/06/2026 9:12:06	34.13	34.00	11196.67	120.49	120.49	R1			
28	24/06/2026 9:12:31	34.00	33.63	11388.33	0.00	0.00	R1			
29	24/06/2026 9:12:58	33.59	33.31	11012.50	0.00	0.00	R1			
30	24/06/2026 9:13:27	33.28	33.22	11262.50	0.00	0.00	R1			
31	24/06/2026 9:14:00	33.25	33.19	11219.17	0.00	0.00	R1			
32	24/06/2026 9:14:26	33.19	33.19	11117.50	0.00	0.00	R1			
33	24/06/2026 9:14:54	33.19	33.22	11085.00	0.00	0.00	R1			
34	24/06/2026 9:15:46	33.22	33.34	10833.33	0.00	0.00	R1			
35	24/06/2026 9:16:11	33.34	33.44	10785.00	0.00	0.00	R1			
36	24/06/2026 9:16:36	33.41	33.53	10932.50	0.00	0.00	R1			
37	24/06/2026 9:17:01	33.53	33.47	11061.67	0.00	0.00	R1			
38	24/06/2026 9:17:26	33.47	33.59	11095.83	0.00	0.00	R1			
39	24/06/2026 9:17:51	33.59	33.72	11262.50	0.00	0.00	R1			
40	24/06/2026 9:18:15	33.72	33.91	11315.00	0.00	0.00	R1			

Gambar 5.14 Hasil Pengujian Monitoring Pada Google *Spreadsheet*

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada gambar 5.14, sistem monitoring berbasis Google *Spreadsheet* berhasil menerima dan menampilkan data yang dikirimkan oleh mikrokontroler ESP32 secara real-time melalui jaringan WiFi. Data yang dikirim meliputi waktu pengiriman, suhu awal, suhu akhir, intensitas cahaya, volume air yang keluar, volume target hasil logika fuzzy, serta aturan (*rule*) logika fuzzy yang aktif. Seluruh data berhasil tersimpan secara berurutan sesuai waktu pengambilan data, sehingga memudahkan proses pemantauan dan dokumentasi selama sistem beroperasi.

Berdasarkan hasil pengujian, proses pengiriman data dari ESP32 menuju Google *Spreadsheet* dapat berjalan dengan baik. Namun, pada beberapa kondisi masih ditemukan keterlambatan (*delay*) pengiriman data ke Google *Spreadsheet* sekitar 4-5 detik. Keterlambatan tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor, di

antaranya kualitas koneksi jaringan WiFi, proses transmisi data melalui jaringan internet, waktu pemrosesan permintaan (*request*) pada Google Apps Script, serta proses sinkronisasi data ke Google *Spreadsheet*. Selain itu, komunikasi data pada ESP32 menggunakan protokol HTTP yang bersifat berurutan (*sequential*), sehingga mikrokontroler harus menunggu proses pengiriman selesai sebelum menerima respons dari server. Meskipun demikian, keterlambatan tersebut tidak memengaruhi kinerja sistem pendinginan panel surya karena proses pembacaan sensor, perhitungan logika fuzzy, dan pengendalian pompa air seluruhnya dilakukan secara lokal pada mikrokontroler ESP32, sedangkan Google *Spreadsheet* hanya berfungsi sebagai media monitoring dan penyimpanan data. Dengan demikian, sistem monitoring berbasis Google *Spreadsheet* dapat dinyatakan bekerja dengan baik dalam mendokumentasikan kondisi sistem secara real-time, sehingga memudahkan proses pemantauan dan analisis hasil pengujian.

5.1.8 Pengujian dan Analisa Keseluruhan Sistem

Pengujian keseluruhan sistem dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem pendinginan panel surya berbasis logika fuzzy secara terintegrasi setelah seluruh komponen dirancang dan diuji secara individual. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa setiap komponen, meliputi sensor suhu DS18B20, sensor intensitas cahaya BH1750, sensor *water flow* YF-S201, pompa air, serta sistem monitoring berbasis Google *Spreadsheet*, dapat bekerja secara terpadu sesuai dengan fungsi yang telah dirancang. Selain itu, pengujian ini juga dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam melakukan pembacaan data sensor, memproses masukan menggunakan metode logika fuzzy Mamdani, mengendalikan pompa air sesuai hasil perhitungan, menampilkan informasi pada LCD, serta mengirimkan data hasil monitoring ke Google *Spreadsheet* secara otomatis.

Pengujian dilakukan dengan mengoperasikan sistem pada kondisi sebenarnya, yaitu panel surya ditempatkan di ruang terbuka selama 5 hari berturut-turut sehingga menerima penyinaran matahari secara langsung. Selama proses pengujian, sensor DS18B20 dan BH1750 secara berkala membaca suhu permukaan panel surya dan intensitas cahaya, kemudian data tersebut diproses oleh ESP32

menggunakan logika fuzzy untuk menentukan volume air pendinginan yang akan dialirkan oleh pompa. Sensor *water flow* YF-S201 digunakan untuk memonitor volume air yang keluar dari pompa, sedangkan *Google Spreadsheet* merekam seluruh data sebagai monitoring jarak jauh secara real-time.

Tabel 5.7 Hasil Pengujian Keseluruhan Sistem

No	Aspek Pengujian	Hasil	Keterangan
1.	Sensor DS18B20	Berhasil	Sensor dapat melakukan pengukuran suhu pada panel dengan baik dengan persentase <i>error</i> yang kecil dibandingkan dengan termometer digital.
2.	Sensor BH1750	Berhasil	Sensor dapat melakukan pengukuran intensitas cahaya dengan baik dengan nilai <i>error</i> yang kecil dibandingkan dengan lux meter.
3.	Sensor YF-S201	Berhasil	Sensor dapat melakukan pengukuran volume dengan baik dengan persentase <i>error</i> yang kecil dibandingkan dengan gelas ukur.
4.	Logika Fuzzy	Berhasil	Implementasi logika fuzzy Mamdani pada ESP32 telah sesuai dengan hasil perhitungan MATLAB dan mampu mengendalikan respon aktuator, sehingga volume air yang dihasilkan sesuai dengan hasil perhitungan logika fuzzy pada setiap kondisi masukan.
5.	Kinerja Pendinginan Panel Surya Menggunakan Logika Fuzzy	Berhasil	Pendinginan pada panel surya berhasil menjaga suhu panel surya yang berada pada kisaran nilai 34-37°C dan berdasarkan kamera termal penyebaran pendinginan merata.
6.	Input Dan Output Sistem Berdasarkan Logika Fuzzy Mamdani	Berhasil	Sistem pendinginan berbasis logika fuzzy Mamdani mampu menghasilkan volume air yang adaptif sesuai kombinasi suhu panel surya dan intensitas cahaya, sehingga keputusan pendinginan diberikan secara bertahap sesuai kebutuhan.

No	Aspek Pengujian	Hasil	Keterangan
7.	Monitoring Pada Google <i>Spreadsheet</i>	Berhasil	Sistem berhasil mengirimkan data ke Google <i>Spreadsheet</i> melalui jaringan WiFi walaupun terdapat keterlambatan 4-5 detik.

Berdasarkan hasil pengujian keseluruhan sistem pada tabel 5.7, dapat diketahui bahwa seluruh komponen sistem telah bekerja sesuai dengan fungsi dan perancangan yang telah dibuat. Sistem mampu melakukan pembacaan data sensor, memproses logika fuzzy, mengendalikan pompa air, serta mengirimkan data monitoring ke Google *Spreadsheet* secara otomatis. Hal ini menunjukkan bahwa sistem pendinginan panel surya berbasis logika fuzzy telah beroperasi secara terintegrasi dengan baik sehingga tujuan penelitian dapat tercapai.