

BAB 5. PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil implementasi, pengujian, dan pembahasan yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Logika Fuzzy Sugeno Tipe-0 berhasil dirancang dan diimplementasikan secara manual pada ESP32 untuk mengolah input suhu, pH, dan kekeruhan melalui tahapan fuzzifikasi, evaluasi 27 aturan, perhitungan firing strength, dan weighted average. Hasil perhitungan pada ESP32 sesuai dengan pembuktian matematis dan simulasi Python. Pada pengujian komputasi, Sugeno menghasilkan rata-rata waktu inferensi 9,391 μ s, lebih rendah dibandingkan Tsukamoto sebesar 17,871 μ s dan Mamdani sebesar 1.462,504 μ s. Penggunaan memori ketiga metode relatif setara. Hasil tersebut menunjukkan bahwa Sugeno Tipe-0 sesuai digunakan pada purwarupa karena menghasilkan keluaran crisp 0–100% yang dapat langsung digunakan sebagai dasar kendali aktuator.
2. Purwarupa mampu membaca parameter kualitas air dan menghasilkan respons aktuator sesuai kondisi yang diuji. Sensor DS18B20 menghasilkan rata-rata galat absolut sebesar 0,275°C terhadap termometer pembanding. Sensor pH digunakan setelah kalibrasi dua titik, sedangkan sensor turbidity menunjukkan penurunan tegangan dari 4,5912 V menjadi 4,1464 V ketika konsentrasi media pengganggu meningkat, dengan koefisien variasi pembacaan di bawah 0,12%. Nilai NTU sensor kekeruhan hanya diperlakukan sebagai estimasi relatif. Pada pengujian terintegrasi, heater mencapai 100% pada kondisi dingin, cooler mencapai 100% pada kondisi panas, serta filter mencapai 99–100% pada kondisi kekeruhan tinggi. Perbandingan melalui offline replay juga menunjukkan bahwa fuzzy menghasilkan keluaran bertahap, sedangkan kontrol ON/OFF hanya menghasilkan keluaran 0% atau 100%.
3. Dashboard web berhasil diimplementasikan untuk menampilkan data suhu, pH, kekeruhan, keluaran fuzzy, status aktuator, grafik, notifikasi, serta data historis. Data dari ESP32 dikirimkan melalui MQTT, diproses oleh backend Node.js, diteruskan melalui WebSocket, dan disimpan pada Supabase. Pengujian black-box terhadap tiga pengguna menghasilkan 63 dari 63 pelaksanaan skenario berhasil atau tingkat keberhasilan fungsional sebesar 100% pada mode Real-Time, Simulation, dan History. Dengan demikian, dashboard dapat digunakan untuk mendukung pemantauan purwarupa IoT secara real-time dan penelusuran data historis.

5.2. Saran

Berdasarkan keterbatasan penelitian, saran untuk pengembangan selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Kalibrasi sensor pH sebaiknya dilakukan menggunakan tiga larutan buffer, sedangkan sensor kekeruhan perlu dibandingkan dengan turbidity meter atau larutan standar NTU agar galat dan akurasi absolut dapat dihitung.
2. Purwarupa perlu dilengkapi mekanisme fail-safe, seperti validasi pembacaan sensor, batas waktu maksimum aktuator, interlock pompa drain dan fill, penghentian heater pada suhu berbahaya, serta emergency stop melalui dashboard. Perlindungan perangkat keras seperti thermal fuse dan thermostat independen juga dapat dipertimbangkan.
3. Pengujian perlu dilakukan dalam durasi beberapa hari atau minggu serta menggunakan akuarium dengan volume yang lebih besar untuk mengevaluasi kestabilan sensor, ketahanan aktuator, komunikasi MQTT, dan penyimpanan data dalam penggunaan jangka panjang.
4. Aktuator dan rangkaian penggerak dapat ditingkatkan menggunakan relay dengan rangkaian driver yang sesuai serta pompa yang memiliki rentang kendali PWM lebih luas. Pengujian konsumsi daya dan respons fisik air juga diperlukan untuk membandingkan fuzzy dan kontrol ON/OFF secara lebih menyeluruh.
5. Parameter pemantauan dapat diperluas dengan sensor oksigen terlarut, amonia, TDS, atau salinitas. Dashboard juga dapat dikembangkan dengan autentikasi pengguna, notifikasi jarak jauh, dan pengaturan batas kondisi air sesuai jenis ikan.