

Penerapan Algoritma PSO pada Sistem Fuzzy Tsukamoto untuk Optimasi Kontrol Suhu Paludarium Fire belly Newt Berbasis IoT

Cinta Ramayanti^{1*}, Henni Endah Wahanani²

^{1,2} Informatika, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur

²henniendah.if@upnjatim.ac.id

*Corresponding author email: 22081010002@student.upnjatim.ac.id

Abstrak— Penelitian ini mengembangkan sistem pengendalian suhu otomatis pada paludarium berbasis IoT untuk *Fire-Belly Newt* (*Cynops orientalis*) menggunakan metode *Fuzzy Tsukamoto* yang dioptimasi dengan *Particle Swarm Optimization* (PSO). Sistem memanfaatkan sensor DS18B20, mikrokontroler ESP32, dan modul pendingin Peltier untuk menjaga suhu air dalam rentang ideal 22–25 °C. Fuzzy Tsukamoto mengubah pembacaan suhu menjadi keluaran *crisp* (PWM), sedangkan PSO mengoptimasi parameter fungsi keanggotaan agar kontrol lebih presisi. Hasil pengujian menunjukkan kombinasi Fuzzy Tsukamoto dan PSO menghasilkan suhu lebih stabil dengan selisih 0,5–1 °C terhadap suhu aktual, lebih baik dibandingkan Fuzzy Tsukamoto biasa. Sistem juga menampilkan data real-time melalui aplikasi Blynk, mendukung pengendalian adaptif dan kesejahteraan hewan.

Kata Kunci— Fuzzy Tsukamoto, PSO, IoT, Paludarium, Pengendalian Suhu, Fire-Belly Newt.

I. PENDAHULUAN

Paludarium merupakan ekosistem buatan yang menggabungkan unsur darat dan air dalam satu wadah tertutup. Stabilitas suhu air menjadi faktor penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem serta kesehatan hewan semi-akuatik seperti Fire-Belly Newt (*Cynops orientalis*), yang membutuhkan suhu air ideal antara 22 °C hingga 25 °C [1]. Pengendalian suhu secara manual dinilai kurang efisien karena perubahan suhu lingkungan dapat menyebabkan fluktuasi yang sulit diprediksi [2].

Teknologi *Internet Of Things* (IoT) memungkinkan proses pemantauan dan pengendalian suhu dilakukan secara otomatis dan real-time. Sensor suhu dapat mengirimkan data langsung ke sistem kontrol dan aplikasi pengguna untuk melakukan penyesuaian suhu air dengan cepat dan efisien [3][4].

Metode Fuzzy Logic telah banyak digunakan dalam sistem kontrol karena mampu meniru cara pengambilan keputusan manusia berdasarkan aturan linguistik. Namun, penentuan parameter fungsi keanggotaan fuzzy sering kali bersifat subjektif dan bergantung pada pengalaman perancang, sehingga dapat menurunkan akurasi sistem [5]. Untuk mengatasi hal tersebut, algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) digunakan untuk mengoptimasi parameter fungsi keanggotaan agar sistem dapat beradaptasi secara dinamis terhadap

perubahan suhu lingkungan [6].

Dalam penelitian ini digunakan metode Fuzzy Tsukamoto, yang memiliki karakteristik menghasilkan output crisp dari setiap aturan fuzzy. Metode ini cocok untuk sistem kontrol suhu karena memberikan hasil keluaran yang halus dan stabil [7]. Integrasi antara metode Fuzzy Tsukamoto dan algoritma PSO diharapkan dapat meningkatkan akurasi serta kestabilan kontrol suhu air pada paludarium berbasis IoT.

II. KAJIAN TEORITIS

A. Paludarium dan Suhu Air

Paludarium merupakan miniatur ekosistem yang menggabungkan area darat dan air, umumnya digunakan untuk memelihara hewan semi-akuatik seperti Fire-Belly Newt. Kestabilan suhu air sangat krusial karena suhu yang terlalu tinggi atau terlalu rendah dapat menimbulkan stres termal serta mengganggu proses metabolisme hewan [8][9]. Oleh karena itu, sistem otomatis diperlukan untuk menjaga suhu air tetap dalam kisaran ideal antara 22–25 °C.

B. Fire Belly Newt

Fire-Belly Newt (*Cynops orientalis*) adalah spesies amfibi semi-akuatik asal Tiongkok yang hidup di perairan tenang dengan suhu stabil. Suhu ideal untuk aktivitas biologisnya berada pada rentang 20–25 °C. Ketidakseimbangan suhu dapat menyebabkan penurunan daya tahan tubuh serta meningkatkan risiko stres fisiologis [10][11].

C. Metode Fuzzy Type – 1

Logika fuzzy merupakan metode pengambilan keputusan yang meniru cara berpikir manusia berdasarkan nilai linguistik seperti “dingin”, “normal”, dan “panas” [12]. Pada Fuzzy Type-1, setiap variabel fuzzy memiliki fungsi keanggotaan dengan rentang nilai antara 0 hingga 1 [13]. Proses fuzzy terdiri atas tiga tahap utama: fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi. Dalam metode Fuzzy Tsukamoto, setiap aturan menghasilkan nilai crisp berdasarkan derajat keanggotaan yang digunakan, sehingga sistem mampu memberikan kontrol suhu yang lebih halus dan stabil.

D. Algoritma Particle Swarm Optimization (PSO)

Particle Swarm Optimization (PSO) adalah algoritma optimasi berbasis populasi yang terinspirasi dari perilaku sosial kawanan burung atau ikan [14]. PSO digunakan untuk mencari parameter optimal pada fungsi keanggotaan fuzzy agar sistem kontrol dapat memberikan hasil yang lebih akurat dan responsif terhadap perubahan suhu. Dalam penelitian ini, PSO berfungsi untuk menyesuaikan parameter fuzzy secara adaptif berdasarkan hasil pembacaan suhu dari sensor.

E. Internet Of Things (IoT)

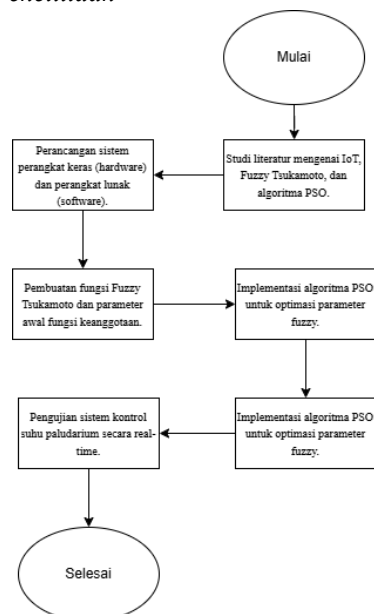
Internet Of Things (IoT) merupakan teknologi yang memungkinkan perangkat fisik seperti sensor dan mikrokontroler untuk saling terhubung dan berkomunikasi melalui jaringan internet. Dalam konteks penelitian ini, IoT berperan penting dalam mengirimkan data suhu dari sensor ke sistem kontrol serta menampilkan hasil pemantauan melalui aplikasi seperti Blynk secara real-time [15][16].

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Desain Penelitian

Penelitian ini merupakan eksperimen terapan yang bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem pengendalian suhu otomatis pada paludarium berbasis IoT. Sistem menggunakan metode Fuzzy Tsukamoto yang dioptimasi dengan algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) untuk meningkatkan akurasi pengendalian suhu air. Sistem dirancang menjaga suhu air paludarium pada 22–25 °C, rentang ideal bagi Fire-Belly Newt (*Cynops orientalis*) agar terhindar dari stres termal. Perangkat yang digunakan meliputi sensor DS18B20, mikrokontroler ESP32, modul pendingin Peltier TEC1-12706, serta Arduino IDE dan Blynk IoT untuk pemantauan suhu real-time melalui smartphone.

B. Alur Penelitian



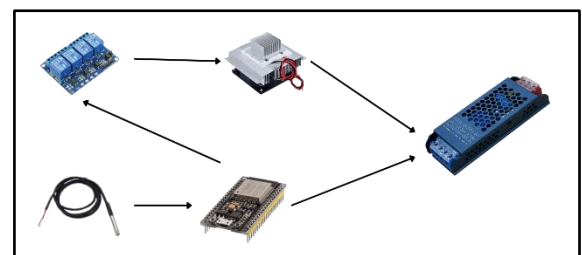
Gbr. 1 Diagram Alur Penelitian

C. Perancangan Sistem

Sistem pengendalian suhu ini bekerja secara otomatis berdasarkan pembacaan sensor suhu air. Data dari sensor DS18B20 dikirim ke mikrokontroler ESP32 dan diproses menggunakan metode Fuzzy Tsukamoto. Parameter fungsi keanggotaan fuzzy dioptimasi secara adaptif menggunakan algoritma PSO (Particle Swarm Optimization), sehingga sistem mampu memberikan keluaran yang lebih presisi terhadap variasi suhu lingkungan. Hasil keluaran dari proses fuzzy berupa nilai PWM (Pulse Width Modulation) yang digunakan untuk mengatur kinerja modul pendingin Peltier TEC1-12706. Ketika suhu air melebihi batas atas, sistem secara otomatis meningkatkan daya pendinginan, sedangkan ketika suhu turun di bawah ambang batas, sistem akan mengurangi atau menonaktifkan pendinginan. Selain itu, data suhu dan status sistem dikirimkan secara real-time ke aplikasi Blynk IoT melalui konektivitas Wi-Fi yang terintegrasi pada modul ESP32.

D. Perancangan Hardware

Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai komponen utama yang digunakan dalam penelitian ini, dilakukan perancangan perangkat keras (hardware) yang terdiri dari sensor suhu DS18B20, mikrokontroler ESP32, modul relay, dan modul pendingin Peltier. Setiap komponen memiliki peran penting dalam sistem pengendalian suhu: sensor DS18B20 berfungsi membaca suhu air, ESP32 sebagai pusat pengendali dan pemroses logika fuzzy, relay sebagai saklar elektronik untuk mengatur daya pada modul pendingin, serta Peltier yang berfungsi menurunkan suhu air. Perancangan ini bertujuan untuk memastikan seluruh komponen dapat berfungsi secara terintegrasi dan efisien dalam menjaga kestabilan suhu air pada paludarium Fire-Belly Newt. Gambar berikut menunjukkan komponen utama perangkat keras sistem pengendalian suhu berbasis IoT yang digunakan dalam penelitian ini.



Gbr. 2 Perancangan Hardware

E. Perancangan Software

Tahapan perancangan perangkat lunak (software) merupakan proses pengembangan logika dan algoritma yang digunakan untuk mengontrol suhu air paludarium secara otomatis berdasarkan data suhu yang terbaca dari sensor DS18B20. Pada tahap ini dilakukan pembuatan algoritma pengendalian menggunakan metode Fuzzy Tsukamoto yang dioptimasi dengan algoritma Particle Swarm Optimization (PSO), konfigurasi komunikasi antara ESP32 dan platform Blynk IoT, serta perancangan program untuk membaca data sensor, mengolah logika fuzzy, dan mengaktifkan sistem pendingin peltier sesuai kondisi suhu yang terdeteksi.

Selain itu, sistem dirancang agar mampu menampilkan informasi suhu secara real-time melalui dashboard aplikasi

Blynk pada smartphone, sehingga pengguna dapat memantau dan mengontrol sistem dari jarak jauh.

Tabel I
Tabel Perancangan Software

No	Proses	Respon Sistem	Kondisi/Hasil
1.	Konfigurasi Wi-Fi	ESP32 menghubungkan diri ke jaringan Wi-Fi lokal untuk komunikasi data IoT.	Sukses: Terhubung ke jaringan. Gagal: Reconnect otomatis.
2.	Koneksi ke Server Blynk IoT	Setelah Wi-Fi aktif, ESP32 menghubungkan diri ke server Blynk agar data bisa dipantau secara real-time.	Sukses: Koneksi aktif. Gagal: Reconnect otomatis.
3.	Pembacaan Sensor DS18B20	Sensor DS18B20 membaca suhu air paludarium dan mengirimkan data ke ESP32.	Sukses: Data suhu diterima. Gagal: Ulang pembacaan.
4.	Proses Fuzzifikasi (Fuzzy Tsukamoto)	Nilai suhu aktual diubah menjadi himpunan linguistik: - Dingin ($\leq 22^{\circ}\text{C}$) - Normal ($22-25^{\circ}\text{C}$) - Panas ($> 25^{\circ}\text{C}$).	Sistem menghasilkan derajat keanggotaan untuk setiap kondisi suhu.
5.	Inferensi & Defuzzifikasi (Fuzzy Tsukamoto)	Sistem menerapkan aturan fuzzy untuk menghasilkan nilai crisp (PWM) sebagai sinyal kendali awal.	Output awal sistem kontrol suhu.
6.	Optimasi Parameter (Particle Swarm Optimization - PSO)	Algoritma PSO dijalankan untuk menyesuaikan parameter fungsi keanggotaan fuzzy agar hasil kontrol lebih presisi dan cepat mencapai suhu target.	Parameter fuzzy optimal diperoleh (fungsi keanggotaan diperbarui).
7.	Eksekusi Kontrol Pendingin (Peltier)	Berdasarkan hasil fuzzy (setelah optimasi PSO), sistem mengatur tingkat pendinginan melalui PWM dan relay: - $\leq 22^{\circ}\text{C} \rightarrow \text{OFF}$ - $22-25^{\circ}\text{C} \rightarrow \text{PWM rendah (40-60\%)}$ - $> 25^{\circ}\text{C} \rightarrow \text{PWM tinggi (80-100\%)}$.	ESP32 mengontrol aktuator pendingin sesuai kondisi suhu.
8.	Pengiriman Data ke Blynk IoT	Nilai suhu, nilai PWM, dan status sistem dikirim ke aplikasi Blynk untuk ditampilkan di dashboard pengguna.	Data tampil real-time di aplikasi IoT.

F. Metode Fuzzy Tsukamoto dan PSO

Metode Fuzzy Tsukamoto digunakan untuk mengatur suhu air pada sistem paludarium yang menjadi habitat Fire Belly Newt. Pada metode ini, setiap aturan fuzzy direpresentasikan dalam bentuk himpunan dengan derajat keanggotaan tertentu dan menghasilkan keluaran yang bersifat tegas (crisp output). Nilai suhu yang diperoleh dari sensor akan dikategorikan ke dalam tiga kondisi linguistik, yaitu *dingin*, *normal*, dan *panas*. Berdasarkan kondisi tersebut, sistem mengatur tingkat kerja pendingin (Peltier) agar suhu tetap berada dalam rentang ideal untuk spesies tersebut.

Agar sistem dapat beradaptasi secara lebih akurat terhadap perubahan lingkungan, metode Fuzzy Tsukamoto dioptimalkan menggunakan algoritma Particle Swarm Optimization (PSO). PSO digunakan untuk mencari parameter terbaik pada fungsi keanggotaan fuzzy sehingga respons sistem menjadi lebih stabil dan efisien. Dengan kombinasi kedua metode ini, pengendalian suhu air dapat dilakukan secara cerdas, adaptif, dan konsisten sesuai kebutuhan biologis Fire Belly Newt dalam paludarium.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

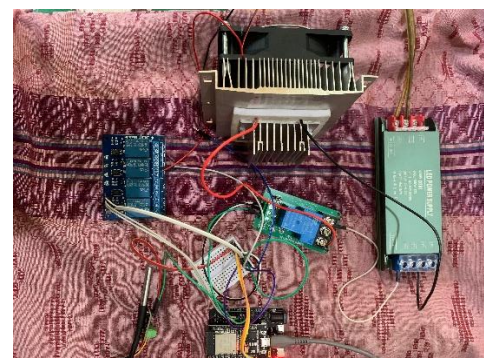
A. Hasil Perancangan Hardware dan Software

1) Hasil Perancangan Hardware

Penelitian ini menggunakan sistem pengendalian suhu berbasis IoT yang berhasil dirakit dan diuji. Sistem terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu:

1. Sensor Suhu DS18B20: Berfungsi untuk membaca suhu air paludarium secara real-time.
2. Mikrokontroler ESP32: Sebagai pusat pengendali dan pemroses logika fuzzy.
3. Modul Pendingin Peltier TEC1-12706: Digunakan untuk menurunkan suhu air sesuai perintah dari ESP32.
4. Relay: Mengatur aliran daya ke modul pendingin Peltier.
5. Platform IoT Blynk: Menampilkan data suhu, status pendingin, dan nilai PWM secara real-time pada smartphone.

Gbr. 3 Prototype Perangkat Keras Sistem Paludarium dan Gbr. 4 Tampilan dashboard Blynk.



Gbr. 3 Prototype Perangkat Keras Sistem Paludarium

2) Hasil Perancangan Software

a. Koneksi ESP32 ke Internet

Pertama-tama dihubungkan ke jaringan Wi-Fi lokal menggunakan SSID dan password yang disetel di kode. Hal ini

memungkinkan mikrokontroler untuk berkomunikasi dengan server Blynk.

```
// WIFI
char ssid[] = "Airmedia-11";
char pass[] = "28282828";
```

Gbr. 4 Kode Koneksi Wi-Fi ESP32 ke Blynk

b. Inisialisasi BLYNK

Setelah koneksi Wi-Fi berhasil, ESP32 menginisialisasi koneksi ke server Blynk menggunakan `Blynk.begin(authToken, ssid, password)`. Token autentikasi (`authToken`) menghubungkan ESP32 dengan proyek Blynk di smartphone.

```
// ===== SETUP =====
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  sensors.begin();
  pinMode(peltierPin, OUTPUT);
  digitalWrite(peltierPin, LOW);

  Blynk.begin(BLYNK_AUTH_TOKEN, ssid, pass);
  initSwarm();
}
```

Gbr. 5 Kode autentikasi ESP32 dengan Blynk menggunakan authToken

c. Pembacaan Sensor Suhu

Sensor DS18B20 membaca suhu air secara real-time. Data yang terbaca kemudian dikirim ke ESP32 untuk diproses lebih lanjut

```
sensors.requestTemperatures();
float tempC = sensors.getTempCByIndex(0);
if (tempC == DEVICE_DISCONNECTED_C) return;
```

Gbr. 6 Kode pengukuran suhu air dengan DS18B20

d. Pengolahan Data dan Kontrol Aktuator

ESP32 memproses data suhu menggunakan logika fuzzy atau Fuzzy + PSO untuk menentukan output PWM. Output ini dikirim ke modul Peltier melalui relay, sehingga suhu air dapat dikontrol secara otomatis.

```
float z_fuzzyC = fuzzyTanpaPSOC(tempC);
float z_PSO_C = fuzzyTsukamotoC(tempC); |

// Kontrol Peltier menggunakan hasil PSO
int pwmOut;
if (tempC < 22) pwmOut = 0;
else if (tempC > 26) pwmOut = 255;
else pwmOut = map(z_PSO_C, 20, 28, 0, 255);

analogWrite(peltierPin, pwmOut);
```

Gbr. 7 Kode pengendalian suhu Peltier menggunakan Fuzzy Tsukamoto yang dioptimasi PSO

e. Pengiriman Data Ke Dashboard BLYNK

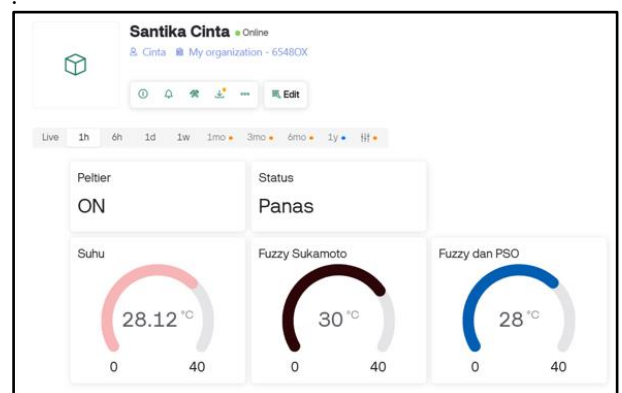
Data suhu aktual, status Peltier, dan nilai PWM dikirim ke dashboard Blynk menggunakan virtual pin. Hal ini

memungkinkan pengguna memantau kondisi paludarium secara real-time melalui smartphone.

```
// Kirim ke Blynk
Blynk.virtualWrite(V0, tempC);
Blynk.virtualWrite(V1, z_fuzzyC);
Blynk.virtualWrite(V2, z_PSO_C);
Blynk.virtualWrite(V3, kondisi);
Blynk.virtualWrite(V4, peltierstatus);
```

Gbr. 8 Kode program ESP32 untuk mengirim data ke Blynk melalui virtual pin

Dari hasil pengamatan, sistem mampu membaca suhu air dengan baik, mengirimkan data ke aplikasi Blynk, dan menampilkan status suhu. Hal ini menunjukkan bahwa perangkat keras dan konektivitas IoT telah terintegrasi dengan baik, sehingga mendukung pengendalian suhu otomatis pada paludarium Fire-Belly Newt.



Gbr. 9 Dashboard Blynk menampilkan suhu aktual, status suhu, dan perbandingan suhu dari metode

B. Hasil Pembacaan Suhu Aktual

Sensor DS18B20 yang terpasang pada paludarium membaca suhu air secara real-time dan mengirim data ke mikrokontroler ESP32. Data ditampilkan pada aplikasi Blynk, memungkinkan pemantauan suhu secara langsung oleh pengguna. Pengambilan data dilakukan dengan interval 1 detik, karena modul pendingin Peltier dapat menurunkan suhu dengan cepat. Interval per detik ini penting untuk menganalisis respons sistem terhadap perubahan suhu yang cepat, serta memastikan keamanan biologis Fire-Belly Newt.

Tabel II

Hasil Pengukuran Suhu Aktual Dan Status Pendingin Peltier:

Waktu	Suhu Aktual	Status Pendingin
0	30.2	ON
1	29.5	ON
2	28.8	ON
3	27.8	ON
4	26.9	ON
5	25.8	OFF

Pada percobaan ini, suhu awal air berada pada 30 °C, sehingga modul Peltier langsung bekerja untuk menurunkan suhu. Peltier akan terus aktif hingga suhu mendekati batas ideal, yaitu antara 22–25 °C, kemudian akan mati secara otomatis. Sistem menunjukkan kemampuan menurunkan suhu dengan

cepat, menandakan respons pengendalian yang efektif. Seluruh data pengukuran dapat dipantau secara real-time melalui

dashboard Blynk, sehingga mendukung pengendalian suhu secara otomatis.

C. Hasil Pengendalian Suhu Tsukamoto

Setelah proses pembacaan suhu, data diproses menggunakan metode Fuzzy Tsukamoto untuk mengatur kerja Peltier, di mana sistem membagi suhu ke dalam tiga kondisi linguistik, yaitu Dingin ($\leq 22^\circ\text{C}$), Normal ($22-25^\circ\text{C}$), dan Panas ($>25^\circ\text{C}$).

Tabel III

Hasil Pengendalian Suhu Menggunakan Fuzzy Tsukamoto

Waktu (detik)	Suhu Aktual	Suhu Fuzzy Tsukamoto	Status Pendingin
0	30.2	31.0	ON
1	29.2	30.5	ON
2	28.8	30.0	ON
3	27.8	29.2	ON
4	26.9	28.5	ON
5	25.8	27.5	OFF

Berdasarkan pengamatan, sistem Fuzzy Tsukamoto mampu menurunkan suhu air dari kondisi panas menuju suhu normal secara bertahap dan stabil. Selisih antara suhu aktual dan output fuzzy berkisar antara $1-2^\circ\text{C}$, yang cukup realistis untuk menunjukkan performa sistem tanpa memberikan kontrol yang berlebihan. Modul Peltier tetap aktif hingga suhu mendekati batas ideal, menunjukkan bahwa sistem bekerja secara otomatis dan adaptif terhadap variasi suhu lingkungan. Selain itu, pemantauan secara real-time melalui dashboard Blynk memberikan informasi langsung kepada pengguna mengenai status sistem dan kondisi paludarium, sehingga mempermudah pengendalian suhu secara efektif.

D. Hasil Pengendalian Suhu dengan Fuzzy Tsukamoto dan PSO

Untuk meningkatkan akurasi dan respons sistem, algoritma PSO digunakan untuk mengoptimasi parameter fungsi keanggotaan fuzzy. Hasil percobaan ditunjukkan pada tabel berikut

Tabel IV

Hasil Pengendalian Suhu Menggunakan Fuzzy Tsukamoto dan PSO

Waktu (detik)	Suhu Aktual	Suhu Fuzzy Tsukamoto + PSO	Status Pendingin
0	30.2	30.8	ON
1	29.5	30.2	ON
2	28.8	29.6	ON
3	27.8	28.8	ON
4	26.9	28.0	ON
5	25.8	27.2	OFF

Penerapan algoritma PSO pada sistem Fuzzy Tsukamoto membuat output kontrol lebih mendekati suhu aktual, sehingga pengendalian menjadi lebih presisi dibandingkan dengan Fuzzy Tsukamoto biasa. Selisih rata-rata antara suhu

aktual dan output hanya berkisar $0,5-1^\circ\text{C}$, sehingga suhu air dapat tetap stabil dalam rentang ideal. Sistem ini tetap mempertahankan respons cepat terhadap kondisi panas awal, dengan memanfaatkan kemampuan modul Peltier untuk menurunkan suhu secara efisien. Kombinasi Fuzzy Tsukamoto dan PSO memungkinkan pengendalian adaptif yang efektif, menyesuaikan perubahan suhu lingkungan secara real-time dan sekaligus menjaga kesejahteraan Fire-Belly Newt.

E. Perbandingan Respon Sistem

Untuk mengetahui efektivitas pengendalian suhu, dilakukan perbandingan antara Fuzzy Tsukamoto biasa dan Fuzzy Tsukamoto + PSO. Perbandingan dilakukan berdasarkan selisih antara suhu aktual dengan output sistem pada interval 1 detik.

Tabel V

Perbandingan Hasil Pengendalian

waktu	Suhu Aktual	Fuzzy Tsukamoto	Selisih	Fuzzy + PSO	Selisih
0	30.2	31.0	0.8	30.8	0.6
1	29.5	30.5	1.0	30.2	0.7
2	28.8	30.0	1.2	29.6	0.8
3	27.8	29.2	1.4	28.8	1.0
4	26.9	28.5	1.6	28.0	1.1
5	25.8	27.5	1.7	27.2	1.4

Hasil pengujian menunjukkan bahwa Fuzzy Tsukamoto biasa mampu menurunkan suhu air secara bertahap, namun selisih terhadap suhu aktual cenderung lebih besar, yaitu sekitar $0,8-1,7^\circ\text{C}$. Sementara itu, kombinasi Fuzzy Tsukamoto dengan PSO menunjukkan performa yang lebih baik, dengan selisih lebih kecil sekitar $0,6-1,4^\circ\text{C}$ dan respons yang lebih cepat terhadap perubahan suhu. Penerapan PSO membuat output sistem lebih adaptif terhadap fluktuasi suhu, sehingga suhu air lebih stabil dalam rentang ideal $22-25^\circ\text{C}$. Jika digambarkan dalam grafik perbandingan, kurva Fuzzy + PSO akan lebih mendekati suhu aktual dibandingkan Fuzzy Tsukamoto biasa, menandakan bahwa optimasi berhasil meningkatkan presisi sistem. Kesimpulan dari pengujian ini adalah kombinasi Fuzzy Tsukamoto dan PSO lebih efektif dalam menjaga kestabilan suhu paludarium, sekaligus mengurangi kemungkinan stres termal pada Fire-Belly Newt.

F. Evaluasi Kuantitatif Kinerja Sistem

Selain membandingkan selisih sesaat antara suhu aktual dan output sistem, evaluasi kinerja pengendalian suhu juga dilakukan secara kuantitatif menggunakan empat metrik umum pada sistem kendali, yaitu **Mean Absolute Error (MAE)**, **Root Mean Square Error (RMSE)**, **Integral of Absolute Error (IAE)**, dan **Error Maksimum (E_max)**. Analisis ini bertujuan untuk menilai tingkat akurasi, kestabilan, serta efisiensi respon sistem dalam menjaga suhu paludarium pada rentang ideal $22-25^\circ\text{C}$.

Perhitungan dilakukan berdasarkan data hasil pengujian pada interval waktu 0–5 detik sebagaimana tercantum pada Tabel V. Nilai metrik diperoleh dengan menghitung rata-rata dan akumulasi error terhadap suhu target selama periode pengujian.

Tabel VI

Evaluasi Kuantitas Sistem Pengendalian Suhu

Metrix	Fuzzy Tsukamoto	Fuzzy + PSO	Perubahan
MAE (°C)	1,283	0,933	↓ 27,3 %
RMSE (°C)	1,322	0,971	↓ 26,5 %
IAE (°C·s)	7,7	5,6	↓ 27,3 %
E_max (°C)	1,7	1,4	↓ 17,6 %

Hasil pada Tabel VI menunjukkan bahwa penerapan algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) pada metode Fuzzy Tsukamoto memberikan peningkatan signifikan terhadap performa sistem. Nilai MAE menurun dari 1,283 °C menjadi 0,933 °C dan RMSE dari 1,322 °C menjadi 0,971 °C, menandakan kesalahan rata-rata dan akar rata-rata kuadrat yang lebih kecil. Selain itu, nilai IAE juga menurun sebesar 27,3 %, yang menunjukkan pengurangan total akumulasi error sepanjang respon transien. Penurunan E_max dari 1,7 °C menjadi 1,4 °C menandakan bahwa sistem hasil optimasi memiliki overshoot maksimum yang lebih rendah.

Dengan demikian, metode Fuzzy Tsukamoto + PSO terbukti lebih presisi, cepat mencapai kestabilan suhu, serta memberikan kontrol suhu air yang lebih konsisten dibanding metode Fuzzy Tsukamoto konvensional.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, sistem pengendalian suhu paludarium *Fire-Belly Newt* berbasis IoT menggunakan metode Fuzzy Tsukamoto yang dioptimasi dengan Particle Swarm Optimization (PSO) berhasil menjaga suhu air dalam rentang ideal 22–25 °C secara otomatis dan real-time. Optimasi PSO meningkatkan akurasi serta respons sistem dibandingkan Fuzzy Tsukamoto biasa, sehingga pengendalian suhu menjadi lebih presisi dan stabil. Ditinjau dari metrik kuantitatif (MAE, RMSE, IAE, dan E_{max}), metode Fuzzy dan PSO menunjukkan peningkatan performa sekitar 26–27 %, menandakan penurunan error dan peningkatan kestabilan sistem. Integrasi perangkat keras, perangkat lunak, dan konektivitas IoT melalui Blynk memungkinkan pemantauan suhu yang efisien dan mendukung kesejahteraan *Fire-Belly Newt* dalam paludarium.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan dukungan selama proses penyusunan jurnal ini. Terima kasih juga disampaikan kepada rekan-rekan yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian, pengumpulan data, serta penyelesaian jurnal. Dukungan dan kerja sama dari berbagai pihak tersebut memungkinkan penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik dan tepat waktu.

REFERENSI

- [1] K. Guo *et al.*, “Species distribution models for predicting the habitat suitability of Chinese fire-bellied newt *Cynops orientalis* under climate change,” *Ecol Evol*, vol. 11, no. 15, pp.

- 10147–10154, Aug. 2021, doi: 10.1002/ece3.7822.
- [2] D. Ramdani, F. Mukti Wibowo, and Y. Adi Setyoko, “Rancang Bangun Sistem Otomatisasi Suhu Dan Monitoring pH Air Aquascape Berbasis IoT (Internet Of Thing) Menggunakan Nodemcu Esp8266 Pada Aplikasi Telegram,” *Journal of Informatics Information System Software Engineering and Applications (INISTA)*, vol. 3, no. 1, 2020.
- [3] Adi Winarno and M. Affandi, “Design and Construction of Smart House Prototype Based Internet of Things (Iot) Using Esp8266,” *BEST: Journal of Applied Electrical, Science, & Technology*, vol. 4, no. 1, 2022, doi: 10.36456/best.vol4.no1.5447.
- [4] M. Abdurrohman, A. G. Putrada, and M. M. Deris, “A Robust Internet of Things-Based Aquarium Control System Using Decision Tree Regression Algorithm,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 56937–56951, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3177225.
- [5] P. Chotikunnan, R. Chotikunnan, A. Nirapai, A. Wongkamhang, P. Imura, and M. Sangworasil, “Optimizing Membership Function Tuning for Fuzzy Control of Robotic Manipulators using PID-Driven Data Techniques,” *Journal of Robotics and Control (JRC)*, vol. 4, no. 2, 2023, doi: 10.18196/jrc.v4i2.18108.
- [6] M. M. H. AL-Khafaji, A. A. A. Kadauw, M. M. Abdulrazaq, H. M. H. Al-Khafaji, and H. Zeidler, “A Hybrid Fuzzy-PSO Framework for Multi-Objective Optimization of Stereolithography Process Parameters,” *Micromachines (Basel)*, vol. 16, no. 11, p. 1218, Oct. 2025, doi: 10.3390/mi1611218.
- [7] A. Bala, C. P. C. Munaiseche, K. Santa, and K. Kunci, “Sistem Kontrol Alat Pengukur Berbasis IoT Menggunakan Fuzzy Tsukamoto Dipertanakan Ayam Broiler Desa Tonsea Lama.”
- [8] K. Ruthsatz *et al.*, “Acclimation capacity to global warming of amphibians and freshwater fishes: Drivers, patterns, and data limitations,” *Glob Chang Biol*, vol. 30, no. 5, May 2024, doi: 10.1111/gcb.17318.
- [9] J. Scheun, L. Venter, and A. Ganswindt, “A frog in hot water: the effect of temperature elevation on the adrenal stress response of an African amphibian,” *PeerJ*, vol. 12, no. 8, 2024, doi: 10.7717/peerj.17847.
- [10] P. Pottier *et al.*, “A comprehensive database of amphibian heat tolerance,” *Sci Data*, vol. 9, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1038/s41597-022-01704-9.
- [11] P. Pintanel, M. Tejado, F. Almeida-Reinoso, A. Merino-Viteri, and L. M. Gutiérrez-Pesquera, “Critical thermal limits do not vary between wild-caught and captive-bred tadpoles of *Agalychnis saltator* (Anura: Hylidae),” *Diversity (Basel)*, vol. 12, no. 2, Feb. 2020, doi: 10.3390/d12020043.
- [12] R. Saatchi, “Fuzzy Logic Concepts, Developments and Implementation,” *Information (Switzerland)*, vol. 15, no. 10, Oct. 2024, doi: 10.3390/info15100656.
- [13] R. Urbieto Parrazales, M. T. Zagaceta Álvarez, K. A. Aguilar Cruz, R. Palma Orozco, and J. L. Fernández Muñoz, “Implementation of a fuzzy logic controller for the irrigation of rose cultivation in Mexico,” *Agriculture (Switzerland)*, vol. 11, no. 7, Jul. 2021, doi: 10.3390/agriculture11070576.
- [14] C. Liu, “Particle Swarm optimization of Type-2 fuzzy control for regenerative braking of electric vehicles,” *Front Mech Eng*, vol. 11, 2025, doi: 10.3389/fmech.2025.1612690.
- [15] M. Flores-Iwasaki, G. A. Guadalupe, M. Pachas-Caycho, S. Chapa-Gonza, R. C. Mori-Zababurú, and J. C. Guerrero-Abad, “Internet of Things (IoT) Sensors for Water Quality Monitoring in Aquaculture Systems: A Systematic Review and Bibliometric Analysis,” Mar. 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/agriengineering7030078.
- [16] R. S. Raheem, M. Y. Hassan, and S. K. Kadhim, “Particle swarm optimization based interval type 2 fuzzy logic control for motor rotor position control of artificial heart pump,” *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 25, no. 2, pp. 814–824, Feb. 2022, doi: 10.11591/ijeecs.v25.i2.pp814-824.