



Hybrid Fuzzy-PID for Temperature and Water Quality Control in Freshwater Lobster Farming

Hybrid Fuzzy-PID untuk Pengendalian Suhu dan Kualitas Air pada Budidaya Lobster Air Tawar

Abstract _Freshwater lobster (*Cherax quadricarinatus*) aquaculture requires stable temperature and water quality to support optimal growth and survival. This study aims to design and evaluate a hybrid fuzzy-PID system for controlling temperature and water quality in freshwater lobster culture media. The system was developed using temperature, pH, and dissolved oxygen (DO) sensors, a microcontroller as the processing unit, and actuators in the form of a heater, aerator, and circulation pump. The hybrid fuzzy-PID method was applied by utilizing error values and error changes to adaptively adjust the PID parameters. System performance was tested through three scenarios: no control, conventional PID, and hybrid fuzzy-PID, using evaluation parameters such as rise time, settling time, overshoot, steady-state error, mean absolute error (MAE), and root mean squared error (RMSE). Test results show that at a temperature setpoint of 28°C, the hybrid fuzzy-PID yields a rise time of 8.7 minutes, a settling time of 14.2 minutes, an overshoot of 0.36%, and a steady-state error of 0.03 °C, which is better than the conventional PID, which yields a rise time of 11.6 minutes, a settling time of 23.4 minutes, an overshoot of 2.14%, and a steady-state error of 0.08 °C. The MAE and RMSE values for temperature in the hybrid fuzzy-PID were 0.393 and 0.660, respectively. Additionally, the system demonstrated better stability of pH and DO compared to the conventional PID. The results of the study indicate that the hybrid fuzzy-PID method is effective in improving temperature stability and water quality in freshwater lobster farming..

Keywords: Freshwater Lobster; *Cherax quadricarinatus*; Hybrid Fuzzy-PID; Temperature, Water Quality; Control System.

Abstrak Budidaya lobster air tawar (*Cherax quadricarinatus*) memerlukan kestabilan suhu dan kualitas air untuk mendukung pertumbuhan dan kelangsungan hidup yang optimal. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengevaluasi sistem hybrid fuzzy-PID untuk pengendalian suhu dan kualitas air pada media budidaya lobster air tawar. Sistem dikembangkan menggunakan sensor suhu, pH, dan dissolved oxygen (DO), mikrokontroler sebagai unit pemroses, serta aktuator berupa heater, aerator, dan pompa sirkulasi. Metode hybrid fuzzy-PID diterapkan dengan memanfaatkan nilai error dan perubahan error untuk menyesuaikan parameter PID secara adaptif. Kinerja sistem diuji melalui tiga skenario, yaitu tanpa kontrol, PID konvensional, dan hybrid fuzzy-PID, menggunakan parameter evaluasi rise time, settling time, overshoot, steady-state error, mean absolute error (MAE), dan root mean squared error (RMSE). Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada setpoint suhu 28°C, hybrid fuzzy-PID menghasilkan rise time 8,7 menit, settling time 14,2 menit, overshoot 0,36%, dan steady-state error 0,03 °C, lebih baik dibandingkan PID konvensional yang menghasilkan rise time 11,6 menit, settling time 23,4 menit, overshoot 2,14%, dan steady-state error 0,08 °C. Nilai MAE dan RMSE suhu pada hybrid fuzzy-PID masing-masing sebesar 0,393 dan 0,660. Selain itu, sistem juga menunjukkan kestabilan pH dan DO yang lebih baik dibandingkan PID konvensional. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode hybrid fuzzy-PID efektif untuk meningkatkan kestabilan suhu dan kualitas air pada budidaya lobster air tawar.

Kata Kunci: Lobster Air Tawar; *Cherax Quadricarinatus*; Hybrid Fuzzy-PID; Suhu, Kualitas Air; Sistem Kendali.

I. INTRODUCTION

Lobster air tawar (*Cherax quadricarinatus*) merupakan salah satu komoditas akuakultur bernilai ekonomis tinggi yang keberhasilan budidayanya sangat dipengaruhi oleh kestabilan kondisi

lingkungan pemeliharaan, terutama suhu dan kualitas air. Parameter seperti suhu, pH, *dissolved oxygen* (DO), dan total padatan terlarut berpengaruh langsung terhadap metabolisme, pertumbuhan, dan tingkat kelangsungan hidup lobster. Fluktuasi parameter tersebut dapat menimbulkan stres

fisiologis yang berdampak pada penurunan performa budidaya. Penelitian pada benih lobster air tawar menunjukkan bahwa suhu 28 °C memberikan laju pertumbuhan harian dan sintasan optimum, sehingga pengendalian suhu menjadi aspek penting dalam sistem budidaya intensif [1].

Dalam praktik budidaya, pengelolaan suhu dan kualitas air umumnya masih dilakukan secara manual atau semiotomatis. Pendekatan tersebut memiliki keterbatasan dalam merespons perubahan kondisi lingkungan secara cepat dan akurat, padahal sistem akuakultur bersifat dinamis dan nonlinier. Sampai saat ini, perubahan kualitas air sering dipicu oleh berbagai faktor, termasuk kepadatan tebar, sisa pakan, metabolisme organisme, dan kondisi sekitar. Oleh karena itu, manusia membutuhkan sistem pengendalian yang stabil untuk secara otomatis menjaga suhu dan kualitas air pada kisaran optimal.

Dalam beberapa tahun terakhir, pengembangan akuakultur juga ditunjukkan oleh akuisisi data sensor dan pemantauan real-time state of the water telah mendapat cukup perhatian secara luas dalam literatur. Tinjauan sistematis terbaru menunjukkan bahwa penelitian terkait sensor untuk akuakultur mengalami peningkatan signifikan pada periode 2020–2024, dengan parameter yang paling banyak dipantau meliputi suhu, pH, dan DO[2]. Implementasi sistem berbasis wireless sensor network telah digunakan untuk memantau suhu dan DO pada kolam ikan air tawar[3], dan selanjutnya dikembangkan menggunakan arsitektur NB-IoT untuk akuisisi data multisensor serta pengelolaan kolam secara jarak jauh[4][5]. Namun, sejauh ini, sebagian besar penelitian cenderung meringkas aspek pemantauan atau transmisi data, dan hanya sejumlah kecil pekerjaan telah dilakukan dalam mengembangkan pengontrol otomatis adaptif untuk sistem akuakultur..

Fuzzy logic adalah salah satu cara yang populer untuk menangani sistem yang kompleks atau tidak linear sehingga tidak dapat diramalkan memiliki dengan karakteristik yang mungkin dalam dunia nyata. Metode ini memiliki keuntungan utama karena memungkinkan operator mewakili semua pengetahuan heuristik atau ketidakpastian dalam bentuk aturan kontrol. Rana dan Rani menuliskan bahwa fuzzy logic controller layak diterapkan pada sistem akuakultur air tawar melalui simulasi berbasis MATLAB[6][7][8]. Selain itu, *fuzzy inference system* berbasis Mamdani telah dikembangkan untuk mengevaluasi kualitas air berdasarkan parameter pH, suhu, total *dissolved solids*, dan DO[9]. Pendekatan *closed-loop dual-input fuzzy logic* juga telah digunakan untuk pengendalian *ammonia nitrogen* pada sistem akuakultur[10]. Hasil-hasil tersebut menunjukkan bahwa *fuzzy logic* efektif dalam menangani ketidakpastian parameter air, meskipun

penerapannya masih dominan pada evaluasi kualitas air atau pengendalian parameter tertentu secara terbatas.

Di sisi lain, metode *Proportional-Integral-Derivative (PID)* masih banyak digunakan karena memiliki struktur sederhana, mudah diimplementasikan, dan memberikan respons yang stabil. Pada sistem recirculating aquaculture, menunjukkan bahwa adaptive PID yang dipadukan dengan aturan fuzzy mampu meningkatkan akurasi dan *robustness* pengendalian DO dibandingkan PID konvensional[11][12]. Dari hasil temuan di atas, dapat dinyatakan bahwa *fuzzy logic* dikombinasikan dengan PID memiliki potensi membentuk sistem kontrol hybrid yang mampu mengakomodasi ketidakpastian dan nonlinearitas sistem namun tetap mempertahankan kestabilan response kontrol tersebut.

Namun, penerapan kontrol *hybrid fuzzy-PID* pada pewadahan lobster air tawar masih relatif sedikit. Hasil analisis pH, kekeruhan air crayfish telah dimanfaatkan Fuzzy Logic untuk pengambilan keputusan[13], sedangkan pewadahan lobster air tawar masih mana terpusat pada pengendalian suhu dan kontrol pH diatur terpisah, dan menyatakan bahwa peningkatan pengaturan konsentrasi parameter kualitas air masih membutuhkan optimasi. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa penelitian terkait pengendalian suhu dan kualitas air secara terpadu menggunakan pendekatan *hybrid fuzzy-PID* pada budidaya lobster air tawar masih belum banyak dilaporkan.

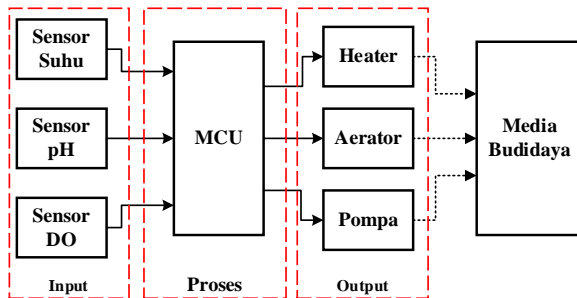
Berdasarkan uraian tersebut, terdapat celah penelitian dalam pengembangan sistem kontrol yang tidak hanya mampu memantau, tetapi juga menstabilkan suhu dan kualitas air secara real-time pada budidaya lobster air tawar. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan penerapan *Hybrid Fuzzy-PID untuk Pengendalian Suhu dan Kualitas Air pada Budidaya Lobster Air Tawar*. Pendekatan ini diharapkan mampu menggabungkan keunggulan fuzzy logic dalam menangani ketidakpastian dengan kestabilan respons PID, sehingga menghasilkan sistem kontrol yang lebih adaptif, presisi, dan aplikatif untuk mendukung efisiensi budidaya lobster air tawar.

II. METHODS (FOR ORIGINAL RESEARCH ARTICLE ONLY)

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental yang bertujuan merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi sistem Hybrid Fuzzy-PID untuk pengendalian suhu dan kualitas air pada budidaya lobster air tawar (*Cherax quadricarinatus*). Sistem dikembangkan untuk menjaga parameter utama media budidaya, yaitu suhu, pH, dan dissolved oxygen (DO), agar tetap berada pada rentang

optimum melalui mekanisme kontrol tertutup (*closed-loop control*).

Secara umum, sistem yang dirancang terdiri atas tiga subsistem utama, yaitu subsistem akuisisi data, subsistem pengendali, dan subsistem aktuasi. Subsistem akuisisi data berfungsi membaca parameter suhu, pH, dan DO secara periodik. Data tersebut kemudian diproses oleh mikrokontroler yang menjalankan algoritma *hybrid fuzzy-PID*. Selanjutnya, sinyal kendali yang dihasilkan digunakan untuk mengaktifkan aktuator, seperti *heater*, *aerator*, dan pompa sirkulasi, guna mengoreksi kondisi media budidaya.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem Pengendalian Hybrid Fuzzy-PID

Pada penelitian ini, suhu digunakan sebagai parameter utama yang dikendalikan secara langsung, sedangkan pH dan DO digunakan sebagai parameter kualitas air pendukung yang dipantau secara kontinu dan dianalisis dalam konteks kestabilan sistem budidaya. Dengan demikian, performa sistem kontrol dievaluasi tidak hanya berdasarkan kemampuan mencapai setpoint suhu, tetapi juga berdasarkan dampaknya terhadap kestabilan parameter kualitas air lainnya.

Perancangan Sistem Kontrol Hybrid Fuzzy-PID

Sistem kontrol yang digunakan pada penelitian ini menerapkan mekanisme umpan balik tertutup. Nilai *setpoint* suhu dibandingkan dengan nilai aktual hasil pembacaan sensor untuk menghasilkan *error*. Nilai *error* dan perubahan *error* kemudian digunakan sebagai masukan bagi sistem fuzzy untuk menyesuaikan parameter PID secara adaptif. Hasil penyesuaian tersebut digunakan untuk menghasilkan sinyal kendali pada aktuator.

Persamaan error dirumuskan sebagai berikut:

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

dengan:

$e(t)$ adalah error pada waktu ke- t ,

$r(t)$ adalah nilai *setpoint*,

$y(t)$ adalah nilai aktual hasil pengukuran sensor.

Perubahan error dihitung menggunakan:

$$\Delta e(t) = e(t) - e(t - 1)$$

dengan $\Delta e(t)$ menyatakan perubahan error terhadap sampel sebelumnya.

Kontrol PID

Keluaran kontrol PID kontinu dinyatakan oleh:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Untuk implementasi digital pada mikrokontroler, persamaan PID dinyatakan dalam bentuk diskrit:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{i=0}^k e(i)\Delta t + K_d \frac{e(k) - e(k - 1)}{\Delta t}$$

dengan:

$u(k)$ = sinyal kendali pada waktu ke- k ,

K_p = gain proporsional,

K_i = gain integral,

K_d = gain derivatif,

Δt = interval sampling.

Pada metode hybrid, nilai K_p , K_i , dan K_d tidak bersifat tetap, tetapi diperbarui berdasarkan hasil inferensi fuzzy. Nilai parameter PID adaptif dirumuskan sebagai:

$$K'_p = K_p + \Delta K_p$$

$$K'_i = K_i + \Delta K_i$$

$$K'_d = K_d + \Delta K_d$$

dengan ΔK_p , ΔK_i , dan ΔK_d merupakan keluaran sistem fuzzy.

Fuzzy inference system

Fuzzy inference system yang digunakan pada penelitian ini adalah tipe Mamdani, karena memiliki struktur aturan linguistik yang intuitif dan banyak digunakan pada sistem kendali nonlinier. Dua variabel input yang digunakan, yaitu *error* dan perubahan *error*, masing-masing dibagi ke dalam lima himpunan linguistik:

- NB (*Negative Big*),
- NS (*Negative Small*),
- ZO (*Zero*),
- PS (*Positive Small*),
- PB (*Positive Big*).

Keluaran fuzzy berupa penyesuaian terhadap gain

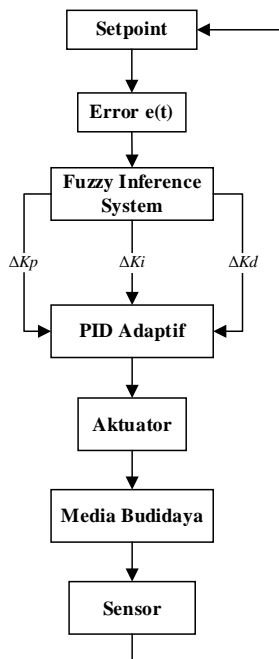
PID. Proses inferensi meliputi tiga tahap, yaitu fuzzifikasi, evaluasi aturan, dan defuzzifikasi. Metode defuzzifikasi yang digunakan adalah metode *centroid*, dengan persamaan:

$$z^* = \frac{\int \mu(z) z dz}{\int \mu(z) dz}$$

dengan:

z^* = nilai crisp hasil defuzzifikasi,

$\mu(z)$ = derajat keanggotaan keluaran fuzzy.



Gambar 2. Skema Kontrol Hybrid Fuzzy-PID

Akuisisi Data dan Evaluasi Kinerja

Sensor suhu, pH, dan DO mengumpulkan data setiap saat secara sporadik selama pengujian. Data yang diperoleh dari pengamatan sistem ini diolah dengan cara yang sebelumnya diberikan. Pengamatan dilakukan untuk mendapatkan grafik tren dari sistem ini, dan ini dianalisis untuk mengevaluasi kinerja sistem. Beberapa parameter evaluasi yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah *mean absolute error (MAE)*, *mean squared error (MSE)*, *root mean squared error (RMSE)*, *overshoot*, *settling time*, dan *steady-state error*.

Perhitungan MAE dengan menggunakan persamaan:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |r_i - y_i|$$

Perhitungan MSE dengan menggunakan persamaan:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_i - y_i)^2$$

Perhitungan RMSE dengan menggunakan persamaan:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_i - y_i)^2}$$

Untuk nilai persentase *overshoot* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\%OS = \frac{y_{max} - r}{r} \times 100\%$$

dengan:

y_{max} adalah nilai puncak suatu respon,

r adalah nilai dari setpoint yang ditentukan.

Sedangkan untuk *steady-state error* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t)$$

Metode hybrid fuzzy-PID dapat dikategorikan performa yang lebih baik jika menunjukkan nilai MAE, MSE, RMSE, dan *steady-state error* yang lebih kecil, serta *settling time* yang lebih cepat dan *overshoot* yang lebih rendah dibandingkan PID konvensional.

III. RESULTS AND DISCUSSION (REVIEW ARTICLE USE DISCUSSION)

Pengujian sistem dilakukan untuk membandingkan performa tiga skenario, yaitu sistem tanpa kontrol, sistem dengan PID konvensional, dan sistem dengan hybrid fuzzy-PID. Parameter evaluasi utama meliputi kemampuan sistem mencapai setpoint, kestabilan respons, nilai galat, *overshoot*, dan waktu tunak (*settling time*). Pada pengujian ini, setpoint suhu ditetapkan sebesar 28 °C, setpoint pH sebesar 7,4, dan setpoint *dissolved oxygen (DO)* sebesar 6,5 mg/L.

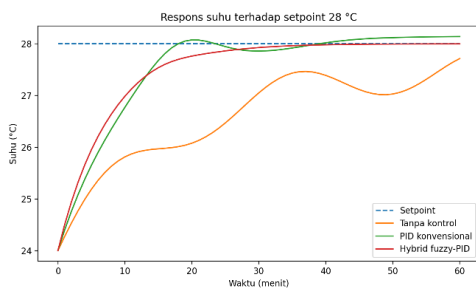
Dari pengujian tersebut dapat disimpulkan bahwa sistem hybrid fuzzy-PID memberi respon yang lebih cepat dan stabil dibandingkan PID konvensional maupun sistem tanpa kontrol. Sistem tanpa kontrol menyebabkan proses suhu naik lambat dan kurang stabil sehingga tidak mencapai *setpoint*. PID konvensional mampu mempercepat mencapai setpoint, tetapi *overshoot* dan osilasi kecil tetap ditemukan sebelum mencapai kondisi tunak. Sedangkan metode *hybrid fuzzy-PID* memiliki galat yang lebih kecil dalam mencapai setpoint dan proses yang relatif lebih halus.

Tabel 1. Hasil Uji Respons Suhu

Metode	Rise	Settl	Overs	Stea	M	RM
--------	------	-------	-------	------	---	----

Kontrol	Time (Menit)	Time (Menit)	hoot (%)	dy-Stat e Error (°C)	AE	SE
Tanpa Kontrol	24,8	Tidak Tunak	0,00	0,42	1,186	1,333
PID Konvensional	11,6	23,4	2,14	0,08	0,609	0,833
Hybrid Fuzzy-PID	8,7	14,2	0,36	0,03	0,393	0,660

Berdasarkan Tabel 1, metode *hybrid fuzzy-PID* menghasilkan *rise time* dan *settling time* yang paling rendah. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi fuzzy pada PID mampu memperbaiki respons transien sistem. Nilai *overshoot* pada *hybrid fuzzy-PID* juga lebih kecil dibandingkan PID konvensional, yang menandakan bahwa sistem mampu mendekati setpoint dengan lebih stabil tanpa lonjakan berlebih.



Gambar 3. Grafik Respons Suhu Terhadap Setpoint 28 °C

Pada Gambar 3 menunjukkan bahwa sistem tanpa kontrol mengalami kenaikan suhu secara lambat dan tidak mencapai kestabilan yang memadai. PID konvensional menunjukkan respons yang lebih cepat, tetapi masih mengalami *overshoot* sebelum stabil. Sementara itu, *hybrid fuzzy-PID* memperlihatkan kurva respons yang lebih cepat menuju setpoint dengan amplitudo osilasi yang lebih kecil. Pola ini menunjukkan bahwa *fuzzy logic* mampu menyesuaikan parameter PID secara adaptif sesuai kondisi *error* sistem.

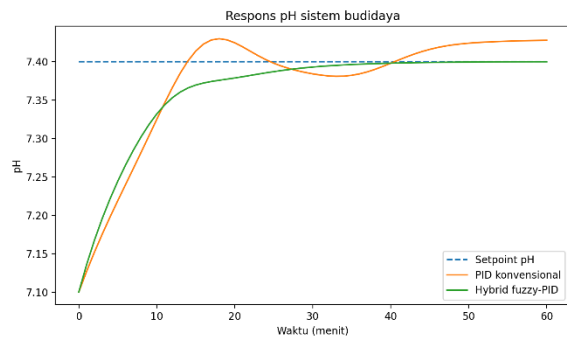
Hasil Pengujian Stabilitas pH

Selain suhu, pengamatan juga dilakukan terhadap kestabilan pH sebagai salah satu indikator kualitas air. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode hybrid fuzzy-PID berkontribusi terhadap kestabilan lingkungan budidaya yang lebih baik, ditunjukkan oleh fluktuasi pH yang lebih kecil dibandingkan

sistem PID konvensional.

Tabel 2. Hasil Uji Kestabilan Ph

Metode Kontrol	pH Rata-rata	Deviasi Standar	Error Akhir	MAE	RMS E
PID konvensional	7,38	0,072	0,03	0,117	0,135
Hybrid fuzzy-PID	7,39	0,041	0,01	0,086	0,106



Gambar 4. Grafik Respons Ph Sistem Budidaya

Gambar 4 menunjukkan bahwa kedua metode mampu mendekati nilai acuan pH, tetapi *hybrid fuzzy-PID* memberikan fluktuasi yang lebih kecil di sekitar setpoint. Deviasi standar yang lebih rendah menunjukkan bahwa pendekatan *hybrid* mampu menjaga kestabilan sistem dengan lebih baik, yang penting dalam budidaya lobster air tawar karena perubahan pH yang mendadak dapat memengaruhi metabolisme dan respons fisiologis organisme.

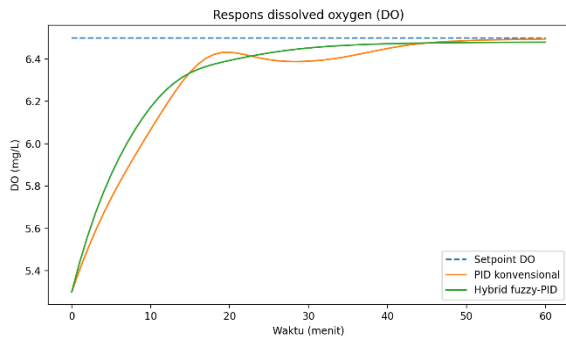
Hasil Pengujian Dissolved Oxygen (DO)

Pengujian terhadap DO dilakukan untuk melihat pengaruh kestabilan sistem kontrol terhadap parameter kualitas air yang berkaitan dengan suplai oksigen terlarut. Hasil menunjukkan bahwa *hybrid fuzzy-PID* mampu mempertahankan DO lebih dekat ke *setpoint* dibandingkan PID konvensional.

Tabel 3. Hasil Uji Respons DO

Metode Kontrol	DO Rata-rata (mg/L)	Settling Time (menit)	Overshoot (%)	MAE	RMS E
PID konvensional	6,44	19,8	1,85	0,267	0,306
Hybrid fuzzy-	6,47	13,1	0,62	0,201	0,255

PID					
-----	--	--	--	--	--



Gambar 5. Grafik Respons *Dissolved Oxygen* (DO)

Pada Gambar 5 menunjukkan bahwa *hybrid fuzzy-PID* memiliki respons DO yang lebih cepat menuju nilai referensi dan lebih stabil setelah mencapai keadaan tunak. Hal ini menunjukkan bahwa sistem kontrol yang lebih adaptif tidak hanya berdampak pada suhu, tetapi juga berkontribusi terhadap kestabilan parameter kualitas air lainnya.

Berdasarkan hasil pengujian, metode *hybrid fuzzy-PID* memberikan performa yang lebih baik dibandingkan PID konvensional dan sistem tanpa kontrol. Keunggulan dari metode ini adalah kemampuannya untuk mengatur parameter kontrol adaptif dengan cara memperhitungkan *error* dan perubahan *error*. Saat *error* besar, *fuzzy inference system* kemudian meningkatkan aksi kontrolnya untuk mempercepat sistem mencapai *setpoint*. Sebaliknya jika *error* sudah mulai mengecil, sistem juga menurunkan *gain* untuk memperhalus respons tanpa menyebabkan *overshoot* yang berlebihan.

Secara teoritis, mekanisme tersebut sesuai dengan karakteristik sistem akuakultur yang bersifat nonlinier dan dinamis. Perubahan suhu air, gangguan dari lingkungan, serta interaksi antarparameter kualitas air menyebabkan model sistem sulit direpresentasikan hanya dengan parameter PID tetap. Pada kondisi tersebut, integrasi fuzzy logic memberikan fleksibilitas yang lebih tinggi dalam menangani ketidakpastian sistem. Hal ini menjelaskan mengapa nilai MAE, RMSE, dan *steady-state error* pada *hybrid fuzzy-PID* lebih rendah dibandingkan PID konvensional.

Dalam pengujian suhu, *hybrid fuzzy-PID* memiliki settling time sebesar 14,2 menit. Ini jauh lebih cepat dari pada sistem kontrol PID konvensional, yang sebesar 23,4 menit. Selain itu, *overshoot* mencapai 0,36%, sementara PID konvensional menghasilkan *overshoot* sebesar 2,14%. Secara keseluruhan, penurunan overshoot ini mencerminkan keefektifan sistem hybrid dalam meredam respon kelebihan, yang menjadi penting dalam pengelolaan suhu dalam budidaya lobster.

Pengamatan kualitas air, seperti pH dan DO, menunjukkan hasil dengan tren yang sama. Meskipun hanya sebagai parameter utama dalam sistem kami, pengendalian dan stabilitas juga berdampak positif pada parameter tambahan lain ini. Artinya, stabilitas dalam satu area kontrol dapat digunakan untuk menjaga tingkat stabilitas keseluruhan di lingkungan pemeliharaan yang lebih luas. Hal ini menandakan bahwa pada konteks akuakultur, stabilitas dan kontrol terhadap kecepatan perubahan dalam lingkungan pemeliharaan mutlak, karena berkaitan langsung dengan efisiensi metabolisme, aktivitas makan, dan kelangsungan hidup lobster.

Secara praktis, hasil ini menunjukkan bahwa hybrid fuzzy-PID bisa menjadi alternatif untuk diterapkan pada sistem budidaya lobster air tawar laboratorium atau bahkan semiintensif. Approach ini kemungkinan sangat membantu relay sistem untuk bekerja secara adaptif ketika diserang oleh gangguan external, tanpa perlu di-atune bahan PID secara manual tetap. Oleh karena itu, ini dapat menjadi cara yang lebih jelas untuk meningkatkan sistem pengelolaan kualitas air yang ada di budidaya modern.

Meskipun demikian, hasil pada penelitian ini masih perlu diuji lebih lanjut pada skala budidaya yang lebih besar dan pada periode pemeliharaan yang lebih panjang. Selain itu, integrasi kontrol terhadap parameter lain seperti amonia, kekeruhan, dan total padatan terlarut juga perlu dikembangkan agar sistem dapat memberikan pengendalian kualitas air yang lebih komprehensif.

IV. CONCLUSION

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian, *hybrid fuzzy-PID* mampu mengendalikan suhu dan kualitas air budidaya lobster air tawar lebih efektif jika dibandingkan dengan PID konvensional maupun tanpa kontrol. *Fuzzy logic* pada pengendali PID memungkinkan adanya penyimpangan yang dilakukan secara adaptif tergantung seberapa besar *error* dan perubahan performa *error* yang terjadi, sehingga respons sistem mampu lebih cepat, stabil, dan terkontrol. Pada pengujian suhu dengan setpoint 28°C, *hybrid fuzzy-PID* memiliki rise time 8,7 menit, lebih cepat dibandingkan PID konvensional 11,6 menit maupun tanpa kontrol 24,8 menit. Nilai settling time yang diperoleh *hybrid fuzzy-PID* juga lebih baik, yakni 14,2 menit, lebih kecil dari PID 23,4 menit), sementara tanpa kontrol tidak bisa dirujuk dalam kondisi tunak. *Over-shooting hybrid fuzzy-PID* juga lebih kecil hanya 0,36%, lebih kecil dari PID 2,14%, dengan *steady state error* 0,03°C, lebih kecil dibandingkan PID dan tanpa kontrol yang masing-masing sebesar 0,08°C dan 0,42°C. *Hybrid fuzzy-PID* juga memiliki akurasi lebih tinggi, memperlihatkan nilai MAE 0,393 dan RMSE 0,660,

lebih kecil dari PID dengan MAE 0,609; RMSE 0,833 maupun tanpa kontrol dengan MAE 1,186; RMSE 1,333. Kualitas air pada *hybrid fuzzy-PID* juga lebih stabil, jika pH 7,39 dan DO 6,47 mg/L, lebih tinggi jika dibandingkan PID dengan pH 7,38 dan DO 6,44 mg/L. Dari hasil tersebut, *hybrid fuzzy-PID* mampu menstabilkan suhu dan kualitas air pada lobster air tawar secara optimal.

V. ACKNOWLEDGEMENTS

Terimakasih kepada Program Studi Teknik Elektro dan LPPM Universitas Merdeka Malang atas dukungannya sehingga bisa teralisasi artikel ilmiah ini.

REFERENCES

- [1] I. I. Kusmini, W. Hadie, and E. P. Sianipar, "Suhu optimum untuk laju pertumbuhan dan sintasan benih lobster air tawar *Cherax quadricarinatus*," *J. Ris. Akuakultur*, vol. 1, no. 1, pp. 67–72, 2006.
- [2] M. Flores-Iwasaki, G. A. Guadalupe, M. Pachas-Caycho, S. Chapa-Gonza, R. C. Mori-Zabarburú, and J. C. Guerrero-Abad, "Internet of Things (IoT) sensors for water quality monitoring in aquaculture systems: a systematic review and bibliometric analysis," *AgriEngineering*, vol. 7, no. 3, p. 78, 2025.
- [3] B. Shi, V. Sreeram, D. Zhao, S. Duan, and J. Jiang, "A wireless sensor network-based monitoring system for freshwater fishpond aquaculture," *Biosyst. Eng.*, vol. 172, pp. 57–66, 2018.
- [4] J. Huan, H. Li, F. Wu, and W. Cao, "Design of water quality monitoring system for aquaculture ponds based on NB-IoT," *Aquac. Eng.*, vol. 90, p. 102088, 2020.
- [5] P. D. P. Adi, A. Kitagawa, D. A. Prasetya, R. Arifuddin, and S. Yoseph, "LoRaWAN Technology in Irrigation Channels in Batu Indonesia," *J. Ilmiah Tek. Elektro Komput. dan Inform.*, vol. 7, no. 3, pp. 522–537, 2021.
- [6] D. Rana, "Fuzzy logic based control system for fresh water aquaculture: A MATLAB based simulation approach," *Serbian J. Electr. Eng.*, 2015.
- [7] R. Arifuddin *et al.*, "Baby Room Temperature and Humidity Control System Using Fuzzy Logic," *Emit. J. Tek. Elektro*, pp. 275–280, 2024.
- [8] Y. A. Liani *et al.*, "The Broiler Chicken Coop Temperature Monitoring Use Fuzzy Logic and LoRAWAN," in *2021 3rd International Conference on Electronics Representation and Algorithm (ICERA)*, 2021, pp. 161–166.
- [9] M. G. A. C. Bautista *et al.*, "Fuzzy logic-based adaptive aquaculture water monitoring system based on instantaneous limnological parameters," *J. Adv. Comput. Intell. Intell. Informatics*, vol. 26, no. 6, pp. 937–943, 2022.
- [10] H.-C. Li, K.-W. Yu, C.-H. Lien, C. Lin, C.-R. Yu, and S. Vaidyanathan, "Improving aquaculture water quality using dual-input fuzzy logic control for ammonia nitrogen management," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 11, no. 6, p. 1109, 2023.
- [11] X. Zhou, J. Wang, L. Huang, D. Li, and Q. Duan, "Modelling and controlling dissolved oxygen in recirculating aquaculture systems based on mechanism analysis and an adaptive PID controller," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 192, p. 106583, 2022.
- [12] R. Arifuddin, S. Subairi, A. B. Setiawan, M. A. Ridlo, and A. N. Ziliwu, "Determining PID Parameters For Temperature Control System in Cavendish Banana Storage Room," *JEEE-U (Journal Electr. Electron. Eng.)*, vol. 8, no. 1, pp. 15–23, 2024.
- [13] S. A. Wulandari, A. Sucipto, Q. Hasanah, R. A. Widarso, and C. A. Rakhmadina, "Smart IoT-based water quality control for lobster aquaculture using Mamdani fuzzy logic," in *BIO Web of Conferences*, 2026, vol. 210, p. 5005.

*Correspondent e-mail address

rahman.arifuddin@unmer.ac.id Peer reviewed under responsibility of Muhammadiyah University Ponorogo, Indonesia

© 2022 Muhammadiyah University Sidoarjo, All right reserved, This is an open access article under the CC BY license(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Received: 2026-08-02
Accepted: 2026-04-13
Published: 2026-04-30

DAFTAR TABEL

DAFTAR GAMBAR