

Sistem Kendali Mikroklimat *Greenhouse* Cerdas Berbasis Hybrid GA-LSTM dan *Fuzzy Logic Controller*

Rainer Maghma Royali¹, Dhani Ariatmanto^{2*}

^{1,2*} Universitas Amikom Yogyakarta, Kabupaten Sleman, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia.

Email: rainer.royali@gmail.com¹, dhaniari@amikom.ac.id^{2*}

Histori Artikel:

Dikirim 14 Januari 2026; *Diterima dalam bentuk revisi* 22 Januari 2026; *Diterima* 5 Februari 2026; *Diterbitkan* 10 Mei 2026. Semua hak dilindungi oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) STMIK Indonesia Banda Aceh.

Abstrak

Pengendalian suhu dan kelembapan pada greenhouse (rumah kaca) menjadi tantangan yang rumit karena sifat non-linier dan ketergantungan terhadap kondisi cuaca eksternal. Metode pengendalian konvensional kerap mengalami inefisiensi energi dan keterlambatan respons terhadap perubahan drastis. Studi mengusulkan pendekatan hibrida dengan mengombinasikan Long Short-Term Memory (LSTM) yang dioptimasi menggunakan Genetic Algorithm (GA) untuk prediksi suhu, dan Fuzzy Logic Controller (FLC) untuk pengambilan keputusan aktuator. Algoritma Genetika digunakan untuk mencari hiperparameter optimal (jumlah neuron dan batch size) pada arsitektur LSTM. Hasil eksperimen memperlihatkan kemampuan model GA-LSTM dalam memprediksi suhu dengan akurasi tinggi, menghasilkan skor R^2 sebesar 0,9881 dan Root Mean Square Error (RMSE) sebesar 1,1273°C. Prediksi akurat tersebut kemudian digunakan sebagai input pada FLC untuk mengatur kecepatan kipas (exhaust fan) dan status pompa kabut (mist pump). Simulasi memperlihatkan kemampuan sistem dalam mengambil keputusan efisien energi—mengaktifkan aktuator hanya ketika kondisi diprediksi menyimpang dari nilai ideal—sekaligus responsif terhadap anomali suhu ekstrem.

Kata Kunci: Greenhouse; Long Short-Term Memory (LSTM); Algoritma Genetika; Fuzzy Logic; Smart Farming.

Abstract

Controlling temperature and humidity in greenhouses is a complex challenge due to its non-linear nature and dependence on external weather conditions. Conventional control methods often experience energy inefficiency and delayed responses to drastic changes. This study proposes a hybrid approach by combining Long Short-Term Memory (LSTM) optimized using Genetic Algorithm (GA) for temperature prediction, and Fuzzy Logic Controller (FLC) for actuator decision-making. Genetic Algorithm is employed to find optimal hyperparameters (number of neurons and batch size) in the LSTM architecture. Experimental results demonstrate the GA-LSTM model's capability in predicting temperature with high accuracy, yielding an R^2 score of 0.9881 and Root Mean Square Error (RMSE) of 1.1273°C. These accurate predictions are subsequently used as input to the FLC to regulate exhaust fan speed and mist pump status. Simulations demonstrate the system's capability in making energy-efficient decisions—activating actuators only when conditions are predicted to deviate from ideal values—while remaining responsive to extreme temperature anomalies.

Keyword: Greenhouse; Long Short-Term Memory (LSTM); Genetic Algorithm; Fuzzy Logic; Smart Farming.

1. Pendahuluan

Pertanian modern berhadapan dengan tantangan yang makin rumit seiring meningkatnya kebutuhan pangan global, perubahan iklim, dan keterbatasan sumber daya alam. Untuk menjawab tantangan tersebut, konsep *precision agriculture* menjadi pendekatan utama yang menekankan pengelolaan lingkungan tumbuh secara presisi guna memaksimalkan produktivitas dan efisiensi sumber daya (Wardhani & Shafira, 2021). Salah satu implementasi utama dari konsep tersebut adalah penggunaan *greenhouse*, yang memungkinkan pengendalian parameter iklim mikro seperti suhu, kelembapan, dan intensitas cahaya secara lebih terkendali dibandingkan sistem pertanian terbuka (Ananda *et al.*, 2023). Namun, pengendalian iklim mikro pada *greenhouse* bukanlah permasalahan sederhana. Fluktuasi suhu ekstrem, baik akibat radiasi matahari berlebih maupun perubahan kondisi lingkungan eksternal, dapat menyebabkan stres fisiologis pada tanaman, menurunkan laju fotosintesis, serta berdampak langsung pada kualitas dan kuantitas hasil panen (Sari & Wibowo, 2025). Permasalahan utama yang kerap muncul pada sistem kendali konvensional adalah *time-lag* (jeda waktu) antara terdeteksinya perubahan suhu dan respons aktuator (Febriansyah, 2025). Ketika sistem pendingin diaktifkan setelah suhu melewati ambang batas, tanaman kerap telah mengalami stres termal yang tidak dapat dipulihkan secara instan.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, sistem kendali *greenhouse* perlu bertransformasi dari pendekatan reaktif menuju prediktif dan adaptif. Perkembangan pesat teknologi *Internet of Things* (IoT) membuka peluang besar untuk pengumpulan data lingkungan secara *real-time* dan berkelanjutan (Gong *et al.*, 2023). Sensor suhu, kelembapan, dan parameter lainnya yang terintegrasi dengan jaringan IoT memungkinkan pemetaan kondisi iklim mikro secara detail sekaligus menjadi fondasi penerapan sistem kendali cerdas berbasis data (Saha *et al.*, 2025). Beberapa studi memperlihatkan bahwa integrasi IoT dengan algoritma kecerdasan buatan mampu meningkatkan efisiensi operasional, mengurangi konsumsi energi, serta menjaga stabilitas lingkungan tumbuh secara lebih konsisten (Fincomess *et al.*, 2024; Subahi & Bouazza, 2020). Salah satu pendekatan kendali cerdas yang banyak digunakan pada sistem *greenhouse* adalah *Fuzzy Logic Controller* (FLC). FLC memiliki keunggulan dalam menangani sistem nonlinier dan ketidakpastian lingkungan karena prinsip kerjanya meniru cara manusia mengambil keputusan berdasarkan aturan linguistik (*if-then rules*) (Thomopoulos *et al.*, 2024). Berbagai penelitian membuktikan bahwa FLC efektif menjaga stabilitas suhu dan kelembapan *greenhouse*, baik pada skala prototipe maupun sistem nyata (Abdullah *et al.*, 2021; Qohar & Suharjito, 2022). Penerapan FLC pada sistem terisolasi cerdas bahkan memperlihatkan performa yang lebih stabil dibandingkan kendali berbasis PID konvensional, terutama pada kondisi lingkungan yang dinamis (Kurniawan, 2021; Riahi *et al.*, 2024).

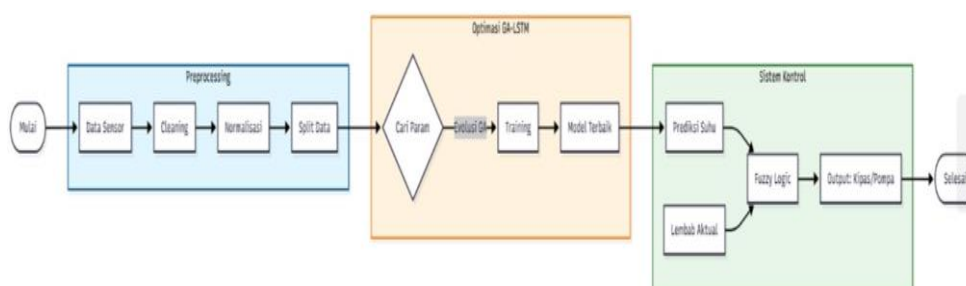
Namun, performa FLC sangat bergantung pada penentuan parameter dan aturan *fuzzy* yang tepat, seperti fungsi keanggotaan dan basis aturan. Penentuan parameter secara manual bersifat subjektif, memakan waktu, dan sulit diadaptasi terhadap kondisi lingkungan yang berubah-ubah. Karenanya, pendekatan hibrida yang mengombinasikan FLC dengan metode kecerdasan buatan lain mulai banyak dikembangkan. Algoritma optimasi seperti *Genetic Algorithm* (GA), *Genetic Programming*, dan *Neural Network* digunakan untuk meningkatkan kinerja sistem kendali dengan cara mengoptimalkan parameter *fuzzy* secara otomatis (Tian *et al.*, 2022). Penelitian Khafajeh *et al.* (2023) memperlihatkan bahwa penggunaan GA untuk optimasi sistem *fuzzy* pada *greenhouse* hidroponik mampu memberikan respons lebih cepat dan akurat dibandingkan pendekatan manual, khususnya dalam menghadapi fluktuasi suhu yang tajam. Namun, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada kendali berbasis kondisi saat terjadi (*current-state control*), tanpa mempertimbangkan aspek prediksi suhu jangka pendek secara eksplisit.

Dalam hal tersebut, model deret waktu berbasis *Long Short-Term Memory* (LSTM) menjadi relevan. LSTM merupakan varian *Recurrent Neural Network* (RNN) yang dirancang untuk menangkap ketergantungan jangka panjang pada data sekuensial, sehingga sesuai untuk memodelkan dinamika suhu yang bersifat temporal dan dipengaruhi oleh pola historis. Beberapa studi memperlihatkan keunggulan LSTM dalam memprediksi suhu lingkungan dibandingkan metode statistik konvensional

maupun model *machine learning* klasik. Namun, kinerja LSTM sangat sensitif terhadap pemilihan hiperparameter seperti jumlah neuron, *learning rate*, dan *window size* yang umumnya masih ditentukan melalui proses *trial-and-error*.

2. Metode Penelitian

Tahapan penelitian dirancang untuk membangun sistem kendali cerdas terintegrasi. Alur kerja sistem dimulai dari akuisisi data sensor, prapemrosesan data, optimasi model prediksi menggunakan Algoritma Genetika (GA-LSTM), hingga pengambilan keputusan kendali menggunakan *Fuzzy Logic*. Secara garis besar, arsitektur sistem yang diusulkan terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Blok Arsitektur Sistem Kendali Mikroklimat *greenhouse* berbasis *Hybrid GA-LSTM* dan *Fuzzy Logic*.

Dataset yang digunakan merupakan data sekunder publik yang diperoleh dari Kaggle, dipublikasikan oleh M. Boonman (2021). Dataset ("*Greenhouse sensor data 10 minute interval*") berisi log data lingkungan dengan interval 10 menit. Total data yang digunakan setelah pembersihan mencapai 12.069 sampel. Data dibagi menjadi 80% data latih dan 20% data uji. Model prediksi dibangun menggunakan *Long Short-Term Memory* (LSTM). Namun, kinerja LSTM sangat sensitif terhadap pemilihan hiperparameter. Karenanya, *Genetic Algorithm* (GA) diterapkan untuk mencari kombinasi optimal dari jumlah neuron dan ukuran *batch size*. Penggunaan algoritma evolusioner seperti GA pada sistem pertanian cerdas terbukti efektif menyelesaikan masalah optimasi yang rumit, seperti penempatan sensor maupun penyetapan parameter kendali, guna mencapai akurasi lebih tinggi dibandingkan metode *trial-and-error* (Ajani *et al.*, 2023). Khafajeh *et al.* (2023) juga memperlihatkan bahwa optimasi berbasis GA mampu meningkatkan presisi sistem kendali pada *greenhouse* hidroponik secara signifikan. Selain parameter yang dioptimasi oleh GA, parameter pelatihan lainnya ditetapkan secara konstan guna menjaga konsistensi. Detail konfigurasi pelatihan model terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Konfigurasi Hiperparameter Pelatihan Model

Parameter	Nilai/Keterangan
<i>Optimizer</i>	Adam (<i>Default Learning Rate</i> 0,001)
<i>Loss Function</i>	<i>Mean Squared Error</i> (MSE)
<i>Epoch</i>	20
<i>Activation Function</i>	Tanh (LSTM <i>Default</i>) & Linear (<i>Output</i>)
<i>Framework</i>	TensorFlow/Keras

Perancangan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) memanfaatkan keluaran prediksi suhu yang dihasilkan oleh model LSTM serta data kelembapan aktual sebagai variabel input utama. Pendekatan tersebut memungkinkan sistem kendali tidak hanya bereaksi terhadap kondisi lingkungan saat terjadi, tetapi juga mengantisipasi perubahan suhu yang akan terjadi. Metode inferensi Mamdani dipilih karena sifatnya yang intuitif dan kemampuannya meniru proses pengambilan keputusan manusia melalui

aturan linguistik berbasis *if-then*. Penerapan logika *fuzzy* pada pengendalian iklim mikro *greenhouse* dinilai sesuai mengingat karakteristik sistem biologi yang bersifat nonlinier, rumit, dan penuh ketidakpastian (Thomopoulos *et al.*, 2024). Selain itu, berbagai penelitian memperlihatkan bahwa strategi kendali berbasis *fuzzy* mampu memberikan respons lebih halus dan adaptif dibandingkan kendali konvensional berbasis ON/OFF, sehingga meningkatkan efisiensi energi dan stabilitas suhu, khususnya pada *greenhouse* dengan sistem isolasi termal cerdas (Al-Mahdi *et al.*, 2021). Logika keputusan sistem dirangkum pada Basis Aturan (*Rule Base*) dalam Tabel 2.

Tabel 2. Basis Aturan (*Rule Base*) Logika Keputusan Sistem

No	Suhu	Kelembapan	Kipas	Pompa
1	Dingin	Kering	OFF	OFF
2	Dingin	Basah	OFF	OFF
3	Normal	Kering	Lambat	ON
4	Normal	Ideal	OFF	OFF
5	Normal	Basah	Lambat	OFF
6	Panas	Kering	Cepat	ON
7	Panas	Basah	Sedang	OFF
8	Bahaya	Bahaya	Max	ON

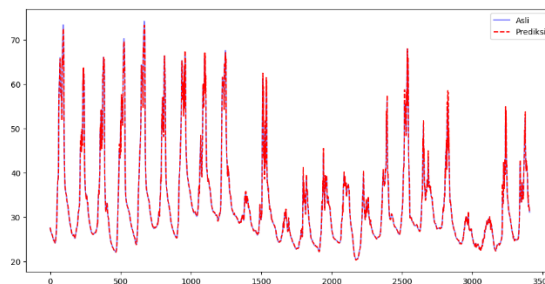
Input: Suhu (Dingin, Normal, Panas, Bahaya) dan Kelembapan (Kering, Ideal, Basah).
Output: Kecepatan Kipas (0–100%) dan Pompa (ON/OFF).

Skenario pengujian difokuskan pada validasi kinerja model prediksi suhu hibrida GA–LSTM. Dataset dibagi menjadi dua bagian, yaitu data latih sebesar 80% dan data uji sebesar 20%, guna memastikan model mampu mempelajari pola historis sekaligus diuji pada data yang belum pernah dilihat sebelumnya. Pada tahap pelatihan, model GA–LSTM dilatih untuk menangkap karakteristik temporal dan pola fluktuasi suhu dari data historis, sedangkan pada tahap pengujian, kemampuan generalisasi model dievaluasi melalui prediksi suhu terhadap data uji. Keberhasilan model diukur menggunakan dua metrik evaluasi utama, yaitu *Root Mean Square Error* (RMSE) dan koefisien determinasi (R^2). RMSE digunakan untuk mengukur rata-rata besaran kesalahan prediksi dalam satuan derajat Celsius ($^{\circ}\text{C}$), dengan nilai lebih kecil menunjukkan tingkat akurasi prediksi lebih tinggi. Sementara itu, nilai R^2 digunakan untuk menilai sejauh mana model mampu menjelaskan variabilitas data suhu aktual, dengan nilai mendekati satu mengindikasikan bahwa model memiliki tingkat presisi tinggi dalam mengikuti pola fluktuasi suhu.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil

Berdasarkan proses evolusi Algoritma Genetika, ditemukan parameter optimal berikut: jumlah neuron (*units*) sebesar 50 dan *batch size* sebesar 32. Konfigurasi tersebut menghasilkan konvergensi *loss* yang stabil selama pelatihan 20 *epoch*. Model GA-LSTM diuji menggunakan data uji (20% dari total dataset). Hasil evaluasi statistik memperlihatkan performa yang memuaskan dengan *Coefficient of Determination* (R^2) sebesar 0,9881 dan RMSE sebesar 1,1273 $^{\circ}\text{C}$. Nilai R^2 mendekati 1 memperlihatkan bahwa model mampu mempelajari 98,8% pola fluktuasi suhu pada *greenhouse*. Perbandingan suhu aktual dan prediksi model *Hybrid* GA-LSTM pada data uji terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Perbandingan Suhu Aktual dan Prediksi Model *Hybrid GA-LSTM* pada Data Uji.

Setelah akurasi model GA-LSTM tervalidasi, hasil prediksi suhu diintegrasikan ke dalam *Fuzzy Logic Controller* untuk menentukan aksi aktuator secara otomatis. Tabel 3 memperlihatkan sampel keputusan sistem berdasarkan hasil prediksi model pada data uji.

Tabel 3. Sampel Keputusan Kendali Berdasarkan Prediksi GA-LSTM

Prediksi Suhu (GA-LSTM)	Kelembapan Aktual	Keputusan Kipas (<i>Fan</i>)	Status Pompa (<i>Pump</i>)
27,60 °C (Normal)	49,00% (Kering)	29,7% (<i>Low</i>)	ON
35,80 °C (Panas)	35,00% (Kering)	50,0% (<i>Medium</i>)	ON
23,40 °C (Normal)	55,00% (Ideal)	0,0% (OFF)	OFF
31,00 °C (Panas)	80,00% (Basah)	64,5% (<i>High</i>)	OFF

Hasil simulasi pada Tabel 3 memperlihatkan kemampuan sistem menerjemahkan angka prediksi suhu menjadi tindakan nyata. Misalnya, saat suhu diprediksi naik ke 35,80 °C dengan kelembapan rendah, sistem secara proaktif menyalakan kipas pada kecepatan menengah dan mengaktifkan pompa untuk pendinginan evaporatif, mencegah tanaman dari layu.

3.2 Pembahasan

Hasil penelitian sejalan dengan teori pengendalian prediktif dan kecerdasan buatan pada sistem nonlinier, khususnya pada lingkungan *greenhouse* yang dinamis dan penuh ketidakpastian. Berdasarkan teori *time-series prediction*, model *Long Short-Term Memory* (LSTM) memiliki kemampuan unggul menangkap ketergantungan jangka pendek maupun jangka panjang pada data sekuensial, sehingga sesuai untuk memodelkan fluktuasi suhu lingkungan yang dipengaruhi oleh pola historis dan siklus harian. Nilai koefisien determinasi sebesar $R^2 = 0,9881$ dan RMSE sebesar 1,1273 °C yang diperoleh mengonfirmasi bahwa LSTM mampu merepresentasikan dinamika suhu *greenhouse* secara akurat, sebagaimana juga dilaporkan pada penelitian terdahulu terkait prediksi suhu lingkungan berbasis LSTM.

Penerapan *Genetic Algorithm* (GA) sebagai metode optimasi hiperparameter LSTM terbukti meningkatkan kinerja model secara signifikan. Secara teoretis, GA merupakan algoritma evolusioner yang efektif menyelesaikan permasalahan optimasi nonlinier dan ruang pencarian yang luas, dengan metode *trial-and-error* konvensional yang kerap tidak efisien. Temuan tersebut sejalan dengan penelitian Khafajeh *et al.* (2023) dan Ajani *et al.* (2023) yang menyatakan bahwa optimasi berbasis GA mampu meningkatkan akurasi dan stabilitas sistem cerdas pada *greenhouse*, baik untuk prediksi maupun pengendalian. Dengan kombinasi GA dan LSTM, model prediksi mampu mencapai konvergensi yang stabil dan performa konsisten pada data uji, memperlihatkan kemampuan generalisasi yang baik. Hasil perbandingan antara data suhu aktual dan hasil prediksi pada data uji (Gambar 2) memperlihatkan kemampuan model GA-LSTM mengikuti pola fluktuasi suhu dengan baik. Secara teoretis, kemampuan tersebut sangat penting pada sistem kendali prediktif karena kesalahan prediksi yang kecil memungkinkan sistem mengambil tindakan sebelum terjadi penyimpangan suhu yang signifikan.

Hal tersebut mendukung konsep *predictive control*, dengan pengambilan keputusan tidak hanya didasarkan pada kondisi saat terjadi, tetapi juga pada estimasi kondisi masa depan.

Integrasi hasil prediksi suhu ke dalam *Fuzzy Logic Controller* (FLC) juga sejalan dengan teori kendali *fuzzy* yang menekankan pendekatan berbasis penalaran manusia (*human-like reasoning*). Logika *fuzzy* sangat efektif menangani ketidakpastian dan non-linearitas sistem biologi, sebagaimana dijelaskan oleh Thomopoulos *et al.* (2024) dan Abdullah *et al.* (2021). FLC mampu menerjemahkan nilai numerik hasil prediksi suhu dan data kelembapan aktual menjadi keputusan aktuator yang proporsional dan kontekstual, tanpa bergantung pada ambang batas kaku seperti kendali ON/OFF. Hasil simulasi pengambilan keputusan memperlihatkan kemampuan sistem *fuzzy* menyesuaikan kecepatan kipas dan status pompa secara adaptif sesuai kondisi lingkungan. Temuan tersebut konsisten dengan penelitian Riahi *et al.* (2024) dan Qohar & Suharjito (2022) yang melaporkan bahwa kendali berbasis *fuzzy* menghasilkan respons lebih halus, stabil, dan efisien energi dibandingkan kendali konvensional. Dengan tidak mengaktifkan aktuator secara berlebihan pada kondisi normal, sistem yang diusulkan mendukung prinsip efisiensi energi dan keberlanjutan yang menjadi fokus utama pengembangan *greenhouse* cerdas modern. Hasil penelitian memperkuat temuan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa pendekatan hibrida berbasis kecerdasan buatan mampu meningkatkan kinerja sistem *greenhouse*. Kebaruan penelitian terletak pada integrasi prediksi suhu berbasis GA-LSTM dengan pengambilan keputusan berbasis *Fuzzy Logic*, sehingga sistem tidak hanya bersifat adaptif, tetapi juga prediktif. Pendekatan yang diusulkan tidak hanya mendukung teori yang ada, tetapi juga memperluas penerapannya pada pengendalian iklim mikro *greenhouse* yang lebih cerdas, responsif, dan efisien energi.

4. Kesimpulan

Penelitian berhasil mengembangkan sistem kendali iklim mikro cerdas terintegrasi untuk *greenhouse*. Penggunaan Algoritma Genetika terbukti efektif menyetel parameter LSTM, menghasilkan model prediksi yang presisi dengan RMSE sebesar 1,1273 °C dan R² sebesar 0,9881. Integrasi dengan *Fuzzy Logic* memungkinkan sistem merespons prediksi dengan tindakan aktuasi yang presisi dan efisien energi. Sistem berpotensi besar diterapkan pada *smart greenhouse* guna meningkatkan produktivitas tanaman secara otomatis dan responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan.

5. Daftar Pustaka

- Abdullah, N., Duran, N. A., & Shari, M. F. (2021). Towards smart agriculture monitoring using fuzzy systems. *IEEE Access*, 9, 4097–4111. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3041597>
- Ajani, O. S., Uyeh, D. D., Aboyeji, E., Ha, Y., & Mallipeddi, R. (2023). A genetic programming-based optimal sensor placement for greenhouse monitoring and control. *Frontiers in Plant Science*, 14, Article 1152036. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1152036>
- Al-Mahdi, M. I., Sofwan, A., & Sumardi. (2021). Perancangan sistem kontrol suhu lingkungan pada smart greenhouse menggunakan metode fuzzy logic Sugeno. *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 10(1), 244–251. <https://doi.org/10.14710/transient.v10i1.244-251>
- Ananda, Y., Ichsan, M. H. H., & Budi, A. S. (2023). Sistem kontrol dan monitoring prototype smart green house pada tanaman stroberi menggunakan logika fuzzy berbasis aplikasi Cayenne. *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, 7(2), 991–1002.

- Boonman, M. (2021). *Greenhouse sensor data (10 minute interval)* [Data set]. Kaggle. <https://www.kaggle.com/datasets/marcelboonman/greenhouse-sensor-data-10-minute-interval>
- Febriansyah, L. A. (2025). Implementasi fuzzy logic controller pada sistem kendali suhu dan kelembapan greenhouse tanaman stroberi. *Theta Omega: Journal of Electrical Engineering, Computer, and Information Technology*, 5(2).
- Finecomess, S. A., Gebresenbet, G., & Alwan, H. M. (2024). Utilizing an Internet of Things (IoT) device, intelligent control design, and simulation for an agricultural system. *Internet of Things*, 5(1), 57–78. <https://doi.org/10.3390/iot5010004>
- Gong, L., Yu, M., & Kollias, S. (2023). Optimizing crop yield and reducing energy consumption in greenhouse control using PSO-MPC algorithm. *Algorithms*, 16(5), Article 232. <https://doi.org/10.3390/a16050232>
- Khafajeh, H., Banakar, A., Minaei, S., & Delavar, M. (2023). A hydroponic greenhouse fuzzy control system: Design, development and optimization using the genetic algorithm. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 21(1), Article e0206. <https://doi.org/10.5424/sjar/2023211-19392>
- Kurniawan, D. (2021). Prototype of control and monitor system with fuzzy logic method for smart greenhouse. *Indonesian Journal of Information Systems*, 3(2), 116–127. <https://doi.org/10.24002/ijis.v3i2.4333>
- Qohar, A. L., & Suharjo. (2022). Smart agriculture for optimizing photosynthesis using internet of things and fuzzy logic. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 12(5), 5467–5480. <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i5.pp5467-5480>
- Riahi, J., Nasri, H., Mami, A., & Vergura, S. (2024). Effectiveness of the fuzzy logic control to manage the microclimate inside a smart insulated greenhouse. *Smart Cities*, 7(3), 1304–1329. <https://doi.org/10.3390/smartcities7030055>
- Saha, G., Shahrin, F., Khan, F. H., Meshkat, M. M., & Azad, A. A. M. (2025). Smart IoT-driven precision agriculture: Land mapping, crop prediction, and irrigation system. *PLOS ONE*, 20(3), Article e0319268. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0319268>
- Sari, I. Y., & Wibowo, A. (2025). Sistem kendali suhu greenhouse berbasis Arduino dengan metode histeresis dan override kelembapan tanah. *Jurnal Ilmiah MATRIK*, 27(3), 233–241.
- Subahi, A. F., & Bouazza, K. E. (2020). An intelligent IoT-based system design for controlling and monitoring greenhouse temperature. *IEEE Access*, 8, 125488–125500. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007955>
- Thomopoulos, V., Tolis, F., Blounas, T.-F., Tsiapanitis, D., & Kavga, A. (2024). Application of fuzzy logic and IoT in a small-scale smart greenhouse system. *Smart Agricultural Technology*, 8, Article 100446. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100446>
- Tian, J., Li, D., & Jia, X. (2022). IoT smart agriculture and agricultural product income insurance participant behavior based on fuzzy neural network. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, Article 4778975. <https://doi.org/10.1155/2022/4778975>

Wardhani, R. N., & Shafira, A. A. (2021). Pemodelan simulasi sistem kontrol temperatur berbasis fuzzy logic pada automatic greenhouse. Dalam *Seminar Nasional Teknik Elektro* (hlm. 208–215).