

Penerapan Fuzzy Logic Controller dalam Meningkatkan Efisiensi Energi Listrik pada Pengoperasian Air Conditioner berbasis IoT

Dahlan^{1*}, Rahmat Dani S², Muhammad Amirul Mu'min¹, Irma Eryanti Putri¹

¹ Ilmu Komputer, Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Muhammadiyah Bima, Bima, Indonesia

² Sistem Informasi, Ilmu Komputer, Universitas Megarezky Makassar, Makassar, Indonesia

Email Koresponden: dahlanlanggudu@gmail.com

(* : corresponding author)

Abstrak – Konsumsi energi listrik yang tinggi pada sistem penyejuk udara (Air Conditioner/ AC) masih menjadi tantangan utama dalam manajemen energi bangunan. Penelitian ini mengusulkan pengembangan sistem kendali AC berbasis Internet of Things (IoT) yang terintegrasi dengan Fuzzy Logic Controller (FLC) sebagai pendekatan adaptif untuk meningkatkan efisiensi energi. Penelitian ini terletak pada integrasi FLC yang diimplementasikan secara langsung pada mikrokontroler IoT dengan mekanisme pemantauan dan pencatatan data operasional secara real-time, sehingga evaluasi kinerja sistem berbasis data aktual penggunaan energi. Sistem menggunakan sensor suhu sebagai input utama yang diproses melalui aturan fuzzy untuk menghasilkan keputusan kendali yang menyesuaikan kondisi lingkungan secara dinamis. Pengujian dilakukan pada lingkungan ruangan tertutup dalam periode operasional dengan membandingkan konsumsi energi antara sistem kendali konvensional dan sistem yang diusulkan. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa penerapan FLC berbasis IoT mampu menurunkan konsumsi energi listrik hingga 28,8% tanpa mengurangi tingkat kenyamanan termal ruangan. Temuan ini menegaskan potensi pendekatan yang diusulkan sebagai solusi efektif untuk pengembangan sistem HVAC cerdas, serta dapat dikembangkan lebih lanjut dengan penambahan variabel lingkungan dan skala pengujian yang lebih luas. khususnya pada implementasi rumah pintar dan bangunan berenergi efisien.

Kata Kunci: Air Conditioner, Internet of Things, Fuzzy Logic Controller, Efisiensi Energi

Application of Fuzzy Logic Controller in Improving Electrical Energy Efficiency in IoT-Based Air Conditioner Operation

Abstract – High electricity consumption in air conditioning (AC) systems remains a major challenge in building energy management. This research proposes the development of an Internet of Things (IoT)-based air conditioning control system integrated with a Fuzzy Logic Controller (FLC) as an adaptive approach to improve energy efficiency. The research focuses on the direct implementation of the FLC on the IoT microcontroller, along with real-time monitoring and recording of operational data, allowing for system performance evaluation based on actual energy usage data. The system uses temperature sensors as the main input, which is processed thru fuzzy rules to generate control decisions that dynamically adjust to environmental conditions. Testing was conducted in a closed room environment during operational periods by comparing energy consumption between the conventional control system and the proposed system. The experimental results show that the application of IoT-based FLC is able to reduce electricity consumption by up to 28.8% without compromising the thermal comfort level of the room. These findings confirm the potential of the proposed approach as an effective solution for the development of intelligent HVAC systems, and it can be further developed by adding environmental variables and a wider testing scale. particularly in the implementation of smart homes and energy-efficient buildings.

Received	Revised	Published
06-11-2025	09-01-2026	22-01-2026

1. PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi informasi dan komunikasi telah mendorong integrasi sistem cerdas pada berbagai aspek kehidupan, khususnya dalam pengelolaan energi listrik [1]. Sistem penyejuk udara (Air Conditioner/AC) merupakan salah satu penyumbang utama konsumsi energi listrik baik pada bangunan komersial maupun rumah tinggal [2]. Pengoperasian AC yang tidak dikelola secara adaptif, terutama melalui pengendalian manual atau metode kontrol dasar hidup/mati, sering kali menyebabkan pemborosan energi karena tidak mempertimbangkan kondisi aktual ruangan. Kondisi ini menimbulkan kekhawatiran terkait peningkatan konsumsi energi listrik dan biaya operasional yang harus ditanggung oleh pengguna [3].

Internet of Things (IoT) sebagai paradigma teknologi yang menghubungkan perangkat fisik ke jaringan internet menawarkan peluang besar dalam pemantauan dan pengendalian perangkat secara real-time [4]. Dengan memanfaatkan sensor, mikrokontroler, dan jaringan komunikasi [5], sistem berbasis IoT mampu melakukan monitoring kondisi lingkungan serta pengendalian perangkat secara otomatis, sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi penggunaan energi [6], [7]. Variabel lingkungan seperti suhu ruangan, kelembapan, dan intensitas penggunaan dapat dipantau secara berkelanjutan untuk mendukung pengaturan operasi AC yang lebih responsif dan kontekstual [8]. Namun demikian, pemanfaatan IoT semata belum cukup untuk mencapai efisiensi energi yang optimal apabila tidak didukung oleh strategi kendali yang mampu mengolah data sensor secara cerdas dan adaptif [9].

Strategi kendali cerdas yang mampu menangani ketidakpastian dan dinamika lingkungan menjadi kebutuhan penting dalam sistem pengendalian AC [10]. Pengendali Logika Fuzzy (Fuzzy Logic Controller/FLC) banyak digunakan karena kemampuannya dalam memodelkan hubungan non-linear dan menghasilkan keputusan kontrol adaptif berdasarkan aturan linguistik yang menyerupai penalaran manusia [11], [12]. Implementasi FLC memungkinkan penyesuaian parameter operasi AC, seperti kecepatan kipas dan daya kompresor, sesuai dengan kondisi ruangan, sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi energi dibandingkan metode kontrol konvensional [13], [14].

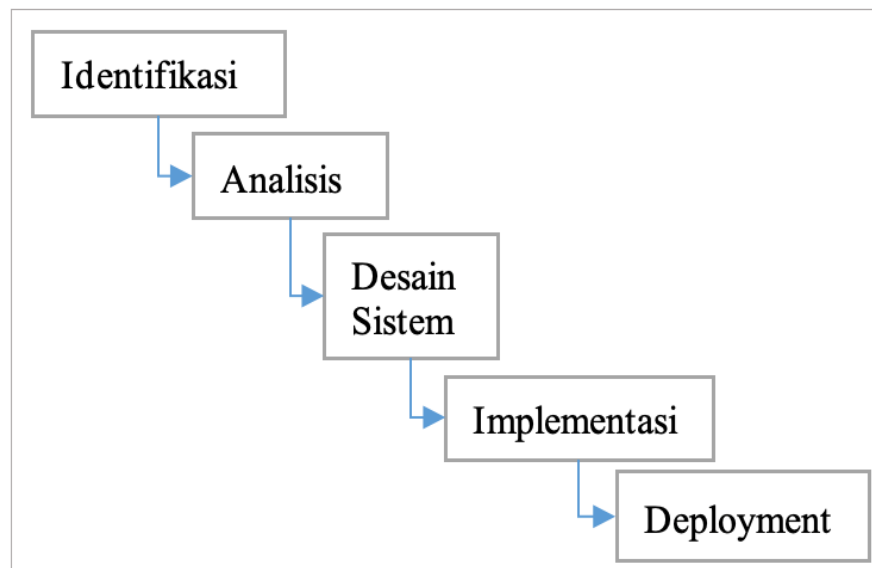
Beberapa penelitian sebelumnya telah melaporkan bahwa penerapan fuzzy logic pada sistem air conditioning maupun HVAC mampu meningkatkan efisiensi energi sekaligus mempertahankan kenyamanan termal pengguna [15]–[18]. Selain itu, integrasi IoT dengan FLC telah menunjukkan kemampuan dalam melakukan optimasi energi secara daring dan otomatis [19]. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada simulasi, memiliki keterbatasan dalam skala implementasi, atau belum mengevaluasi kinerja sistem berdasarkan data konsumsi energi listrik aktual dalam lingkungan operasional nyata [20], [21]. Keterbatasan ini menunjukkan adanya celah penelitian terkait implementasi langsung sistem kendali AC berbasis IoT dan FLC yang diuji secara empiris dengan pendekatan berbasis data nyata.

Berdasarkan celah penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem kendali Air Conditioner berbasis IoT yang terintegrasi dengan Fuzzy Logic Controller, serta mengevaluasi kinerjanya berdasarkan pengukuran konsumsi energi listrik aktual dan kenyamanan termal ruangan [22], [23]. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penerapan FLC secara langsung pada platform IoT dengan mekanisme

pemantauan dan pencatatan data real-time, sehingga memberikan bukti empiris mengenai potensi peningkatan efisiensi energi pada sistem AC dalam konteks penerapan rumah pintar.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian rekayasa dengan pendekatan eksperimental, yang bertujuan untuk merancang, mengimplementasikan, dan menguji kinerja sistem kendali Air Conditioner berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan Fuzzy Logic Controller (FLC). Pendekatan ini dipilih karena penelitian berfokus pada pengembangan sistem dan evaluasi kinerjanya dalam meningkatkan efisiensi penggunaan energi listrik.



Gambar 1. Waterfal Model Peneltian

Waterfal pada Gambar 1. Model penelitian disusun secara sistematis untuk menggambarkan urutan logis kegiatan penelitian, mulai dari identifikasi kebutuhan hingga deployment.

2.1 Analisis Spesifikasi Sistem

Analisis kebutuhan sistem merupakan tahap awal yang sangat penting dalam penelitian ini karena berfungsi untuk mengidentifikasi seluruh komponen dan fungsi yang diperlukan agar sistem kendali Air Conditioner (AC) berbasis Internet of Things (IoT) dengan Fuzzy Logic Controller (FLC) dapat bekerja secara optimal[1]. Analisis ini dilakukan untuk memastikan bahwa sistem yang dirancang mampu mencapai tujuan utama penelitian, yaitu meningkatkan efisiensi penggunaan energi listrik tanpa mengurangi kenyamanan termal pengguna. Secara umum, kebutuhan sistem pada penelitian ini dibagi menjadi kebutuhan fungsional dan non-fungsional, serta kebutuhan perangkat keras dan perangkat lunak.

Tabel 1. Kebutuhan Fungsional dan Non-Fungsional

No.	Kebutuhan Fungsional sistem	Kebutuhan Non-Fungsional Sistem
1.	Membaca dan memantau kondisi lingkungan ruangan secara real-time, khususnya suhu ruangan sebagai parameter utama pengendalian AC.	Keandalan sistem mampu bekerja secara stabil dalam jangka waktu tertentu tanpa gangguan.

2.	Mengolah data hasil pembacaan sensor untuk menentukan kondisi kendali yang sesuai menggunakan algoritma Fuzzy Logic Controller.	Responsivitas sistem mampu merespons perubahan kondisi suhu ruangan dengan cepat dan tepat.
3.	Mengendalikan operasi sistem secara otomatis berdasarkan hasil keputusan FLC, seperti pengaturan tingkat daya atau mode kerja AC.	Keamanan data dalam proses pengiriman data melalui jaringan internet.
4.	Mengirimkan data hasil pemantauan dan status kendali ke platform IoT untuk keperluan monitoring jarak jauh.	Skalabilitas sistem dapat dikembangkan untuk jumlah ruangan atau unit AC yang lebih banyak.
5.	Menyediakan informasi konsumsi energi listrik AC sebagai dasar evaluasi efisiensi energi.	Efisiensi sumber daya, penggunaan daya oleh sistem IoT tidak melebihi manfaat penghematan energi yang dihasilkan.

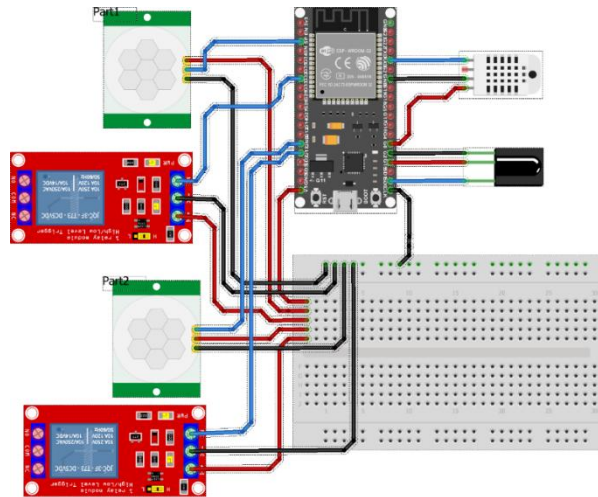
Tabel 2. Kebutuhan *Hardware* dan *Software*

No.	Kebutuhan Perangkat Keras (<i>Hardware</i>)	Kebutuhan Perangkat Lunak (<i>Software</i>)
1.	Mikrokontroler sebagai pusat pemrosesan data dan implementasi Fuzzy Logic Controller.	Program kendali pada mikrokontroler yang mengimplementasikan algoritma Fuzzy Logic Controller.
2.	Modul komunikasi IoT untuk pengiriman data ke cloud.	Sistem komunikasi data berbasis IoT untuk pengiriman dan penerimaan data.
3.	Sensor suhu untuk mengukur kondisi suhu ruangan secara akurat.	Platform monitoring berbasis website untuk visualisasi data suhu, status AC, dan konsumsi energi listrik.
4.	Catu daya dan media pengkabelan.	Sistem pencatatan data (data logging) untuk keperluan analisis dan evaluasi kinerja sistem.

Dengan melakukan analisis kebutuhan sistem secara menyeluruh, diharapkan sistem yang dirancang dapat bekerja sesuai dengan tujuan penelitian, yaitu menghasilkan pengendalian Air Conditioner yang cerdas, adaptif, dan efisien secara energi melalui integrasi IoT dan Fuzzy Logic Controller.

2.2 Siklus Pengembangan Sistem

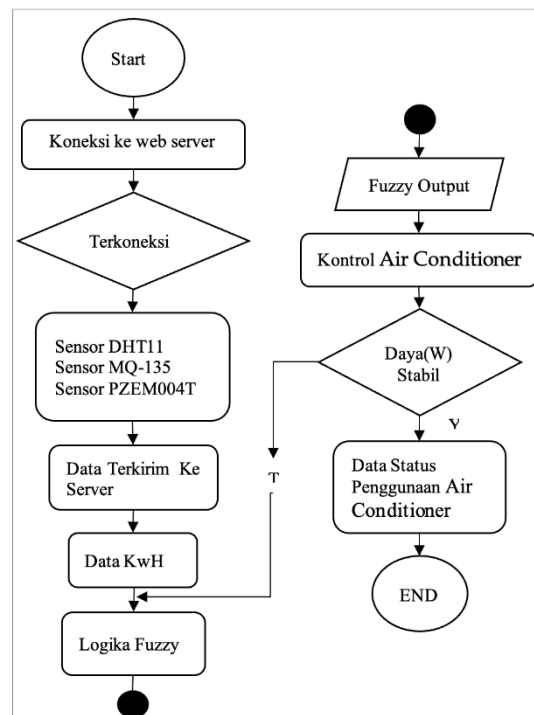
Perancangan arsitektur sistem IoT pada penelitian ini bertujuan untuk membangun sebuah sistem kendali Air Conditioner (AC) yang terintegrasi, adaptif, dan mampu melakukan pemantauan serta pengendalian secara real-time guna mengoptimalkan penggunaan energi listrik. Arsitektur sistem dirancang dengan pendekatan berlapis (*layered architecture*) agar setiap komponen memiliki fungsi yang jelas, mudah diintegrasikan, serta dapat dikembangkan di masa mendatang.



Gambar 2. Waterfal Model Peneltian

2.2.1 Flowchart Analisis Desain Sistem

Flowchart sistem menggambarkan proses kendali dan monitoring air conditioner berbasis keseimbangan suhu server dan ruangan menggunakan metode Fuzzy Logic dan Internet of Things (IoT) untuk penghematan energi listrik.



Gambar 3. Flowchart Analisis Sistem

2.3 Desain Fuzzy Logic Controller

Integrasi Fuzzy Logic Controller (FLC) dalam arsitektur Internet of Things (IoT) bertujuan untuk menggabungkan kemampuan pengambilan keputusan cerdas dengan sistem pemantauan dan kendali berbasis jaringan. Integrasi ini memungkinkan sistem Air Conditioner (AC) tidak hanya dapat dipantau secara real-time, tetapi juga mampu menyesuaikan kinerjanya secara adaptif untuk mengoptimalkan efisiensi penggunaan energi listrik.

2.3.1 Variabel Input dan Output FLC

Fuzzy Logic Controller (FLC) pada penelitian ini dirancang untuk mengendalikan operasi Air Conditioner secara adaptif berdasarkan kondisi lingkungan ruangan. Sistem FLC menggunakan dua variabel input utama, yaitu suhu ruangan dan status aktivitas penghuni, serta satu variabel output berupa tingkat kendali pendinginan AC. Rentang suhu ditentukan berdasarkan standar kenyamanan termal ruangan.

Tabel 3. Fungsi Keanggotaan Variabel Input Suhu Ruangan

No.	Himpunan Linguistik	Bentuk Fungsi	Rentang Nilai (°C)
1	Dingin	Trapeسيوم	18,20,22
2	Nyaman	Segitiga	22, 24, 26
3	Panas	Trapeسيوم	26, 28, 30

Tabel 4. Fungsi Keanggotaan Variabel Output Kendali AC

No.	Himpunan Linguistik	Bentuk Fungsi	Representasi Kendali
1	Rendah	Segitiga	Pendinginan minimum
2	Sedang	Segitiga	Pendinginan moderat
3	Tinggi	Segitiga	Pendinginan maksimum

2.3.2 Desain Fungsi Keanggotaan

Fungsi keanggotaan digunakan untuk memetakan nilai crisp dari sensor menjadi nilai linguistik fuzzy. Pada penelitian ini, fungsi keanggotaan berbentuk segitiga dan trapesium, variabel aktivitas diperoleh dari sensor PIR dan direpresentasikan secara biner untuk meningkatkan kecepatan respons sistem.

Tabel 5. Fungsi Keanggotaan Variabel Input Aktivitas

No.	Himpunan Linguistik	Bentuk Fungsi	Rentang Nilai (°C)
1	Tidak Ada Aktivitas	Singleton	0
2	Ada Aktivitas	Singleton	1

2.3.3 Basis Aturan Fuzzy

Basis aturan fuzzy disusun menggunakan pendekatan pengetahuan heuristik (expert knowledge) yang merepresentasikan logika pengambilan keputusan manusia dalam pengoperasian AC. Aturan fuzzy dirumuskan dalam bentuk IF-THEN sebagai berikut:

Tabel 6. Fungsi Keanggotaan Variabel Input Aktivitas

No.	Suhu Ruangan	Aktivitas Penghuni	Kendali AC
1	Dingin	Tidak Ada Aktivitas	Rendah
2	Dingin	Ada Aktivitas	Rendah
3	Nyaman	Tidak Ada Aktivitas	Rendah
4	Nyaman	Ada Aktivitas	Sedang
5	Panas	Tidak Ada Aktivitas	Sedang
6	Panas	Ada Aktivitas	Tinggi

2.4 Deployment

Tahap deployment merupakan tahap implementasi akhir dari sistem yang telah dirancang, di mana seluruh komponen perangkat keras dan perangkat lunak diintegrasikan dan diterapkan pada lingkungan nyata. Tujuan utama tahap ini adalah memastikan bahwa sistem Air Conditioner (AC) berbasis Internet of Things (IoT) dengan Fuzzy Logic Controller (FLC) dapat beroperasi secara optimal dalam kondisi penggunaan sebenarnya serta mampu menghasilkan data yang valid untuk keperluan pengujian dan evaluasi efisiensi energi listrik.

Deployment dilakukan pada sebuah ruangan uji yang menggunakan unit Air Conditioner sebagai objek penelitian, dengan mempertimbangkan kondisi lingkungan yang merepresentasikan penggunaan AC sehari-hari.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil implementasi menunjukkan bahwa sistem Air Conditioner (AC) berbasis Internet of Things (IoT) dengan Fuzzy Logic Controller (FLC) berhasil dibangun dan beroperasi sesuai dengan perancangan. Seluruh komponen sistem, mulai dari sensor, mikrokontroler, modul komunikasi IoT, hingga aktuator, dapat bekerja secara terintegrasi. Sistem mampu melakukan pemantauan suhu ruangan secara real-time, memproses data menggunakan FLC, serta mengendalikan operasi AC secara otomatis.

Platform IoT yang digunakan juga berhasil menampilkan data suhu ruangan, status kerja AC, dan informasi konsumsi energi listrik secara daring, sehingga pengguna dapat memantau kinerja sistem secara jarak jauh.

3.1 Hasil Pengujian Kinerja Fuzzy Logic Controller

Pengujian Fuzzy Logic Controller dilakukan dengan membandingkan respons sistem terhadap perubahan suhu ruangan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa FLC mampu menghasilkan keputusan kendali yang adaptif sesuai dengan kondisi lingkungan. Ketika suhu ruangan berada jauh di atas setpoint, sistem meningkatkan intensitas kerja AC, sedangkan ketika suhu mendekati setpoint, sistem menurunkan tingkat kerja AC secara bertahap.

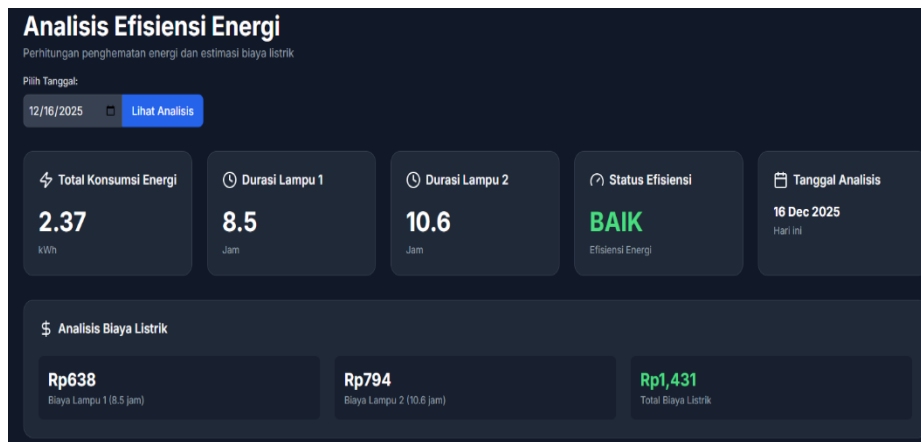


Gambar 4. Dashboard Sistem

Pendekatan ini menghasilkan pengendalian yang lebih halus dibandingkan metode kendali konvensional berbasis on/off, sehingga mengurangi fluktuasi kerja kompresor dan konsumsi energi listrik yang tidak perlu.

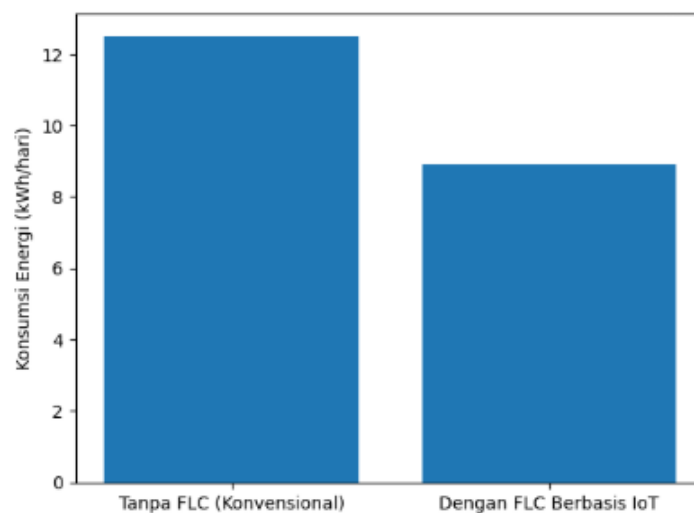
3.2 Analisis Efisiensi Penggunaan Energi Listrik

Hasil pengukuran konsumsi energi listrik menunjukkan adanya perbedaan signifikan antara sistem AC tanpa kendali FLC dan sistem AC dengan kendali FLC berbasis IoT. Pada sistem konvensional, AC cenderung bekerja pada kondisi daya maksimum dalam waktu yang lebih lama. Sebaliknya, pada sistem yang menggunakan FLC, daya kerja AC dapat disesuaikan dengan kebutuhan pendinginan ruangan.



Gambar 5. Dashboard Analisis Sistem

Data hasil pengujian memperlihatkan bahwa penerapan FLC mampu menurunkan konsumsi energi listrik secara keseluruhan, yang ditunjukkan oleh berkurangnya waktu kerja AC pada kondisi daya tinggi. Hal ini membuktikan bahwa sistem yang dikembangkan mampu mengoptimalkan penggunaan energi listrik tanpa mengorbankan kenyamanan termal pengguna.



Gambar 6. Grafik Perbandingan Pengujian

Gambar 6 menunjukkan bahwa konsumsi energi listrik pada sistem AC konvensional lebih tinggi dibandingkan dengan sistem AC yang menggunakan Fuzzy Logic Controller berbasis IoT. Penurunan konsumsi energi terjadi karena FLC mampu menyesuaikan tingkat kerja AC secara dinamis sesuai kondisi suhu ruangan, sehingga menghindari operasi AC pada daya maksimum secara terus-menerus.

$$\text{Efisiensi Energi (\%)} = \frac{E_{\text{konvensional}} - E_{\text{FCL}}}{E_{\text{konvensional}}} \times 100 = \frac{12,5 - 8,9}{12,5} \times 100\% = 28,8\% \quad (1)$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa penerapan Fuzzy Logic Controller berbasis IoT mampu menghemat energi listrik sebesar $\pm 28,8\%$ dibandingkan sistem AC konvensional. Hal ini membuktikan bahwa sistem yang dikembangkan efektif dalam mengoptimalkan penggunaan energi listrik.

3.3 Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem Air Conditioner berbasis Internet of Things (IoT) dengan integrasi Fuzzy Logic Controller (FLC) berfungsi secara stabil dan mampu menurunkan konsumsi energi listrik secara signifikan. Penurunan konsumsi energi sebesar 28,8% yang diperoleh pada penelitian ini sejalan dengan temuan penelitian sebelumnya yang melaporkan efisiensi energi antara 15–30% pada sistem HVAC berbasis fuzzy logic maupun kontrol cerdas lainnya. Sebagai contoh, penelitian oleh Ferreira dan Ruano serta Dounis dan Caraiscos menunjukkan bahwa penerapan FLC mampu mengurangi konsumsi energi tanpa mengorbankan kenyamanan termal, meskipun sebagian besar studi tersebut masih berfokus pada simulasi atau sistem tanpa integrasi IoT secara penuh. Dibandingkan dengan pendekatan tersebut, penelitian ini memberikan kontribusi tambahan melalui implementasi langsung FLC pada platform IoT dengan pemantauan dan pencatatan data konsumsi energi secara real-time, sehingga evaluasi kinerja didasarkan pada data empiris dari lingkungan operasional nyata.

Penyajian hasil dalam bentuk tabel, grafik konsumsi energi, dan dashboard pemantauan memperjelas perbedaan performa antara sistem kendali konvensional dan sistem yang diusulkan. Integrasi IoT memungkinkan visualisasi data yang berkelanjutan serta mendukung analisis perilaku konsumsi energi dalam jangka waktu tertentu, yang jarang dibahas secara rinci pada penelitian terdahulu. Dari sisi implikasi, temuan ini menunjukkan bahwa kombinasi FLC dan IoT berpotensi menjadi solusi praktis untuk pengelolaan energi pada sistem HVAC cerdas, khususnya pada lingkungan rumah pintar dan bangunan berskala kecil hingga menengah, di mana kebutuhan efisiensi energi dan kemudahan pemantauan menjadi prioritas.

Meskipun demikian, hasil penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan. Pengujian dilakukan pada skala ruangan terbatas dengan jumlah variabel input FLC yang relatif sederhana, sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan kompleksitas kondisi bangunan yang lebih besar. Selain itu, perbandingan kinerja masih difokuskan pada sistem kendali konvensional berbasis on/off, tanpa evaluasi terhadap metode kontrol cerdas lain seperti PID adaptif atau pembelajaran mesin. Oleh karena itu, penelitian lanjutan dapat diarahkan pada pengujian pada skala bangunan yang lebih luas, penambahan variabel seperti kelembapan dan jumlah penghuni, serta analisis komparatif dengan pendekatan kontrol cerdas lainnya untuk memperoleh gambaran kinerja sistem yang lebih komprehensif.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini mengajukan dan memvalidasi sistem kendali Air Conditioner berbasis Internet of Things (IoT) yang terintegrasi dengan Fuzzy Logic Controller (FLC) untuk meningkatkan efisiensi penggunaan energi listrik. Kontribusi utama penelitian terletak pada penerapan kendali adaptif berbasis logika fuzzy yang memanfaatkan data suhu dan kelembapan secara real-time, sehingga mampu mengakomodasi ketidakpastian kondisi lingkungan dan menghasilkan keputusan pengendalian yang lebih responsif dibandingkan metode konvensional. Hasil implementasi menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan

mampu menurunkan konsumsi energi listrik hingga sekitar 28,8% tanpa mengorbankan kenyamanan termal ruangan. Secara teoretis, temuan ini memperkuat peran FLC sebagai pendekatan kendali non-linear yang efektif untuk sistem HVAC berbasis IoT, khususnya dalam skenario dengan dinamika lingkungan yang berubah-ubah. Integrasi sensor kelembapan memberikan peningkatan akurasi pengendalian serta memperluas kajian terdahulu yang umumnya masih berfokus pada parameter suhu tunggal.

Dari sisi aplikatif, arsitektur sistem yang diusulkan memiliki potensi implementasi pada lingkungan rumah pintar dan bangunan cerdas skala kecil hingga menengah, didukung oleh kemampuan pemantauan dan pencatatan data secara online. Keterbatasan penelitian ini terletak pada skala pengujian yang masih terbatas dan variabel input yang belum mencakup faktor okupansi. Penelitian selanjutnya disarankan untuk memperluas skala implementasi, menambahkan parameter lingkungan dan perilaku pengguna, serta melakukan perbandingan dengan metode kendali berbasis pembelajaran mesin.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. E. Agency, *Energy Efficiency 2023*. Paris: IEA, 2023.
- [2] ASHRAE, *ASHRAE Handbook – HVAC Systems and Equipment*. Atlanta: ASHRAE, 2020.
- [3] K. K. dan Informatika, *Pedoman Implementasi Internet of Things di Indonesia*. Jakarta: Kominfo, 2023.
- [4] J.-H. Han, C.-S. Choi, W.-K. Park, I.-W. Lee, and S.-H. Kim, "Smart home energy management system including renewable energy based on ZigBee and PLC," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 60, no. 2, pp. 198–202, 2014.
- [5] Z. Alamin, Khaeruddin, and Dahlan, "Sistem Penerangan Jalan Cerdas Berbasis Energi Surya dan IoT dengan Komunikasi LoRa," *Jurnal Pengembangan Sains dan Teknologi*, vol. 1, no. 2, pp. 69–79, Jun. 2025, doi: 10.63866/jpst.v1i2.78.
- [6] D. Dahlan, Y. Yuyun, and S. Sahibu, "Electronic Equipment Power Usage Control and Monitoring System in the Home Internet Of Things (IOT) Based," *Journal of System and Computer Engineering (JSCE)*, vol. 6, no. 1, pp. 90–100, Jan. 2025, doi: 10.61628/jsce.v6i1.1613.
- [7] S. E. Board, "Advancing machine learning strategies for power and energy management systems," *Sensors*, vol. 25, no. 4, p. 2101, 2025.
- [8] Y. M. Banad, "Artificial intelligence and machine learning for smart grids," *Energy Reports*, vol. 11, pp. 1123–1140, 2025.
- [9] V. C. Gungor, "Smart grid technologies: Communication technologies and standards," *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 7, no. 4, pp. 529–539, 2013.
- [10] Y. Chen, P. Xu, J. Gu, F. Schmidt, and W. Li, "Measures to improve energy demand flexibility in buildings for demand response," *Energy Build*, vol. 43, no. 10, pp. 2625–2634, 2011.
- [11] T. J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. Wiley, 2010.
- [12] A. I. Dounis and C. Caraiscos, "Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment – A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 6–7, pp. 1246–1261, 2009.
- [13] X. Li, J. Wen, and J. Hu, "Energy-efficient HVAC control using deep reinforcement learning," *Energy Build*, vol. 172, pp. 415–427, 2018.
- [14] R. Yang and L. Wang, "Development of multi-agent system for building energy and comfort management," *Energy Build*, vol. 56, pp. 1–7, 2013.
- [15] J. Kim and J. E. Braun, "Reduced-order building modeling for real-time control," *ASHRAE Trans*, vol. 118, no. 1, pp. 473–485, 2012.
- [16] P. Ferreira and A. Ruano, "Energy management in HVAC systems using fuzzy logic," *Energy Build*, vol. 89, pp. 192–202, 2015.
- [17] M. W. Ahmad, M. Mourshed, and Y. Rezugui, "Trees vs Neurons: Comparison between random forest and ANN for high-resolution prediction of building energy consumption," *Energy Build*, vol. 147, pp. 77–89, 2016.
- [18] H.-X. Zhao and F. Magoulès, "A review on the prediction of building energy consumption," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 6, pp. 3586–3592, 2012.

- [19] D. Kolokotsa, "The role of smart grids in the building sector," *Energy Build*, vol. 116, pp. 703–708, 2016.
- [20] P. Palensky and D. Dietrich, "Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads," *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 7, no. 3, pp. 381–388, 2011.
- [21] S. Wang and Z. Ma, "Supervisory and optimal control of building HVAC systems: A review," *HVAC&R Res*, vol. 14, no. 1, pp. 3–32, 2008.
- [22] P. H. Shaikh, N. B. M. Nor, P. Nallagownden, I. Elamvazuthi, and T. Ibrahim, "A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 34, pp. 409–429, 2014.
- [23] T. Wei, Q. Zhu, and F. R. Yu, "Proactive demand participation of smart buildings in smart grid," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 7, no. 3, pp. 1411–1422, 2016.
- [24] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, 1965.