

Implementasi Fuzzy Sugeno Berbasis IoT untuk Monitoring Energi Listrik pada Gedung Lembaga Pelatihan Kerja Panji Sakti

Raindra Pramathana^{a1}, I Ketut Gede Suhartana^{a2}, I Made Widiartha^{a3}, I Gusti Ngurah Anom Cahyadi Putra^{a4}

^aProgram Studi Informatika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Udayana

Jl. Raya Kampus Unud, Jimbaran, Kec. Kuta Sel., Kabupaten Badung, Bali

¹raindrapramathana117@student.unud.ac.id

²ikg.suhartana@unud.ac.id

³madewidiartha@unud.ac.id

⁴anom.cp@unud.ac.id

Abstract

The increasing consumption of electrical energy in buildings requires a monitoring system capable of providing accurate and real-time information to support efficient energy management. This study aims to develop an Internet of Things (IoT)-based electrical energy monitoring system using the Zero-Order Sugeno Fuzzy method to classify electrical load conditions at the Panji Sakti Vocational Training Center Building. The proposed system utilizes an ESP32 microcontroller integrated with SCT-013 current sensors and ZMPT101B voltage sensors to acquire measurement data, which are transmitted to a cloud database and visualized through a web-based monitoring platform. System performance was evaluated using 30 measurement samples by comparing sensor readings with a Habotest HT206D digital multimeter as the reference instrument. The experimental results show average measurement errors of 1.9% for voltage and 2.0% for current, corresponding to measurement accuracies of 98% and 97%, respectively. Furthermore, the implemented Zero-Order Sugeno Fuzzy method successfully classified electrical load conditions into underload, normal, and overload categories with 100% agreement compared to manual classification based on the predefined rule base. These results indicate that the proposed system is capable of monitoring electrical parameters and classifying load conditions accurately in real time, making it a practical solution for supporting energy management in educational buildings.

Keywords: IoT, Arduino, Fuzzy Logic, Monitoring, Electricity, Website

1. Pendahuluan

Peningkatan konsumsi energi listrik di Indonesia menuntut pengelola gedung untuk melakukan efisiensi guna menekan biaya operasional dan dampak lingkungan (Buana & Hidayat, 2024; Putri dkk., 2024; Prastika, 2023; Rizki, 2024). Urgensi ini juga terjadi di Gedung Lembaga Pelatihan Kerja (LPK) Panji Sakti. Gedung dengan karakteristik beban listrik tiga fasa ini memiliki jam operasional yang dinamis, dimana lonjakan energi terjadi pada jam kelas berlangsung.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, pemantauan karakteristik beban listrik secara real-time menjadi kebutuhan mendesak. Penggunaan teknologi Internet of Things (IoT) menawarkan solusi pemetaan pola konsumsi secara presisi dan berkelanjutan (Hadi et al., 2022; Muzakir, 2023). Meskipun IoT mampu mengumpulkan data secara real-time, tantangan utamanya adalah mengelola data yang besar dan kompleks tersebut secara cerdas (Adha Alfian dkk., 2023).

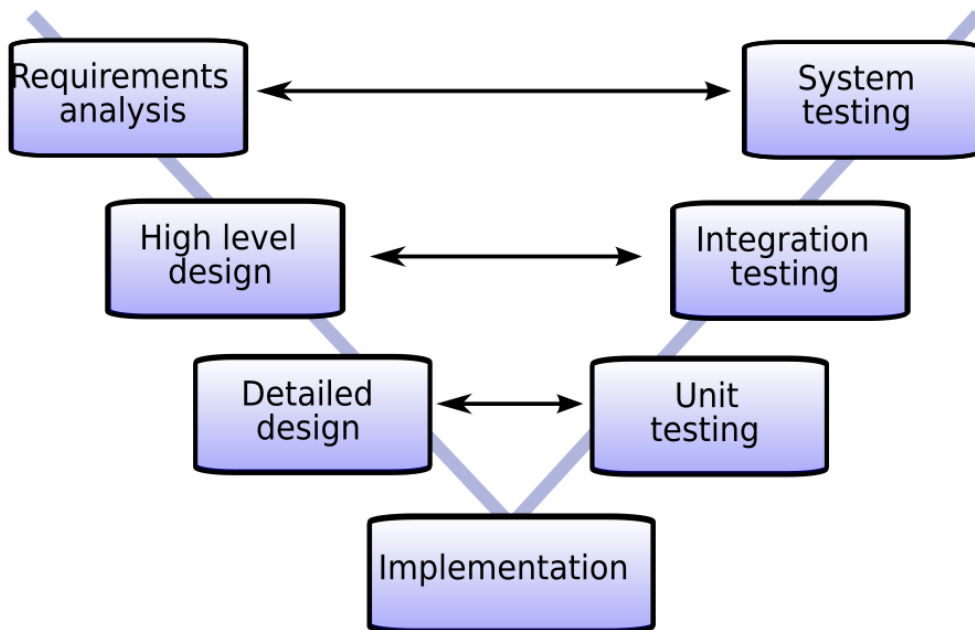
Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan sistem monitoring energi listrik berbasis IoT yang diintegrasikan dengan metode logika fuzzy. Logika fuzzy dipilih karena kemampuannya

menangani ketidakpastian data kelistrikan dan menerjemahkan variabel linguistik secara fleksibel (Yohandrik dkk., t.t.). Dalam penelitian ini, logika fuzzy digunakan untuk mengolah data arus dan tegangan guna mengklasifikasikan kondisi operasional beban listrik secara adaptif. Melalui sistem ini, diharapkan pengelola LPK Panji Sakti dapat mengambil keputusan yang tepat untuk meningkatkan efisiensi energi tanpa mengorbankan kenyamanan belajar-mengajar.

2. Metode Penelitian

2.1 Model Pengembangan Sistem

Pengembangan sistem dalam penelitian ini menggunakan model System Development Life Cycle (SDLC) dengan pendekatan V-Model, yang menekankan keterkaitan antara tahap pengembangan dan tahap pengujian secara paralel. Model ini menggambarkan bahwa setiap fase dalam proses pengembangan sistem disertai dengan aktivitas verifikasi dan validasi untuk menjamin kualitas perangkat lunak sejak tahap awal hingga tahap akhir. Pada sisi kiri V-Model terdapat tahapan perencanaan, analisis kebutuhan, serta perancangan sistem, sedangkan sisi kanan merepresentasikan tahapan pengujian yang dilaksanakan secara selaras dengan proses pengembangan tersebut (McKerahan, 2022).

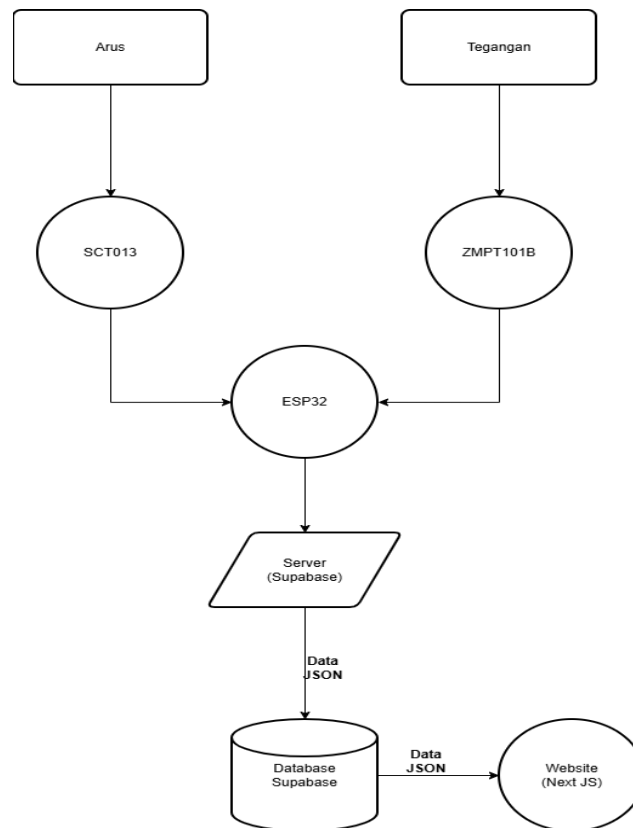


Gambar 1. Sistem V-Model

2.2 Perancangan Sistem

Sistem yang dikembangkan terdiri atas beberapa komponen utama yang saling terintegrasi, yaitu sensor SCT-013 dan ZMPT101B sebagai perangkat akuisisi data, ESP32 sebagai unit

pemrosesan, Supabase sebagai basis data berbasis cloud, serta website monitoring sebagai antarmuka pengguna untuk menampilkan informasi penggunaan energi listrik secara real-time.



Gambar 2. Cara Kerja Sistem Secara Umum

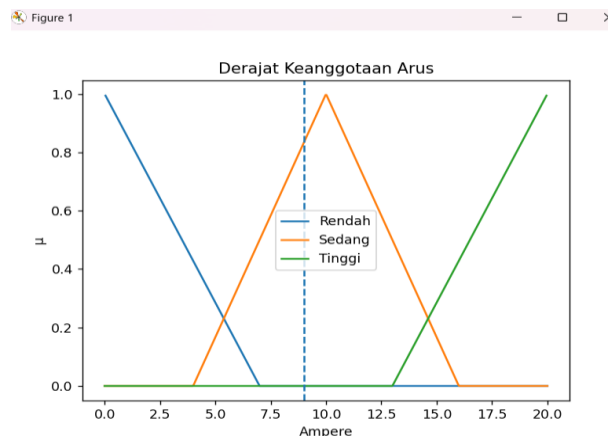
Proses akuisisi data dimulai dari pembacaan nilai arus dan tegangan oleh sensor yang terhubung dengan ESP32. Mikrokontroler kemudian melakukan pengolahan awal dan mengirimkan data dalam format JSON menuju layanan Supabase melalui REST API untuk disimpan pada basis data PostgreSQL. Website monitoring yang dikembangkan menggunakan Next.js memanfaatkan data tersebut untuk menyajikan informasi penggunaan energi listrik secara real-time melalui tampilan grafik, data pengukuran, serta fitur notifikasi apabila terjadi kondisi tertentu pada sistem kelistrikan.

2.3 Fuzzy Logic

Sistem pengambilan keputusan pada penelitian ini menerapkan metode Fuzzy Sugeno Orde 0 untuk mengklasifikasikan kondisi beban listrik berdasarkan nilai arus dan tegangan yang diperoleh dari sensor SCT-013 dan ZMPT101B. Metode Sugeno dipilih karena menghasilkan keluaran berupa nilai konstan (crisp output) pada setiap aturan (rule), sehingga proses inferensi memiliki kompleksitas komputasi yang lebih rendah dibandingkan metode Fuzzy Mamdani [1], [2]. Karakteristik tersebut menjadikan metode Sugeno sesuai untuk sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) yang dijalankan pada mikrokontroler ESP32, karena mampu melakukan proses klasifikasi secara cepat dengan kebutuhan sumber daya komputasi yang relatif kecil [3], [4]. Selain itu, keluaran numerik yang dihasilkan metode Sugeno memudahkan integrasi dengan sistem monitoring berbasis web untuk menampilkan kondisi beban listrik secara real-time [2], [3].

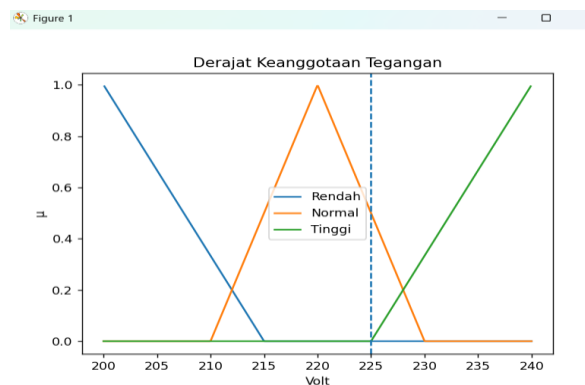
Penelitian ini menggunakan parameter arus dan tegangan sebagai variabel masukan pada sistem fuzzy karena kedua parameter tersebut merupakan indikator utama dalam merepresentasikan kondisi operasional sistem kelistrikan. Nilai arus menggambarkan besarnya beban listrik yang sedang digunakan, sedangkan nilai tegangan menunjukkan kestabilan suplai listrik terhadap beban yang terhubung. Kombinasi kedua parameter tersebut dinilai mampu memberikan informasi yang memadai untuk mengidentifikasi kondisi underload, normal, maupun

overload tanpa meningkatkan kompleksitas komputasi pada perangkat IoT [5], [6]. Selain mempertimbangkan representasi kondisi kelistrikan, penggunaan dua variabel masukan ini juga mendukung proses fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi agar dapat dijalankan secara efisien sehingga memenuhi kebutuhan sistem monitoring yang bekerja secara real-time [3], [6]. Penentuan batas pada fungsi keanggotaan arus dan tegangan dilakukan dengan mempertimbangkan karakteristik instalasi listrik di Gedung LPK Panji Sakti, hasil observasi awal terhadap rentang data pengukuran, serta nilai tegangan nominal sistem kelistrikan. Rentang keanggotaan dirancang agar mampu membedakan kondisi beban underload, normal, dan overload secara bertahap tanpa menghasilkan perubahan klasifikasi yang terlalu sensitif terhadap fluktuasi kecil pada hasil pengukuran. Dengan pendekatan tersebut, proses inferensi Fuzzy Sugeno dapat memberikan klasifikasi kondisi beban yang lebih stabil dan sesuai dengan kondisi operasional sistem. Berikut gambar Fungsi keanggotaan Arus dan Tegangan:



Gambar 3. Grafik Fungsi Keanggotaan untuk Variabel Arus

Tegangan :



Gambar 4. Grafik Fungsi Keanggotaan untuk Variabel Tegangan

Batas fungsi keanggotaan pada variabel arus dan tegangan ditentukan berdasarkan karakteristik operasi instalasi listrik di Gedung LPK Panji Sakti serta mempertimbangkan tegangan nominal sistem dan rentang arus hasil pengukuran selama tahap observasi awal. Pemilihan batas tersebut bertujuan agar proses klasifikasi mampu merepresentasikan kondisi underload, normal, dan overload secara proporsional tanpa menghasilkan perubahan kategori yang terlalu sensitif terhadap fluktuasi kecil pada data pengukuran.

Pembentukan rule base dilakukan menggunakan aturan IF–THEN yang menghubungkan kombinasi kondisi arus dan tegangan terhadap kategori beban listrik. Karena masing-masing variabel masukan terdiri atas tiga himpunan linguistik, yaitu underload, normal, dan overload,

maka kombinasi kedua variabel menghasilkan sembilan aturan inferensi yang mampu merepresentasikan seluruh kemungkinan kondisi operasi sistem [11], [12]. Aturan-aturan tersebut disusun berdasarkan karakteristik penggunaan energi listrik pada Gedung LPK Panji Sakti serta mempertimbangkan prinsip dasar instalasi kelistrikan, yaitu bahwa peningkatan arus umumnya menunjukkan peningkatan beban listrik, sedangkan tegangan digunakan sebagai parameter pendukung untuk menggambarkan kestabilan suplai listrik [9], [13]. Dengan demikian, setiap aturan dirancang untuk menghasilkan klasifikasi kondisi beban yang konsisten terhadap perubahan nilai pengukuran yang diterima dari sensor.

Sebagai contoh, apabila nilai arus dan tegangan sama-sama berada pada kategori normal, maka sistem akan mengklasifikasikan kondisi beban sebagai normal. Sebaliknya, apabila arus berada pada kategori overload, sistem akan memberikan kecenderungan keluaran menuju kondisi overload meskipun tegangan masih berada pada rentang normal. Pendekatan ini memungkinkan sistem memberikan klasifikasi yang lebih adaptif dibandingkan penggunaan nilai ambang (threshold) tetap [13], [14].

Tabel 1. Rule Base untuk Klasifikasi Beban Listrik

No.	Arus	Tegangan	Output
R1	Underload	Rendah	Underload
R2	Underload	Normal	Underload
R3	Underload	Tinggi	Underload
R4	Normal	Rendah	Normal
R5	Normal	Normal	Normal
R6	Normal	Tinggi	Normal
R7	Overload	Rendah	Overload
R8	Overload	Normal	Overload
R9	Overload	Tinggi	Overload

Seluruh aturan pada rule base dievaluasi secara bersamaan pada proses inferensi menggunakan operator minimum (MIN) untuk memperoleh nilai firing strength masing-masing aturan. Nilai firing strength tersebut menunjukkan tingkat aktivasi setiap aturan berdasarkan derajat keanggotaan variabel masukan dan selanjutnya digunakan pada proses defuzzifikasi metode Sugeno Orde 0 [1], [2]. Metode weighted average dipilih karena merupakan mekanisme defuzzifikasi yang secara langsung terintegrasi dengan model Sugeno dan memiliki kompleksitas komputasi yang lebih rendah dibandingkan metode centroid yang umum digunakan pada Fuzzy Mamdani [2], [12]. Karakteristik tersebut mendukung implementasi sistem pada perangkat IoT berbasis ESP32 yang membutuhkan proses komputasi cepat agar hasil klasifikasi dapat diperoleh dan dikirimkan ke sistem monitoring secara real-time [3], [4].

Proses mengubah himpunan Fuzzy menjadi nilai tegas, dengan menggunakan metode weighted average:

$$y = \frac{\sum (\alpha_i \times z_i)}{\sum \alpha_i}$$

Dimana:

1. y adalah nilai tegas dari hasil defuzzifikasi
2. α_i derajat aktivasi aturan ke- i
3. z_i konstanta keluaran aturan ke- i

Metode ini menghasilkan nilai keluaran yang tegas, stabil, dan efisien secara komputasi, sehingga sangat sesuai untuk sistem monitoring energi listrik gedung berbasis IoT. Nilai keluaran (crisp value) yang diperoleh dari proses defuzzifikasi selanjutnya dipetakan ke dalam tiga kategori kondisi beban, yaitu underload, normal, dan overload. Hasil klasifikasi tersebut kemudian ditampilkan pada website monitoring sebagai informasi pendukung dalam proses pengawasan penggunaan energi listrik secara real-time.

2.4 Implementasi Sistem Monitoring dan Pengolahan Data Sensor

2.4.1 Pengolahan Data Sensor

Sistem monitoring energi listrik menggunakan ESP32 sebagai mikrokontroler utama yang terhubung dengan sensor SCT-013 untuk mengukur arus listrik dan sensor ZMPT101B untuk

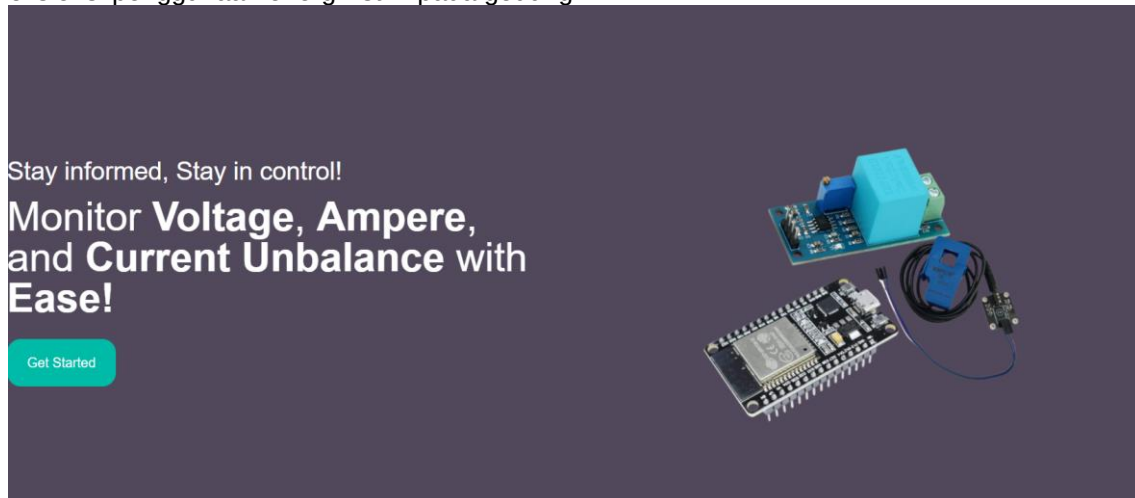
mengukur tegangan listrik. Data dari kedua sensor dibaca secara berkala dan diproses oleh ESP32 untuk menghitung parameter kelistrikan yang diperlukan. Selanjutnya, data hasil pengukuran dikirim melalui jaringan Wi-Fi ke layanan Supabase yang menggunakan basis data PostgreSQL sebagai media penyimpanan. Proses ini memungkinkan data kelistrikan tersimpan dan dapat diakses secara real-time melalui sistem monitoring berbasis web.

2.4.2 Pengolahan Data Menggunakan Fuzzy Logic

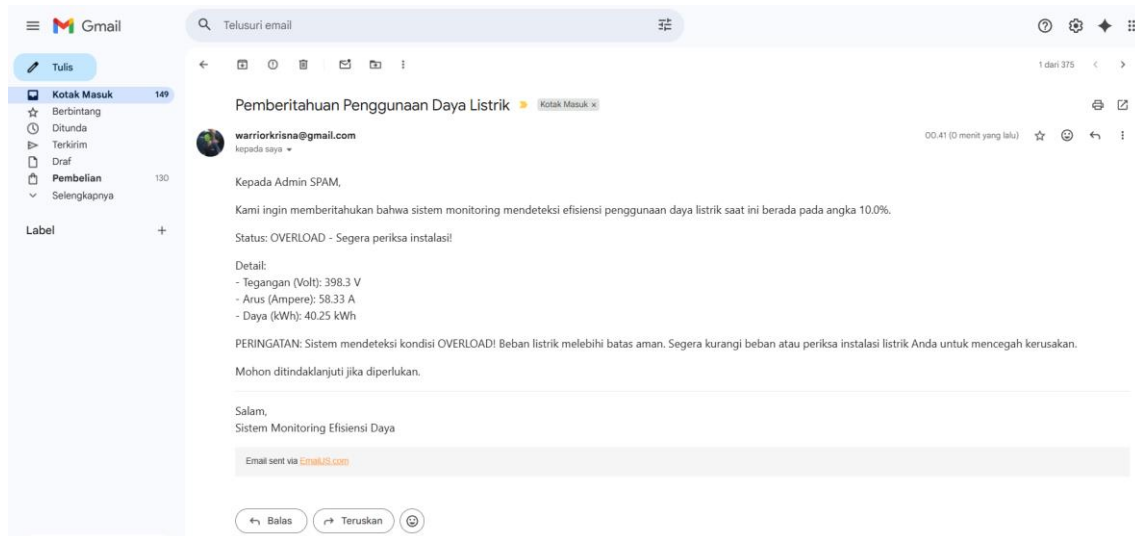
Sistem pengambilan keputusan menerapkan metode Fuzzy Sugeno Orde 0 untuk mengklasifikasikan kondisi beban listrik berdasarkan nilai arus dan tegangan yang diperoleh dari sensor. Kedua parameter masukan dikonversi ke dalam nilai linguistik melalui proses fuzzifikasi menggunakan fungsi keanggotaan yang telah ditentukan. Selanjutnya, sistem menerapkan aturan IF–THEN (rule base) yang menghubungkan kondisi arus dan tegangan dengan kategori beban listrik. Hasil inferensi dari setiap aturan menghasilkan nilai konsekuen yang kemudian diproses menggunakan metode weighted average untuk memperoleh nilai tegas (crisp value). Nilai tersebut digunakan untuk menentukan kondisi beban listrik yang diklasifikasikan ke dalam kategori Underload, Normal, atau Overload.

2.4.3 Antarmuka Website dan Notifikasi Email

Sistem monitoring dikembangkan menggunakan framework Next.js dan terhubung langsung dengan database Supabase. Website menampilkan informasi penggunaan energi listrik secara real-time dalam bentuk data numerik, grafik historis, serta riwayat pengukuran yang tersimpan pada database. Selain itu, sistem dilengkapi dengan fitur notifikasi email yang dikirim secara otomatis ketika terdeteksi kondisi beban listrik overload. Fitur ini membantu pengguna dalam melakukan pemantauan dan pengambilan tindakan secara cepat untuk menjaga keamanan serta efisiensi penggunaan energi listrik pada gedung.



Gambar 5. Tampilan Splashscreen



Gambar 6. Tampilan Notifikasi



Gambar 7. Tampilan Visualisasi Data



Gambar 8. Tampilan Logs Data

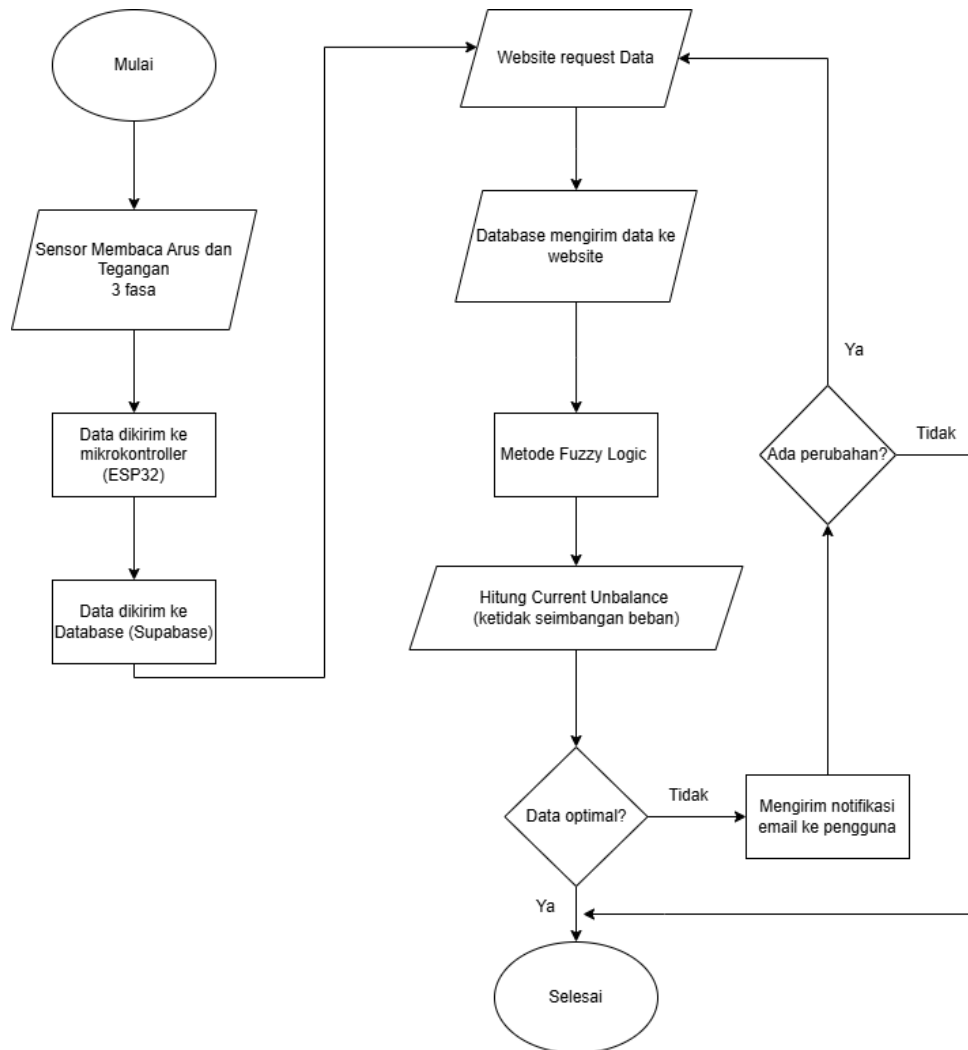
2.5 Pengujian Sistem

Verifikasi kinerja sistem dilakukan melalui beberapa tahapan pengujian yang mencakup aspek perangkat keras dan perangkat lunak. Kegiatan ini bertujuan untuk memastikan bahwa setiap komponen yang digunakan pada sistem monitoring energi listrik mampu beroperasi secara optimal dan saling terintegrasi dengan baik sehingga dapat memenuhi kebutuhan penelitian yang telah ditetapkan, mulai dari pengujian masing-masing komponen, pengujian integrasi sistem, hingga pengujian keseluruhan sistem untuk memastikan kinerja sistem monitoring energi listrik berjalan dengan baik.

Tahap pertama adalah pengujian komponen, yang meliputi pengujian sensor SCT-013 dan ZMPT101B serta mikrokontroler ESP32. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa sensor mampu membaca nilai arus dan tegangan secara akurat serta dapat mengirimkan data hasil pengukuran ke sistem. Selain itu, dilakukan verifikasi terhadap proses pengiriman data dari ESP32 ke database Supabase melalui jaringan internet untuk memastikan data tersimpan dengan baik dan dapat diakses secara real-time.

Setelah fungsi masing-masing komponen berhasil diverifikasi, dilakukan pengujian terhadap mekanisme integrasi sistem untuk memastikan aliran data dapat berlangsung secara menyeluruh. Pengujian ini mencakup proses pengambilan data dari sensor, pengiriman data melalui ESP32, penyimpanan pada Supabase, hingga penyajian informasi pada website monitoring sehingga setiap bagian sistem dapat bekerja secara sinkron. Pada tahap ini, sistem diuji dalam berbagai kondisi beban listrik untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mengakuisisi, mengirim, menyimpan, dan menampilkan data secara real-time. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh komponen dapat berkomunikasi dengan baik sehingga aliran data dari perangkat monitoring hingga antarmuka pengguna dapat berjalan tanpa kehilangan informasi.

Tahap berikutnya adalah pengujian sistem menggunakan metode Black Box. Pengujian dilakukan dari sudut pandang pengguna dengan memeriksa fungsi-fungsi utama yang tersedia pada sistem, seperti proses login, penampilan data monitoring secara real-time, visualisasi grafik historis, pengelolaan data, serta pengiriman notifikasi email ketika kondisi overload terdeteksi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh fitur sistem dapat berjalan sesuai dengan kebutuhan fungsional yang telah ditentukan.



Gambar 9. Diagram alur cara kerja aplikasi secara keseluruhan

Selain pengujian fungsional, dilakukan pula pengujian akurasi sensor dengan membandingkan hasil pembacaan sensor SCT-013 dan ZMPT101B terhadap alat ukur referensi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor memiliki tingkat akurasi yang baik dengan nilai error yang masih berada dalam batas toleransi sehingga layak digunakan untuk proses monitoring energi listrik.

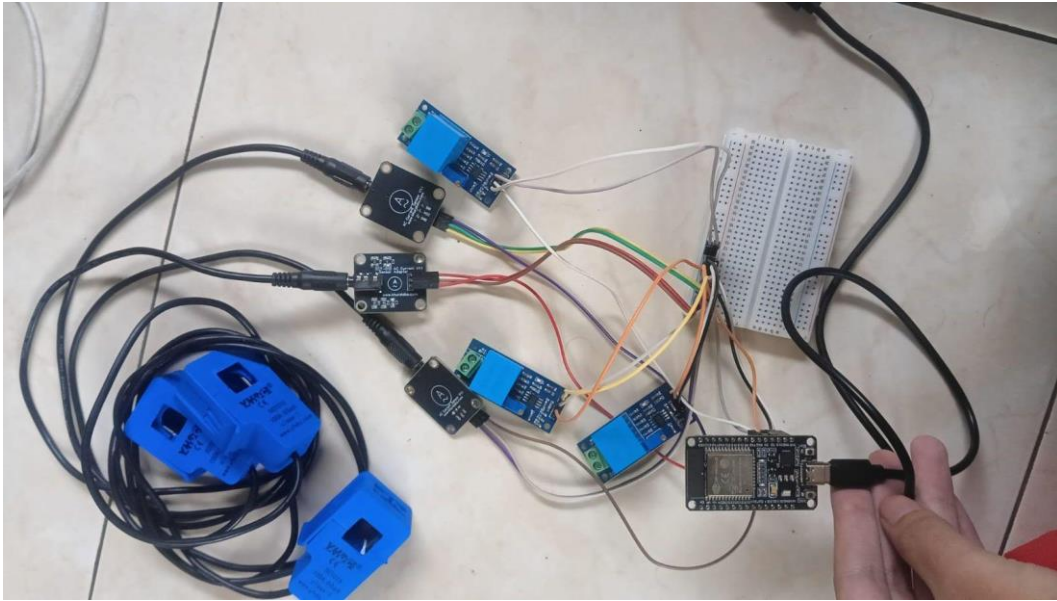
Pengujian juga dilakukan terhadap algoritma Fuzzy Sugeno Orde 0 untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mengklasifikasikan kondisi beban listrik berdasarkan parameter arus dan tegangan. Hasil klasifikasi sistem kemudian dibandingkan dengan perhitungan manual berdasarkan aturan yang telah ditetapkan. Berdasarkan hasil pengujian, sistem mampu mengklasifikasikan kondisi beban listrik ke dalam kategori Underload, Normal, dan Overload secara konsisten dengan tingkat akurasi yang tinggi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode Fuzzy Sugeno Orde 0 yang diterapkan telah mampu mendukung proses monitoring dan pengambilan keputusan pada sistem secara efektif.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Implementasi Sistem

Hasil dari penelitian ini berupa sistem monitoring pemakaian energi listrik berbasis Internet of Things (IoT) yang terdiri atas perangkat keras (hardware) dan perangkat lunak (software) yang saling terintegrasi. Pada sisi perangkat keras, sistem menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terhubung dengan sensor SCT-013 untuk mengukur arus listrik dan sensor ZMPT101B untuk mengukur tegangan listrik. Kedua sensor tersebut melakukan pengukuran secara berkala pada

instalasi listrik gedung dan mengirimkan data hasil pembacaan ke sistem melalui jaringan internet.



Gambar 10. Hasil Implementasi Rancangan Perangkat Keras

Data hasil pengukuran diproses oleh ESP32 dan dikirimkan ke Supabase sebagai basis data berbasis cloud yang berfungsi menyimpan data monitoring secara real-time. Website monitoring yang dikembangkan menggunakan framework Next.js mengambil data dari Supabase dan menampilkannya kepada pengguna melalui antarmuka yang responsif. Selain menampilkan data monitoring, sistem juga dilengkapi dengan fitur notifikasi email yang akan dikirim secara otomatis ketika terdeteksi kondisi beban listrik yang melebihi batas yang telah ditentukan. Dengan demikian, pengguna dapat memantau kondisi penggunaan energi listrik dan memperoleh informasi penting secara real-time dari mana saja.

Visualisasi data pada website mencakup informasi tegangan listrik dalam satuan Volt (V), arus listrik dalam satuan Ampere (A), serta data historis hasil pengukuran yang ditampilkan dalam bentuk grafik dan tabel. Data yang diperoleh dari sensor selanjutnya diolah menggunakan algoritma Fuzzy Sugeno Orde 0 untuk mengklasifikasikan kondisi beban listrik berdasarkan nilai arus dan tegangan yang terukur. Hasil klasifikasi ditampilkan dalam tiga kategori, yaitu Underload, Normal, dan Overload, sehingga pengguna dapat dengan mudah mengetahui kondisi penggunaan energi listrik pada sistem yang dimonitor.

3.2. Analisis Data Sensor

Untuk keperluan evaluasi, penelitian ini memanfaatkan sebanyak 30 data pengukuran yang diperoleh dari sistem monitoring energi listrik. Setiap sampel terdiri atas nilai arus dan tegangan yang dibaca oleh sensor SCT-013 dan ZMPT101B pada kondisi beban listrik yang berbeda. Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 2, nilai tegangan berada pada rentang 215,3–227,8 V, sedangkan nilai arus berada pada rentang 0,9–10,2 A. Rentang tegangan yang relatif sempit menunjukkan bahwa suplai listrik pada Gedung LPK Panji Sakti cenderung stabil selama periode pengujian. Sebaliknya, variasi nilai arus lebih besar karena dipengaruhi oleh perubahan jumlah dan jenis beban listrik yang digunakan pada setiap waktu pengamatan. Kondisi ini menunjukkan bahwa perubahan arus memiliki kontribusi yang lebih dominan dalam menentukan perubahan kondisi beban dibandingkan variasi tegangan [6], [7]. Variasi arus yang cukup besar menyebabkan derajat keanggotaan pada variabel arus lebih sering mengalami perubahan antar kategori underload, normal, dan overload. Sebaliknya, karena tegangan cenderung berada di sekitar tegangan nominal sistem, nilai keanggotaannya sebagian besar tetap berada pada kategori normal. Oleh karena itu, proses inferensi Fuzzy Sugeno lebih sensitif terhadap perubahan nilai arus dibandingkan perubahan tegangan pada kondisi pengujian yang dilakukan [2], [5].

Tabel 2. Hasil Pembacaan dari Sensor

Individu	Arus	Tegangan
1	1.9	224.4
2	1.8	225.6
3	2.7	217.9
4	1.0	222.3
5	1.9	217.7
6	0.9	222.6
7	3.2	222.5
8	1.1	217.0
9	2.7	220.6
10	1.5	217.5
11	1.5	219.5
12	2.7	219.8
13	1.3	218.7
14	2.1	224.0
15	9.2	226.0
16	7.7	227.8
17	10.2	216.5
18	8.2	219.6
19	8.8	221.0
20	8.5	221.7
21	8.1	221.0
22	9.0	222.9
23	8.5	215.3
24	7.6	217.6
25	8.2	222.5
26	8.0	217.5
27	9.8	220.6
28	7.0	220.0
29	9.4	220.0
30	8.0	222.7

Berdasarkan keseluruhan data pada Tabel 2, terlihat bahwa variasi arus lebih besar dibandingkan variasi tegangan sehingga perubahan kondisi beban lebih banyak dipengaruhi oleh perubahan arus. Sebagai contoh, pada data pengujian pertama diperoleh nilai arus sebesar 1,9 A dan tegangan sebesar 224,4 V. Berdasarkan fungsi keanggotaan yang digunakan, nilai tegangan masih berada pada rentang kategori normal, sedangkan nilai arus memiliki derajat keanggotaan yang mengarah pada kondisi beban ringan hingga normal. Hasil inferensi menunjukkan bahwa aturan dengan kategori normal memiliki nilai aktivasi (firing strength) yang lebih dominan sehingga proses defuzzifikasi menghasilkan keluaran yang diklasifikasikan sebagai kondisi Normal [1], [2].

3.3. Hasil Inferensi dan Defuzzifikasi

Setelah proses fuzzifikasi dilakukan terhadap nilai arus dan tegangan yang diperoleh dari sensor, sistem melanjutkan ke tahap inferensi menggunakan aturan IF–THEN yang telah disusun berdasarkan metode Fuzzy Sugeno Orde 0. Pada tahap ini, sistem mengevaluasi kombinasi nilai keanggotaan dari masing-masing variabel masukan untuk menentukan aturan yang aktif dan menghasilkan nilai firing strength pada setiap aturan. Untuk memberikan gambaran proses inferensi, salah satu data hasil pengukuran digunakan sebagai contoh. Misalnya pada data pengujian pertama diperoleh nilai arus sebesar 1,9 A dan tegangan sebesar 224,4 V. Berdasarkan fungsi keanggotaan yang telah ditentukan, nilai tegangan memiliki derajat keanggotaan dominan pada kategori normal, sedangkan nilai arus berada pada rentang transisi antara underload dan normal. Kombinasi kedua variabel tersebut mengaktifkan beberapa aturan (rule) dengan nilai firing strength yang berbeda, dimana aturan yang merepresentasikan kondisi normal memiliki tingkat aktivasi paling tinggi [1], [2].

Tabel 3. Hasil Inferensi Fuzzy Sugeno

Individu	Tegangan Avg	Arus Avg	R1 (α)	R1 (z)	R2 (α)	R2 (z)	R3 (α)	R3 (z)	R4 (α)	R4 (z)	R5 (α)	R5 (z)	R6 (α)	R6 (z)	R7 (α)	R7 (z)	R8 (α)	R8 (z)	R9 (α)	R9 (z)
1	220.797	0.523	0	20	0	50	0	90	0.96	20	0	50	0	90	0	50	0	90	0	90
2	218.05	0.92	0	20	0	50	0	90	0.902	20	0	50	0	90	0	50	0	90	0	90
3	220.07	0.997	0	20	0	50	0	90	0.996	20	0	50	0	90	0	50	0	90	0	90
4	219.65	1.193	0	20	0	50	0	90	0.983	20	0	50	0	90	0	50	0	90	0	90
5	222.06	1.077	0	20	0	50	0	90	0.897	20	0	50	0	90	0	50	0	90	0	90
6	220.52	1.163	0	20	0	50	0	90	0.974	20	0	50	0	90	0	50	0	90	0	90
7	217.373	0.583	0	20	0	50	0	90	0.869	20	0	50	0	90	0	50	0	90	0	90
8	221.113	1.2	0	20	0	50	0	90	0.944	20	0	50	0	90	0	50	0	90	0	90
9	216.987	0.933	0	20	0	50	0	90	0.849	20	0	50	0	90	0	50	0	90	0	90
10	219.553	0.773	0	20	0	50	0	90	0.978	20	0	50	0	90	0	50	0	90	0	90

Berdasarkan hasil proses inferensi fuzzy pada contoh data pengujian, diperoleh nilai firing strength dari setiap aturan fuzzy yang menghubungkan parameter arus dan tegangan terhadap kondisi beban listrik. Proses inferensi menggunakan operator minimum (min) untuk menentukan tingkat aktivasi setiap aturan berdasarkan derajat keanggotaan kedua parameter masukan. Nilai firing strength yang lebih besar menunjukkan bahwa aturan tersebut memiliki pengaruh yang lebih dominan dalam proses pengambilan keputusan. Selanjutnya, seluruh nilai firing strength diproses menggunakan metode weighted average pada tahap defuzzifikasi untuk menghasilkan nilai keluaran (crisp output), yang kemudian digunakan sebagai dasar penentuan kategori kondisi beban, yaitu Underload, Normal, atau Overload sesuai dengan kondisi hasil pengukuran. Berikut disajikan contoh perhitungan proses inferensi dan defuzzifikasi menggunakan salah satu data hasil pengujian:

Fungsi keanggotaan untuk variabel x dalam suatu himpunan fuzzy A berbentuk segitiga didefinisikan sebagai berikut:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ (x - a) / (b - a), & a < x \leq b \\ (c - x) / (c - b), & b < x < c \\ 0, & x \geq c \end{cases}$$

Keterangan:

a , b , dan c adalah parameter batas bawah, puncak, dan batas atas fungsi segitiga. $\mu_A(x)$ adalah nilai keanggotaan fuzzy dari nilai x .

Contoh fungsi keanggotaan untuk arus Normal:

$$\mu_{\text{optimal}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 1.5 \\ (x - 1.5) / 1, & 1.5 < x \leq 2.5 \\ (3.5 - x) / 1, & 2.5 < x < 3.5 \\ 0, & x \geq 3.5 \end{cases}$$

Sistem inferensi fuzzy menggunakan aturan IF–THEN. Misalnya:

IF Arus = Normal AND Tegangan = Normal THEN Kondisi Beban = Normal

Setiap aturan menghasilkan bobot w_i berdasarkan nilai minimum dari keanggotaan input:

$$w_i = \min(\mu_{\text{arus}}(x), \mu_{\text{tegangan}}(y))$$

Untuk mendapatkan output akhir, digunakan metode defuzzifikasi rata-rata berbobot:

$$z = (\sum w_i * z_i) / (\sum w_i)$$

Contoh:

Input sensor: arus = 2,58 A , tegangan = 220,63 V.

Nilai keanggotaan:

$$\mu_{\text{arus}}(\text{normal}) = 0.92, \mu_{\text{tegangan}}(\text{normal}) = 0.937$$

Aturan aktif: Rule 5 $\rightarrow z_i = 50$ (kategori normal)

$$w_5 = \min(0.92, 0.937) = 0.92$$

Maka hasil defuzzifikasi:

$$z = (0.92 * 50) / 0.92 = 50 \rightarrow \text{Termasuk kategori "Normal"}$$

Tabel 4. Hasil Defuzzifikasi Menggunakan Metode Fuzzy Sugeno

No	Underload (20)	Normal (50)	Overload (90)	Numerator ($\sum \mu(x) \times \text{skor}$)	Denominator ($\sum \mu(x)$)	Nilai Defuzzifikasi
1	0.96	0	0	19.203	0.96	20
2	0.902	0	0	18.05	0.902	20
3	0.996	0	0	19.93	0.996	20
4	0.983	0	0	19.65	0.983	20
5	0.897	0	0	17.94	0.897	20
6	0.974	0	0	19.48	0.974	20
7	0.869	0	0	17.373	0.869	20
8	0.944	0	0	18.887	0.944	20
9	0.849	0	0	16.987	0.849	20
10	0.978	0	0	19.553	0.978	20

Berdasarkan hasil defuzzifikasi menggunakan metode Fuzzy Sugeno Orde 0 pada contoh data pengujian, diperoleh nilai keluaran (crisp output) melalui metode weighted average, yaitu dengan menghitung rata-rata terbobot antara nilai firing strength dan konstanta keluaran pada setiap aturan fuzzy. Hasil defuzzifikasi pada Tabel 4 menunjukkan bahwa contoh data yang ditampilkan menghasilkan nilai keluaran sebesar 20, yang diklasifikasikan ke dalam kategori Underload. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kondisi beban listrik pada contoh pengujian masih berada pada tingkat rendah sehingga kapasitas sistem belum dimanfaatkan secara optimal. Hasil ini konsisten dengan nilai arus yang relatif kecil pada data pengukuran, sehingga aturan-aturan yang

merepresentasikan kondisi Underload memiliki tingkat aktivasi yang lebih dominan. Meskipun demikian, pada keseluruhan proses pengujian sistem juga mampu menghasilkan keluaran pada kategori Normal maupun Overload sesuai dengan variasi nilai arus dan tegangan yang diterima. Hal ini menunjukkan bahwa metode Fuzzy Sugeno mampu memberikan klasifikasi kondisi beban secara adaptif berdasarkan perubahan parameter masukan [1], [2].

3.4. Evaluasi Fitur Notifikasi dan Antarmuka Aplikasi

Fitur notifikasi berhasil diimplementasikan melalui layanan email otomatis yang akan dikirim ketika sistem mendeteksi kondisi beban listrik pada kategori overload. Mekanisme ini memungkinkan pengguna memperoleh informasi secara cepat tanpa harus melakukan pemantauan secara terus-menerus melalui halaman monitoring. Dengan demikian, potensi keterlambatan dalam mengetahui kondisi beban berlebih dapat diminimalkan sehingga tindakan pencegahan dapat dilakukan lebih dini [4], [6].

Selain memberikan notifikasi, website monitoring juga menyajikan data arus, tegangan, serta riwayat pengukuran dalam bentuk grafik historis dan tabel. Penyajian data secara visual memudahkan pengguna dalam mengidentifikasi perubahan pola konsumsi energi dari waktu ke waktu dibandingkan hanya mengamati nilai numerik sesaat. Informasi historis tersebut dapat digunakan sebagai dasar evaluasi penggunaan energi maupun identifikasi awal terhadap perubahan kondisi beban listrik [4], [6].

Antarmuka website dirancang agar responsif dan mudah digunakan sehingga informasi monitoring dapat diakses secara jelas oleh pengguna. Penyederhanaan tampilan melalui indikator kondisi beban, grafik historis, serta tabel data membantu pengguna memahami kondisi sistem dengan lebih cepat tanpa harus melakukan interpretasi langsung terhadap setiap parameter kelistrikan. Pendekatan ini sejalan dengan konsep user-centered monitoring system yang menekankan penyajian informasi secara sederhana namun tetap informatif [6]. Meskipun demikian, efektivitas fitur notifikasi masih bergantung pada ketersediaan koneksi internet karena proses pengiriman data dan email dilakukan melalui layanan berbasis cloud. Apabila terjadi gangguan jaringan, proses sinkronisasi data maupun pengiriman notifikasi berpotensi mengalami keterlambatan. Oleh karena itu, pengembangan selanjutnya dapat mempertimbangkan mekanisme penyimpanan lokal (local buffering) atau sistem notifikasi alternatif untuk meningkatkan keandalan sistem [4], [5].

3.5. Pembahasan

Berdasarkan hasil implementasi dan pengujian yang telah dilakukan, sistem monitoring energi listrik berbasis Internet of Things (IoT) berhasil menjalankan proses akuisisi data, klasifikasi kondisi beban, serta penyajian informasi secara real-time. Keberhasilan tersebut menunjukkan bahwa integrasi antara sensor SCT-013, sensor ZMPT101B, mikrokontroler ESP32, layanan basis data berbasis cloud, dan website monitoring mampu bekerja secara terpadu dalam mendukung proses pemantauan penggunaan energi listrik. Selain menghasilkan data pengukuran, sistem juga mampu memberikan interpretasi kondisi beban melalui metode Fuzzy Sugeno Orde 0 sehingga informasi yang diterima pengguna menjadi lebih mudah dipahami dibandingkan hanya menampilkan nilai arus dan tegangan secara numerik [4], [5], [6].

Hasil pengujian menunjukkan bahwa perubahan nilai arus memberikan pengaruh yang lebih dominan terhadap perubahan hasil klasifikasi dibandingkan variasi tegangan. Selama proses pengambilan data, tegangan berada pada rentang yang relatif stabil di sekitar tegangan nominal sistem, sedangkan arus mengalami variasi yang lebih besar akibat perubahan penggunaan beban listrik. Kondisi tersebut menyebabkan perubahan derajat keanggotaan pada variabel arus lebih sering mengaktifkan kombinasi aturan yang berbeda pada proses inferensi fuzzy. Dengan demikian, perubahan kondisi beban yang dihasilkan sistem lebih banyak dipengaruhi oleh variasi arus dibandingkan perubahan tegangan pada kondisi pengujian penelitian ini [2], [5].

Penggunaan metode Fuzzy Sugeno Orde 0 juga memberikan keuntungan dari sisi implementasi karena setiap aturan menghasilkan keluaran berupa konstanta yang diproses menggunakan metode weighted average. Pendekatan ini menghasilkan proses komputasi yang lebih sederhana dibandingkan metode Mamdani sehingga sesuai diterapkan pada sistem monitoring berbasis ESP32 yang memerlukan respons cepat terhadap perubahan data sensor. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa proses klasifikasi dapat dilakukan secara konsisten tanpa memberikan beban komputasi yang tinggi pada perangkat IoT [1], [2], [5].

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian mengenai sistem monitoring energi berbasis IoT pada bangunan pintar yang menunjukkan bahwa integrasi sensor dengan metode pengambilan keputusan berbasis fuzzy mampu meningkatkan interpretasi data monitoring dibandingkan penyajian data numerik secara langsung [4], [5]. Penelitian yang dilakukan pada lingkungan laboratorium juga menunjukkan bahwa penerapan logika fuzzy mampu membantu pengguna dalam memahami kondisi penggunaan energi secara lebih intuitif melalui penyajian informasi yang sederhana namun tetap informatif [6]. Perbedaan penelitian ini terletak pada penerapan klasifikasi kondisi beban listrik menggunakan kombinasi parameter arus dan tegangan yang diimplementasikan pada gedung LPK Panji Sakti dengan sistem monitoring berbasis website yang terhubung secara real-time.

Tabel 5. Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Diusulkan

Penelitian	Tujuan	Metode	Parameter Monitoring	Output Sistem	Perbedaan dengan Penelitian Ini
Intelligent Energy Consumption for Smart Homes Using Fused Machine-Learning Technique [4]	Mengoptimalkan konsumsi energi rumah pintar melalui analisis data sensor menggunakan <i>machine learning</i> .	Machine Learning + IoT	Konsumsi energi rumah, berbagai sensor IoT	Prediksi konsumsi energi dan optimasi penggunaan listrik	Berfokus pada prediksi konsumsi energi, sedangkan penelitian ini melakukan klasifikasi kondisi beban listrik secara <i>real-time</i> menggunakan Fuzzy Sugeno.
Interpretable Fuzzy Control for Energy Management in Smart Buildings Using JFML-IoT and IEEE Std 1855-2016 [5]	Mengembangkan sistem pengelolaan energi bangunan menggunakan logika fuzzy yang mudah diinterpretasikan.	Fuzzy Logic + IoT	Parameter lingkungan dan konsumsi energi	Pengambilan keputusan pengelolaan energi bangunan	Penelitian ini menggunakan Fuzzy Sugeno Orde 0 untuk klasifikasi kondisi beban berdasarkan arus dan tegangan serta menampilkan hasil melalui website monitoring.

User-Centered Energy Management System for a University Laboratory Based on Intelligent Sensors and Fuzzy Logic [6]	Meningkatkan efisiensi penggunaan energi pada laboratorium melalui sensor cerdas dan logika fuzzy.	Intelligent Sensor + Fuzzy Logic	Sensor lingkungan dan konsumsi energi	Monitoring energi laboratorium	Penelitian ini lebih berfokus pada klasifikasi kondisi beban listrik pada gedung menggunakan sensor SCT-013 dan ZMPT101B dengan notifikasi otomatis berbasis IoT.
Penelitian ini	Mengembangkan sistem monitoring energi listrik berbasis IoT yang mampu mengklasifikasikan kondisi beban listrik secara otomatis.	Fuzzy Sugeno Orde 0 + ESP32 + IoT + Website Monitoring	Arus dan Tegangan	Monitoring <i>real-time</i> , klasifikasi <i>underload</i> , <i>normal</i> , dan <i>overload</i> , serta notifikasi email otomatis	Mengintegrasikan klasifikasi kondisi beban menggunakan Fuzzy Sugeno Orde 0 dengan monitoring berbasis website pada Gedung LPK Panji Sakti.

Berdasarkan Tabel 5, penelitian terdahulu umumnya berfokus pada optimasi konsumsi energi atau pengelolaan energi bangunan menggunakan pendekatan machine learning maupun logika fuzzy. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian menitikberatkan pada pengendalian (control) atau prediksi konsumsi energi. Penelitian ini memiliki pendekatan yang berbeda dengan mengintegrasikan metode Fuzzy Sugeno Orde 0 untuk mengklasifikasikan kondisi beban listrik berdasarkan parameter arus dan tegangan yang diperoleh secara real-time dari sensor SCT-013 dan ZMPT101B. Hasil klasifikasi kemudian disajikan melalui website monitoring serta dilengkapi dengan notifikasi email otomatis ketika terdeteksi kondisi overload. Pendekatan ini memberikan informasi yang lebih mudah dipahami oleh pengguna atau pengelola gedung Lembaga Pelatihan Kerja Panji Sakti tanpa memerlukan interpretasi langsung terhadap nilai parameter kelistrikan.

Kontribusi utama penelitian ini tidak hanya terletak pada pembangunan sistem monitoring berbasis IoT, tetapi juga pada integrasi metode Fuzzy Sugeno sebagai mekanisme interpretasi kondisi beban listrik secara otomatis. Pendekatan tersebut memungkinkan pengguna memperoleh informasi yang lebih mudah dipahami dibandingkan hanya mengamati parameter kelistrikan secara langsung, sehingga proses pemantauan penggunaan energi menjadi lebih efektif. Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan. Sistem hanya menggunakan parameter arus dan tegangan sebagai masukan proses klasifikasi sehingga belum mempertimbangkan parameter kelistrikan lain seperti daya aktif, faktor daya (power factor), frekuensi, maupun konsumsi energi kumulatif (kWh). Selain itu, pengiriman data dan notifikasi masih bergantung pada koneksi internet sehingga kualitas jaringan dapat mempengaruhi kecepatan sinkronisasi data dan pengiriman informasi kepada pengguna.

Pengembangan selanjutnya dapat dilakukan dengan menambahkan parameter kelistrikan lainnya, menerapkan metode pembelajaran cerdas (machine learning) untuk analisis pola konsumsi energi, serta mengintegrasikan sistem monitoring dengan mekanisme pengendalian otomatis (automatic load control) sehingga sistem tidak hanya mampu melakukan pemantauan, tetapi juga memberikan respons terhadap kondisi beban secara adaptif [4], [5].

4. Kesimpulan

Penelitian yang dilakukan berhasil menghasilkan sistem monitoring pemakaian energi listrik berbasis IoT dengan dukungan metode Fuzzy Sugeno Orde 0, sehingga kondisi beban listrik dapat diklasifikasikan secara otomatis berdasarkan hasil pengukuran sensor. Sistem yang dikembangkan terdiri atas mikrokontroler ESP32, sensor SCT-013 sebagai sensor arus, sensor ZMPT101B sebagai sensor tegangan, database Supabase, serta website monitoring berbasis Next.js sebagai media visualisasi data.

Hasil implementasi menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan pengukuran arus dan tegangan secara real-time, mengirimkan data ke database cloud, serta menampilkan informasi monitoring melalui website dalam bentuk tabel, grafik historis, dan indikator kondisi beban listrik. Proses klasifikasi dilakukan menggunakan metode Fuzzy Sugeno Orde 0 yang mampu mengelompokkan kondisi beban listrik ke dalam kategori Underload, Normal, dan Overload berdasarkan nilai arus dan tegangan yang terukur.

Berdasarkan hasil pengujian, sensor SCT-013 dan ZMPT101B menunjukkan tingkat akurasi yang baik dengan nilai error yang masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima. Selain itu, pengujian algoritma Fuzzy Sugeno Orde 0 menunjukkan tingkat akurasi klasifikasi yang sangat baik dalam menentukan kondisi beban listrik sesuai dengan aturan yang telah ditetapkan. Fitur notifikasi email yang diimplementasikan juga berhasil mendukung proses monitoring dengan memberikan peringatan secara otomatis ketika terdeteksi kondisi overload.

Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan mampu memberikan solusi yang efektif untuk monitoring penggunaan energi listrik secara real-time pada gedung LPK Panji Sakti. Pengembangan lebih lanjut dapat dilakukan dengan menambahkan parameter kelistrikan lainnya, meningkatkan fitur analisis data, serta mengintegrasikan mekanisme pengendalian otomatis guna mendukung pengelolaan energi listrik yang lebih efisien.

Referensi

- [1] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. SMC-15, no. 1, pp. 116–132, Jan. 1985.
- [2] T. J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering Applications*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2010
- [3] Fudulu, C.-F., Boicu, M.-G., Vasluianu, M., Neculoiu, G., & Dobrea, M.-A. (2026). User-Centered Energy Management System for a University Laboratory Based on Intelligent Sensors and Fuzzy Logic. *Buildings*, 16(6), 1257. <https://doi.org/10.3390/buildings16061257>
- [4] H. AlZaabi et al., "Intelligent Energy Consumption For Smart Homes Using Fused Machine-Learning Technique," *Comput. Mater. Contin.*, vol. 74, no. 1, pp. 2261–2278, 2023. <https://doi.org/10.32604/cmc.2023.031834>
- [5] M. Martínez-Rojas, C. Cano, J. Alcalá-Fdez, and J. M. Soto-Hidalgo, "Interpretable Fuzzy Control for Energy Management in Smart Buildings Using JFML-IoT and IEEE Std 1855-2016," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 15, Art. no. 8208, 2025, doi: 10.3390/app15158208.
- [6] C.-F. Fudulu, M.-G. Boicu, M. Vasluianu, G. Neculoiu, and M.-A. Dobrea, "User-Centered Energy Management System for a University Laboratory Based on Intelligent Sensors and Fuzzy Logic," *Buildings*, vol. 16, no. 6, Art. no. 1257, 2026, doi: 10.3390/buildings16061257.
- [7] Badan Standardisasi Nasional, *Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2020*. Jakarta, Indonesia: Badan Standardisasi Nasional, 2020.
- [8] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants (IEEE Std 141-1993)*. New York, NY, USA: IEEE, 1993.
- [9] Espressif Systems, *ESP32 Series Datasheet*. Shanghai, China: Espressif Systems, 2024..
- [10] YHDC, *SCT-013 Current Transformer Sensor Datasheet*. Beijing, China: YHDC, 2023.
- [11] ZMPT101B, *AC Voltage Transformer Sensor Datasheet*. Guangzhou, China, 2023.
- [12] Arduino, *Arduino Uno Rev3*, Arduino, 2021. [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>

- [13] R. S. Pressman and B. R. Maxim, Software Engineering: A Practitioner's Approach, 9th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2019.
- [14] A. Yohandrik, B. Dawe, P. Dani, P. Adi, and W. Dirgantara, "Sistem Monitoring untuk Penggunaan Daya Listrik pada Smart Home dengan Metode Fuzzy Logic Berbasis IoT," SINARFe7, vol. x, no. x, pp. xx–xx, 20xx. [Online]. Available: <https://journal.fortei7.org/index.php/sinarFe7/article/view/14>