

Penerapan Logika Fuzzy Mamdani pada Sistem Kendali dan Monitoring Listrik Berbasis IoT

Amelia Isnaeni¹, Ika Setyowati², dan Bagus Fatkhurrozi³

Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tidar, Jawa Tengah 56116, Indonesia

amelia.isnaeni@students.untidar.ac.id¹, ikasetyowati@untidar.ac.id², bagusf@untidar.ac.id³

Abstrak—Konsumsi listrik yang terus meningkat menuntut adanya sistem yang mampu melakukan pemantauan dan pengendalian penggunaan energi secara efisien. Selama ini, banyak pengguna listrik rumah tangga belum memiliki sarana untuk mengetahui tingkat konsumsi listrik secara *real-time*, sehingga sering terjadi pemborosan energi dan peningkatan biaya. Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan rancangan dan implementasi sistem kendali serta monitoring konsumsi listrik satu fasa berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan metode logika fuzzy Mamdani. Sistem dirancang untuk memantau parameter listrik seperti tegangan, arus, daya, energi, faktor daya, dan biaya listrik menggunakan sensor PZEM-004T yang diolah oleh mikrokontroler ESP32. Platform Blynk digunakan sebagai media pemantauan dan pengendalian beban jarak jauh, sedangkan ThingSpeak berfungsi untuk menampilkan grafik data dan menyimpan hasil pengukuran secara *real-time*. Logika fuzzy Mamdani digunakan untuk mengklasifikasikan tingkat konsumsi listrik ke dalam tiga kategori, yaitu rendah, normal, dan tinggi. Berdasarkan hasil pengujian, sistem beroperasi dengan baik dengan tingkat akurasi sensor sebesar 85,28% pada tegangan dan 86,64% pada arus, serta akurasi klasifikasi fuzzy mencapai 98,63% dengan nilai MAPE sebesar 1,37%. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem yang dirancang efektif, efisien, dan informatif dalam melakukan kendali dan monitoring konsumsi listrik secara *real-time*.

Kata kunci—IoT, Logika fuzzy Mamdani, PZEM-004T, ESP32, Blynk, ThingSpeak.

Abstract—The continuous increase in electricity consumption requires a system capable of monitoring and controlling energy usage efficiently. Until now, many residential electricity users have not had the means to determine their real-time electricity consumption levels, often resulting in energy waste and increased costs. Based on these issues, this study proposes the design and implementation of a single-phase electricity consumption control and monitoring system based on the Internet of Things (IoT) using the Mamdani fuzzy logic method. The system is designed to monitor electrical parameters such as voltage, current, power, energy, power factor, and electricity costs using a PZEM-004T sensor processed by an ESP32 microcontroller. The Blynk platform is used as a medium for remote load monitoring and control, while ThingSpeak functions to display data graphs and store measurement results in real-time. Mamdani fuzzy logic is used to classify electricity consumption levels into three categories, namely low, normal, and high. Based on the test results, the system operates well with a sensor accuracy of 85.28% for voltage and 86.64% for current, and fuzzy classification accuracy reaching 98.63% with a MAPE value of 1.37%. These results indicate that the designed system is effective, efficient, and informative in controlling and monitoring electricity consumption in real-time.

Keywords—IoT, Fuzzy Logic Mamdani, PZEM-004T, ESP32, Blynk, ThingSpeak.

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik merupakan bagian penting dalam kehidupan sehari-hari. Berdasarkan data Kementerian ESDM (2024), konsumsi listrik per kapita meningkat sebesar 3,91%, dari 1.355,76 kWh pada Maret menjadi 1.411 kWh pada Desember 2024, dengan kontribusi utama berasal dari sektor industri sebesar 46% dan rumah tangga sebesar 33%. Peningkatan konsumsi listrik berdampak pada menurunnya ketersediaan energi serta meningkatnya biaya penggunaan, terutama di sektor rumah tangga. Penggunaan listrik yang tidak

efisien dapat menyebabkan lonjakan beban (kWh) dan potensi kerusakan perangkat akibat beban berlebih (Manurung, 2020).

Pemantauan konsumsi listrik sangat diperlukan agar pengguna dapat mengetahui penggunaan energi secara *real-time* dan mencegah pemborosan. Namun, alat ukur konvensional seperti kWh meter dinilai kurang efektif karena hanya menampilkan total daya tanpa rincian parameter lain (Muzakir, 2023). Dengan berkembangnya teknologi *Internet of Things* (IoT), sistem monitoring dan kendali listrik kini dapat diintegrasikan ke dalam jaringan internet, memungkinkan pengguna memantau dan mengendalikan konsumsi daya secara jarak jauh (Pradana dkk., 2024). IoT sendiri merupakan konsep di mana perangkat dapat berkomunikasi dan bertukar data

tanpa campur tangan manusia (Adiwiranto dan Catur, 2021), yang umum diterapkan dalam sistem berbasis sensor seperti PZEM-004T untuk pengukuran tegangan, arus, daya, dan energi listrik (Alfian dkk., 2023).

Beberapa penelitian sebelumnya, seperti Aritonang dkk. (2020), telah mengembangkan sistem monitoring panel surya menggunakan sensor INA219 dan BH1750 dengan NodeMCU dan ThingSpeak. Namun, sistem tersebut masih bersifat pasif tanpa kontrol beban maupun kecerdasan buatan. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan pengembangan sistem kendali dan monitoring listrik dengan integrasi modul relay sebagai aktuator serta penerapan logika fuzzy Mamdani untuk analisis konsumsi listrik.

Metode logika fuzzy digunakan karena kemampuannya dalam menangani ketidakpastian dan menghasilkan keputusan yang fleksibel berdasarkan variabel input seperti daya, energi, dan faktor daya (Aenun dan Mashuri, 2022). Beberapa penelitian terdahulu, seperti Suprapto dan Pastima (2020), telah menunjukkan efektivitas metode fuzzy Mamdani dalam memprediksi tingkat konsumsi listrik dengan akurasi yang tinggi.

Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem kendali serta monitoring konsumsi listrik satu fasa berbasis IoT dengan metode logika fuzzy Mamdani. Sistem ini menggunakan sensor PZEM-004T untuk pengukuran parameter listrik, mikrokontroler ESP32 untuk pemrosesan data, serta platform Blynk dan ThingSpeak untuk monitoring, pengendalian, dan penyimpanan data secara real-time. Diharapkan sistem ini mampu memberikan informasi konsumsi listrik yang akurat, membantu menghindari beban berlebih, serta meningkatkan efisiensi penggunaan energi pada rumah tangga.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian ini didasarkan pada pengembangan sistem kendali dan monitoring konsumsi listrik berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan metode logika fuzzy Mamdani. Beberapa penelitian sebelumnya telah dilakukan terkait sistem monitoring dan efisiensi energi menggunakan teknologi IoT dan pendekatan kecerdasan buatan.

Ikwan dan Yan (2020) merancang sistem monitoring dan kontrol daya listrik berbasis Android menggunakan mikrokontroler dan sensor pendukung, yang mampu memberikan informasi konsumsi energi secara akurat serta memperkirakan tagihan listrik secara efisien. Adiwiranto dan Catur (2021) juga mengembangkan sistem serupa dengan akurasi di atas 97% dalam memperkirakan biaya listrik secara *real-time*. Sementara itu, Wijayanti dkk. (2021) mengintegrasikan sensor PZEM-004T, modul relay, dan mikrokontroler ESP8266 untuk sistem monitoring dan kontrol listrik, dengan tingkat error di bawah 7% dan waktu respons di bawah dua detik.

Rohmah dkk. (2022) memanfaatkan teknologi IoT menggunakan sensor ACS712 dan ZMPT101B yang terhubung ke Arduino Uno dan NodeMCU untuk memantau serta mengendalikan perangkat listrik melalui aplikasi Blynk.

Sistem ini mampu bekerja otomatis maupun manual berdasarkan batas daya tertentu. Danuputri dkk. (2020) menerapkan logika fuzzy Mamdani pada sistem kontrol otomatis kipas dan lampu berbasis ESP32 dan IoT dengan hasil defuzzifikasi yang menunjukkan akurasi 100%, membuktikan efektivitas metode ini dalam sistem kendali cerdas.

Aenun dan Mashuri (2022) mengimplementasikan logika fuzzy Mamdani untuk memprediksi biaya listrik berdasarkan empat variabel input dan memperoleh nilai MAPE sebesar 19,60%, yang menunjukkan akurasi 80,40%. Selain itu, Suarna dan Edy (2023) menggunakan platform Blynk dan ThingSpeak untuk monitoring serta kontrol konsumsi listrik, dan hasilnya mampu mengurangi penggunaan energi hingga 40%.

Berdasarkan penelitian terdahulu, sebagian besar sistem hanya berfokus pada pemantauan dan estimasi konsumsi listrik tanpa integrasi kecerdasan buatan. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan sistem yang tidak hanya melakukan monitoring dan kontrol berbasis IoT, tetapi juga menerapkan logika fuzzy Mamdani dengan tiga variabel input—daya, energi, dan faktor daya—untuk menentukan tingkat konsumsi listrik (rendah, normal, tinggi). Sistem ini dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32 dan terintegrasi dengan modul relay, LCD I2C, serta platform Blynk dan ThingSpeak, sehingga mampu memberikan informasi konsumsi listrik yang lebih akurat, interaktif, dan efisien secara *real-time*.

2.2 Dasar Teori

A. Tegangan Listrik

Tegangan listrik adalah potensi atau tekanan listrik dari sumber besar tegangan listriknya ditentukan oleh perbedaan potensi antar satu titik dengan titik lainnya. Satuan tegangan listrik adalah Volt disingkat huruf V. Alat yang digunakan untuk mengukur tegangan listrik adalah Volt Meter (Muzakir, 2023). Tegangan dapat dihitung dengan Persamaan (1).

$$V = I \times R \quad (1)$$

Keterangan:

I = Arus (ampere)

R = Resistansi (ohm)

V = Tegangan

B. Arus Listrik

Arus merupakan banyaknya elektron bebas yang mengalir dalam suatu penghantar dan tertutup dalam persatuan waktu. Satuan arus listrik adalah ampere disingkat huruf A dan mempunyai simbol huruf I. Alat yang digunakan untuk mengukur arus listrik adalah Ampermeter (Muzakir, 2023). Arus listrik dapat dihitung dengan Persamaan (2).

$$I = \frac{V}{R} \quad (2)$$

Keterangan:

R = Resistansi (ohm)

V = Tegangan

I = Arus (ampere)

C. Daya Listrik

Daya listrik merupakan besarnya energi yang digunakan atau dihasilkan oleh perangkat listrik per satuan waktu. Besarnya daya ditentukan oleh arus dan tegangan yang melewati suatu hambatan, dengan satuan watt (P) yang menunjukkan energi listrik tiap detik (joule/detik). Sistem kelistrikan umumnya menggunakan daya AC, yang terdiri atas daya aktif (P), daya semu (S), dan daya reaktif (Q) (Alfian, 2021) dengan persamaan rumus (3), (4), (5).

Daya aktif merupakan daya sebenarnya yang digunakan oleh beban dan dihitung dengan:

$$P = V \times I \times \cos \varphi \quad (3)$$

Daya semu menunjukkan total daya gabungan antara daya aktif dan reaktif dengan satuan volt-ampere (VA) dengan persamaan:

$$S = V \times I \quad (4)$$

Sedangkan daya reaktif merupakan daya yang dibutuhkan untuk membentuk medan magnet dan tidak dihaburkan oleh beban, dihitung dengan:

$$Q = V \times I \times \sin \varphi \quad (5)$$

Keterangan:

P = daya (watt)

V = tegangan

I = arus (ampere)

$\cos \varphi$ = faktor daya (pF)

D. Faktor Daya (Power Factor)

Faktor daya (pF) merupakan perbandingan antara daya aktif (P) dan daya semu (S), yang menunjukkan efisiensi penggunaan energi listrik. Nilainya berkisar antara 0 hingga 1, di mana semakin tinggi faktor daya, semakin efisien energi digunakan. Semakin besar komponen daya reaktif, sudut φ meningkat sehingga faktor daya menurun (Adiwiranto dan Catur, 2021). Faktor daya dapat dihitung dengan:

$$\cos \varphi = \frac{P \text{ (watt)}}{S \text{ (VA)}} \quad (6)$$

E. Energi Listrik

Energi listrik (E) adalah total energi yang digunakan perangkat listrik dalam periode waktu tertentu. Satunya adalah kilowatt-jam (kWh), yang menunjukkan konsumsi daya per jam, dan dihitung menggunakan persamaan:

$$E = \frac{P \times t}{1000} \quad (7)$$

Keterangan:

P = daya (watt)

t = waktu (jam)

E = energi dalam kilowatt-jam (kWh)

F. Tarif Listrik per kWh

Satuan kWh digunakan untuk menentukan biaya pemakaian listrik rumah tangga, di mana 1 kWh menunjukkan penggunaan daya sebesar 1000 watt selama 1 jam. Biaya listrik dihitung dengan mengalikan energi (kWh) dengan tarif per kWh (Muzakir, 2023; PLN, 2025), sebagaimana dirumuskan:

$$kWh = \frac{(watt \times jam)}{1000} \quad (8)$$

 PENETAPAN PENYESUAIAN TARIF TENAGA LISTRIK (TARIFF ADJUSTMENT)

APRIL - JUNI 2025

NO.	GOL. TARIF	BATAS DAYA	REGULER		PRA BAYAR (Rp/kWh)
			BIAYA BEBAN (Rp/kVA/bulan)	BIAYA PEMAKAIAN (Rp/kWh) DAN BIAYA KVArh (Rp/kVArh)	
1.	R-1/TR	800 VA-RTM	"	1.362,00	1.362,00
2.	R-1/TR	1.300 VA	"	1.444,70	1.444,70
3.	R-1/TR	2.200 VA	"	1.444,70	1.444,70
4.	R-2/TR	3.500 VA s.d. 5.500 VA	"	1.699,53	1.699,53
5.	R-3/TR, TM	6.600 VA ke atas	"	1.699,53	1.699,53

Gambar 1. Tarif listrik per kWh

G. Fuzzy Logic

Logika fuzzy diperkenalkan oleh Lotfi A. Zadeh (1965) sebagai metode yang merepresentasikan pemikiran manusia secara fleksibel, tidak terbatas pada nilai benar (1) dan salah (0) seperti logika biner. Dalam logika fuzzy, derajat keanggotaan suatu elemen berada pada rentang 0 hingga 1, memungkinkan sistem memproses data yang tidak pasti atau ambigu (Husein dan Kharisma, 2020).

Logika fuzzy digunakan secara luas pada sistem pengambilan keputusan dan kendali otomatis karena mampu menghadapi ketidakpastian dan non-linearitas sistem, serta mudah diimplementasikan menggunakan bahasa linguistik. Komponen utama dalam logika fuzzy meliputi fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi.

Metode Mamdani, yang diperkenalkan oleh Ebrahim Mamdani (1975), merupakan metode inferensi fuzzy paling umum digunakan. Proses inferensi dilakukan dengan fungsi implikasi MIN dan agregasi MAX (dikenal sebagai *min-max inferencing*).

- 1) Fuzzifikasi, mengubah nilai input tegas menjadi himpunan linguistik berdasarkan derajat keanggotaan.
- 2) Inferensi, menghasilkan keluaran fuzzy dari aturan *IF-THEN* menggunakan operator logika.

$$\mu_{A \cap B} = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (9)$$

Keterangan:

$\mu_{A \cap B}$ = Derajat keanggotaan minimal A dan B

$\mu_A(x)$ = Derajat keanggotaan A

$\mu_B(x)$ = Derajat keanggotaan B

- 3) Defuzzifikasi, mengubah hasil fuzzy menjadi nilai tegas. Metode yang digunakan adalah Centroid (Center of Area), dengan rumus:

$$x^* = \frac{\int \mu(x)x dx}{\int \mu(x)dx} \quad (10)$$

Keterangan:

x^* = Output cipta hasil defuzzifikasi

x = Nilai variabel output fuzzy

$\mu(x)$ = Fungsi keanggotaan output fuzzy

H. Internet of Things

Internet of Things (IoT) merupakan konsep di mana perangkat fisik saling terhubung melalui jaringan internet untuk bertukar data dan beroperasi secara otomatis tanpa intervensi manusia (Adiwiranto dan Catur, 2021). Sistem IoT

terdiri atas sensor, mikrokontroler sebagai gateway, dan server cloud untuk pengolahan serta penyimpanan data (Hartono dkk., 2023). Dalam penelitian ini, sensor PZEM-004T digunakan untuk membaca parameter listrik yang dikirimkan ke ESP32 sebagai pengendali, kemudian diteruskan ke platform Blynk dan ThingSpeak untuk monitoring dan kendali jarak jauh.

I. ESP32

ESP32 adalah mikrokontroler dengan konektivitas Wi-Fi dan Bluetooth yang mendukung berbagai protokol komunikasi (SPI, I2C, UART). Modul ini beroperasi pada tegangan 3,3V, memiliki CPU dual-core 160 MHz, serta cocok untuk aplikasi IoT berdaya rendah dan pengendalian nirkabel (Utama, 2021).

J. PZEM-004T

Sensor ini digunakan untuk mengukur tegangan, arus, daya, faktor daya, dan energi pada sistem AC dengan rentang 80–260V dan arus hingga 100A. Data hasil pengukuran dikirim melalui komunikasi serial (TX-RX) ke mikrokontroler (Hartono dkk., 2023). Modul ini juga mampu menyimpan nilai energi (kWh) saat kehilangan daya.

K. Relay 5V

Relay berfungsi sebagai saklar elektronik yang mengontrol arus besar menggunakan sinyal kecil dari mikrokontroler. Relay memiliki dua kondisi utama: Normally Open (NO) dan Normally Close (NC), serta bekerja pada tegangan kendali 3–5V DC dengan kemampuan pengalihan arus hingga 7A (Hasan dan Erfian, 2023).

L. LCD I2C 20x4

LCD (Liquid Crystal Display) digunakan untuk menampilkan informasi hasil pengukuran. Antarmuka I2C hanya memerlukan dua jalur komunikasi (SDA dan SCL), sehingga mempercepat koneksi dan menghemat pin mikrokontroler. Modul ini menggunakan chip PCF8574T untuk ekspansi I/O (Ibrahim dan Bekti, 2022).

M. Power Supply dan LM2596

Sistem mendapat suplai dari Switch Mode Power Supply (SMPS) yang mengubah arus AC menjadi DC dengan efisiensi tinggi (>60%). Modul LM2596 digunakan sebagai regulator step-down untuk menurunkan tegangan input 4,5–40V menjadi output stabil hingga 3A (Putri dkk., 2024).

N. Blynk dan ThingSpeak

Blynk berfungsi sebagai aplikasi pengendali real-time berbasis Android/iOS yang menampilkan data dari mikrokontroler dan memungkinkan kontrol perangkat dari jarak jauh melalui internet (Hasan dan Erfian, 2023). ThingSpeak merupakan platform *cloud* IoT untuk penyimpanan dan analisis data sensor secara real-time menggunakan integrasi MATLAB (Winachyu, 2024).

O. Error dan MAPE

Tingkat akurasi sistem dinilai menggunakan persentase error dan Mean Absolute Percentage Error (MAPE). Dengan menggunakan persamaan (11) dan (12).

$$\% \text{ Error} = \left| \frac{(\text{Nilai Aktual} - \text{Nilai Pengujian})}{\text{Nilai Aktual}} \right| \times 100\% \quad (11)$$

$$\text{MAPE} = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (12)$$

Keterangan:

n = jumlah data

y_i = nilai aktual

\hat{y}_i = nilai pengujian

Nilai MAPE dapat diinterpretasikan seperti Tabel I.

Tabel I Evaluasi Nilai MAPE

MAPE (%)	Interpretasi
<10	Sangat baik
10 – 20	Baik
20 – 50	Wajar
>50	Tidak akurat

III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen terapan yang bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem kendali dan monitoring konsumsi listrik satu fasa berbasis IoT dengan metode logika *fuzzy* Mamdani. Proses penelitian dilakukan selama dua bulan di Kelurahan Potrobangsang, Magelang Utara.

Alat dan Bahan yang dibutuhkan untuk mendukung pelaksanaan penelitian. Alat yang digunakan pada Tabel II, sedangkan bahan ditunjukkan pada Tabel III.

Tabel II Alat Penelitian

No	Nama Barang	Kegunaan
1	Laptop	Menunjang seluruh penelitian
2	Smartphone	Sebagai <i>interface</i> (mobile) platform IoT
3	Tang Kombinasi	Membantu proses rancang sistem hardware
4	Multimeter	Alat ukur pembanding sistem hardware
5	Solder	Memanaskan temah dan menyambung komponen pada jalur PCB
6	Kabel data	Mengirim data program dari Arduino IDE ke ESP32
7	Obeng	Mengencangkan dan melepaskan baut

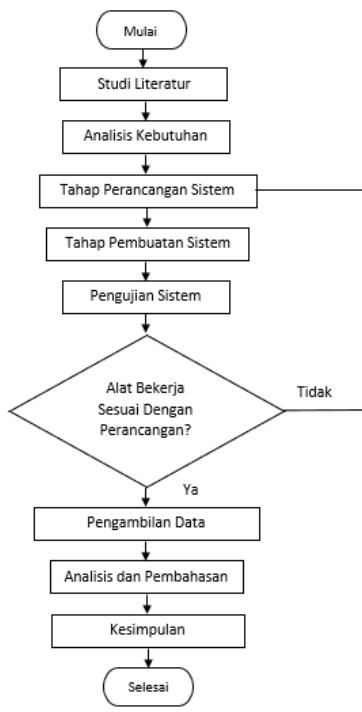
Bahan yang digunakan ditunjukkan pada Tabel III.

Tabel III Bahan Penelitian

No	Nama Barang	Kegunaan
1	Sensor PZEM-004T V3	Sensor untuk membaca tegangan, arus, daya, energi, dan Current Trasformer faktor daya listrik

2	ESP32	Sebagai mikrokontroler untuk menjalankan sistem
3	Modul Relay 5V	Mengendalikan beban listrik
4	Power Supply 220VAC – 12VDC 3A	Mengkonversi tegangan AC ke DC untuk supply mikrokontroler
5	Step Down DC – DC 3-40 V LM2596	Penurun tegangan power supply 12 ke 5 VDC untuk suplai mikrokontroler
6	LCD I2C 20x4	Menampilkan data monitoring konsumsi listrik
7	Stop kontak 1 lubang	Output beban listrik
8	Kabel power supply	Mengalirkan arus listrik AC ke PZEM-004T dan Relay 5V
9	PCB	Komponen papan untuk merakit rangkaian elektronik secara permanen.
10	Kabel jumper	Menghubungkan antara pin pada modul dengan mikrokontroller
11	Kabel konektor JST Female 4P	Sebagai kabel koneksi PZEM-004T dengan ESP32
12	Kabel listrik kawat	Mendistribusikan arus listrik AC dengan sistem
13	Box	Packaging alat sistem

Dengan tahapan penelitian terdiri atas beberapa tahap seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Adapun penjelasan mengenai diagram alir tahapan yang akan dilakukan dalam penelitian sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Tahap pertama, yaitu melakukan literatur *review* terhadap berbagai jurnal ilmiah sebagai dasar acuan dan penguatan terhadap penelitian ini. Literatur yang dibutuhkan mengusung topik kendali dan monitoring konsumsi listrik dengan menggunakan teknologi *Internet of Things* dan logika *fuzzy Mamdani* sebagai metode pengolahan data konsumsi listrik.

2. Analisis Kebutuhan Sistem

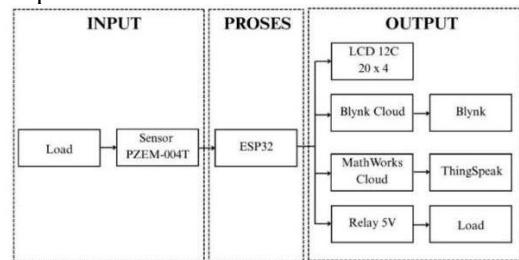
Analisis kebutuhan sistem dilakukan untuk menentukan fungsi utama yang harus dipenuhi agar sistem dapat berjalan dengan baik. Sistem yang dirancang harus mampu membaca parameter kelistrikan berupa tegangan, arus, daya, energi, dan faktor daya menggunakan sensor PZEM-004T. Hasil pengukuran ditampilkan secara real-time melalui LCD I2C 20×4 serta platform Internet of Things (IoT) seperti Blynk dan ThingSpeak. Sistem juga harus mampu mengolah data dengan metode logika fuzzy Mamdani untuk menentukan kondisi tingkat konsumsi listrik, kemudian mengendalikan beban listrik menggunakan modul relay 5V berdasarkan hasil proses fuzzy. Selain itu, sistem perlu menyimpan data konsumsi listrik ke dalam basis data ThingSpeak agar pengguna dapat memantau riwayat konsumsi listrik dalam bentuk grafik dan tabel untuk keperluan analisis jangka panjang.

3. Perancangan Sistem

Perancangan sistem terdiri atas dua bagian utama, yaitu perancangan perangkat keras (hardware) dan perangkat lunak (software) yang saling terintegrasi untuk membentuk sistem kendali dan monitoring konsumsi listrik berbasis IoT dengan metode Fuzzy Mamdani.

a. Perancangan Hardware

Perancangan perangkat keras dilakukan agar sistem bekerja secara terstruktur sesuai fungsi input, proses, dan output. Gambar 3 menunjukkan diagram blok sistem yang menggambarkan hubungan antar komponen utama.



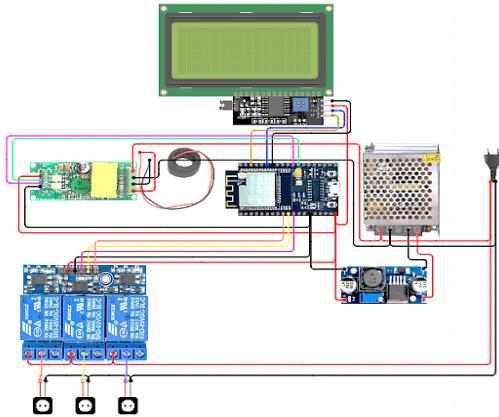
Gambar 3 Diagram Blok Sistem

Diagram blok terdiri atas tiga bagian utama:

- Input: Sensor PZEM-004T berfungsi membaca tegangan (V), arus (A), daya (W), energi (kWh), dan faktor daya (pF).
- Proses: Data dari sensor diolah oleh mikrokontroler ESP32 untuk menentukan tingkat konsumsi listrik menggunakan metode logika fuzzy Mamdani.
- Output: Data hasil pengolahan ditampilkan melalui LCD I2C 20×4, platform IoT Blynk,

dan ThingSpeak; serta relay 5V digunakan untuk mengendalikan beban listrik.

Pada rancangan wiring diagram sistem yang dibuat terdapat beberapa rangkaian utama yaitu ESP32, Sensor PZEM-004T, Modul Relay 5V, LCD 12C 20×4, Power Supply 220VAC – 5VDC 3A, Step Down DC – DC 3 – 40V, Stop kontak 1 lubang, dan kabel power supply.

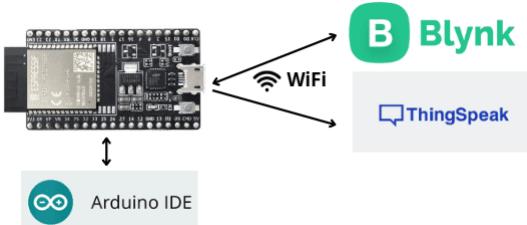


Gambar 4 Wiring Diagram Rangkaian Sistem

Wiring diagram menggambarkan koneksi antara ESP32, sensor PZEM-004T, relay 5V, LCD I2C, dan power supply. Sensor PZEM-004T terhubung dengan ESP32 melalui pin RX dan TX, sedangkan relay dikendalikan melalui pin D25–D27 untuk mengatur tiga saluran beban. Catu daya sistem berasal dari power supply 12VDC yang diturunkan menjadi 5VDC melalui modul LM2596 agar sesuai dengan kebutuhan ESP32 dan modul lainnya.

b. Perancangan Software

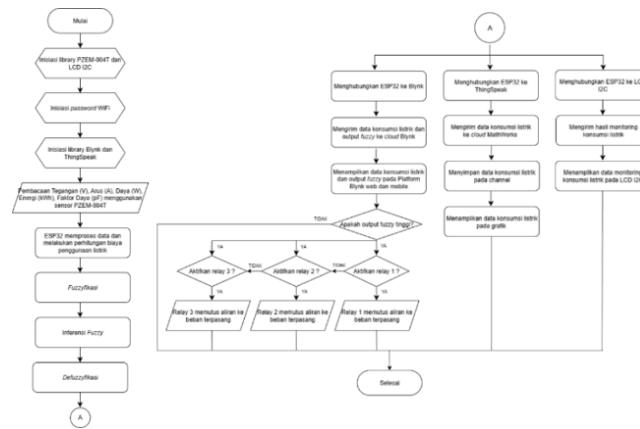
Perancangan perangkat lunak dilakukan untuk mengatur proses kerja sistem dan komunikasi antar komponen IoT. Program utama dijalankan pada Arduino IDE, sedangkan integrasi IoT dilakukan melalui Blynk dan ThingSpeak. Arsitektur hubungan sistem perangkat lunak ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5 Rangkaian Perangkat Lunak

Data disimpan dan ditampilkan pada database ThingSpeak meliputi *widgets* grafik tegangan, arus, daya, energi (kWh), faktor daya, estimasi biaya, dan persentase tingkat konsumsi listrik. Data yang ditampilkan pada *widgets* dapat di *export* dalam bentuk data excel.

Diagram alir kerja menggambarkan proses alur kerja sistem yang akan dibuat. Langkah-langkah alur kerja sistem pada penelitian ini dijelaskan pada Gambar 6.



Gambar 6 Diagram Alir Kerja Sistem

Tahapan prosesnya meliputi:

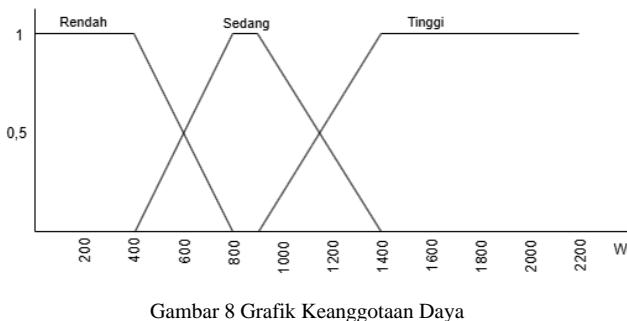
1. Inisialisasi library sensor dan koneksi Wi-Fi.
2. Pembacaan parameter listrik oleh PZEM-004T.
3. Pengolahan data pada ESP32 untuk menghitung konsumsi daya dan biaya listrik.
4. Proses fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi menggunakan metode Centroid.
5. Pengiriman hasil ke LCD, Blynk, dan ThingSpeak melalui protokol TCP dan HTTP API.
6. Pengguna dapat melakukan kendali beban listrik secara otomatis atau manual melalui aplikasi Blynk berdasarkan hasil defuzzifikasi tingkat konsumsi listrik.

4. Perancangan Logika Fuzzy Mamdani

Sistem fuzzy pada penelitian ini menggunakan tiga variabel input, yaitu daya (W), energi (kWh), dan faktor daya (pF), serta satu variabel output, yaitu tingkat konsumsi listrik (%). Masing-masing variabel memiliki tiga himpunan linguistik. Variabel daya dan energi diadaptasi dari penelitian Suprapto dan Pastima (2020), sedangkan variabel faktor daya mengacu pada Fithroh (2021), dengan kategori *Buruk* ($<0,6$), *Cukup* ($0,6–0,8$), dan *Baik* ($>0,8$).

a. Variabel Daya (W)

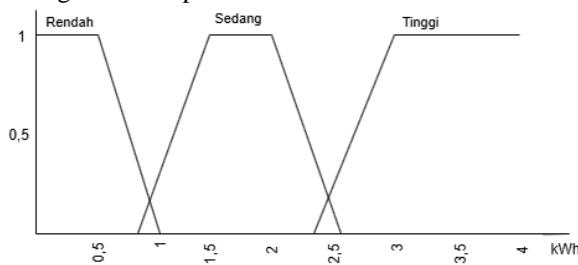
Memiliki tiga himpunan linguistik: Rendah (0–800 W), Sedang (400–1400 W), dan Tinggi (850–2200 W). Grafik keanggotaan daya dapat digambarkan pada Gambar 8.



Gambar 8 Grafik Keanggotaan Daya

b. Variabel Energi (kWh)

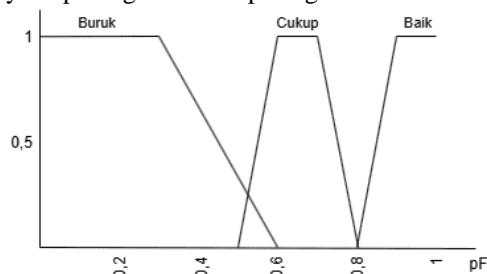
Memiliki tiga himpunan linguistik: Rendah (0–1 kWh), Sedang (0,83–2,55 kWh), dan Tinggi (2,33–4 kWh). Grafik keanggotaan energi dapat digambarkan pada Gambar 9.



Gambar 9 Grafik Keanggotaan Energi

c. Variabel Faktor Daya (pF)

Memiliki tiga himpunan linguistik: Buruk ($\leq 0,6$), Cukup (0,5–0,8), dan Baik (0,8–1,0). Nilai faktor daya yang semakin rendah menunjukkan efisiensi penggunaan energi listrik yang semakin buruk. Grafik keanggotaan faktor daya dapat digambarkan pada gambar 10.

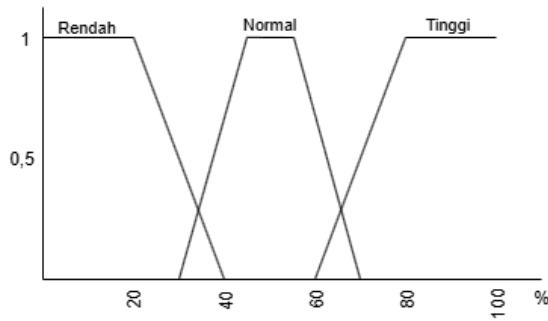


Gambar 10. Grafik Keanggotaan Faktor Daya

d. Variabel Tingkat Konsumsi Listrik

Sebagai variabel output dengan tiga himpunan linguistik: Rendah (0–40 %), Normal (30–70 %), dan Tinggi (60–100 %).

Nilai ini diperoleh dari hasil proses defuzzifikasi metode Centroid yang menggambarkan kondisi pemakaian daya aktual. Grafik keanggotaan konsumsi listrik dapat digambarkan pada Gambar 10.



Gambar 11 Grafik Keanggotaan Konsumsi Listrik

5. Pembuatan dan Implementasi Sistem

Proses pembuatan alat dilakukan setelah tahap perancangan selesai. Tahapan ini diawali dengan menyiapkan seluruh alat dan bahan yang dibutuhkan dalam penelitian. Selanjutnya, dilakukan perancangan aturan logika fuzzy yang akan digunakan dalam sistem. Setelah itu, dirancang rangkaian sistem perangkat keras, kemudian dilakukan pemrograman mikrokontroler ESP32 menggunakan perangkat lunak Arduino IDE. Tahap berikutnya adalah perancangan tampilan platform IoT Blynk pada versi website dan mobile, serta perancangan platform ThingSpeak sebagai database berbasis web. Setelah seluruh komponen dan sistem perangkat lunak siap, dilakukan proses integrasi antara ESP32, Blynk, dan ThingSpeak agar sistem dapat saling terhubung dan berfungsi secara *real-time*. Tahap akhir adalah implementasi alat secara keseluruhan serta pengujian untuk memastikan sistem bekerja sesuai dengan tujuan penelitian.

6. Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan untuk memastikan kinerja perangkat berjalan sesuai rancangan dan fungsinya. Tahapan pengujian meliputi kalibrasi sensor PZEM-004T, fungsionalitas mikrokontroler ESP32, serta uji kinerja logika fuzzy Mamdani. Sensor PZEM-004T diuji untuk membaca parameter tegangan, arus, daya, energi, dan faktor daya dengan mengambil 15 sampel pada berbagai kondisi beban. Nilai hasil pengukuran dibandingkan dengan alat ukur pembanding menggunakan metode Mean Absolute Percentage Error (MAPE) untuk menilai tingkat akurasi sensor.

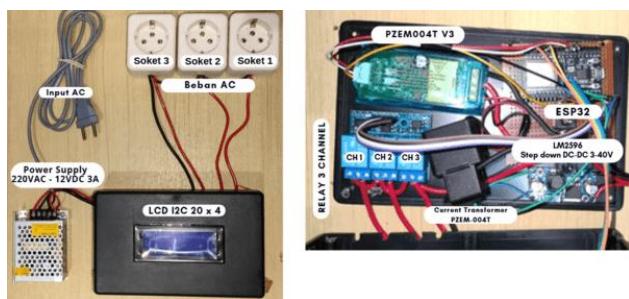
Pengujian ESP32 mencakup kemampuan menghitung biaya konsumsi listrik berdasarkan data energi (kWh), koneksi terhadap jaringan Wi-Fi, serta integrasi dengan LCD I2C, Blynk, dan ThingSpeak. Hasil pengujian menunjukkan ESP32 mampu menampilkan data *real-time*, mengirimkan informasi ke cloud, serta mengendalikan beban melalui modul relay. Pengujian logika fuzzy Mamdani dilakukan untuk menentukan tingkat konsumsi listrik (rendah, normal, tinggi) berdasarkan variabel daya, energi, dan faktor daya. Nilai defuzzifikasi diuji terhadap hasil manual untuk memperoleh tingkat akurasi sistem dengan nilai MAPE <19,60% sesuai acuan. Pengujian dilakukan menggunakan variasi beban seperti rice cooker, setrika,

kipas angin, charger laptop, dan charger handphone, selama periode pengujian satu minggu.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Perancangan Perangkat Keras

Hasil sistem kendali dan monitoring konsumsi listrik satu fasa berbasis *Internet of Things* (IoT) berhasil dibuat dengan menggabungkan sensor PZEM-004T, mikrokontroler ESP32, modul relay 3 channel, serta platform Blynk dan ThingSpeak. Sistem ini mampu membaca parameter listrik (tegangan, arus, daya, energi, dan faktor daya), menghitung biaya konsumsi, serta mengendalikan beban listrik secara *real-time*.



Gambar 12 Alat Kendali dan Monitoring Konsumsi Listrik Satu Fasa

B. Aturan Fuzzy Mamdani

Logika fuzzy digunakan untuk mengklasifikasikan kondisi konsumsi listrik menjadi rendah, normal, dan tinggi dengan input: daya, energi, dan faktor daya. Terdapat 27 aturan fuzzy menggunakan metode Mamdani dengan operator AND (min) dan defuzzifikasi centroid. Sistem ini menghasilkan keputusan otomatis untuk memantau dan memberi peringatan konsumsi listrik berlebih. Tabel IV menunjukkan aturan keputusan fuzzy.

Tabel IV Aturan Keputusan Fuzzy

Rules	Daya	Energi	Faktor Daya	Kondisi Konsumsi Listrik
1	Rendah	Jika	Rendah	Jika
2	Rendah	Jika	Rendah	Cukup
3	Rendah	Jika	Rendah	Baik
4	Rendah	Jika	Sedang	Buruk
5	Rendah	Jika	Sedang	Maka
6	Rendah	Jika	Sedang	Rendah
7	Rendah	Jika	Tinggi	Buruk
8	Rendah	Jika	Tinggi	Cukup
9	Rendah	Jika	Tinggi	Baik
10	Sedang	Jika	Rendah	Buruk
11	Sedang	Jika	Rendah	Cukup
12	Sedang	Jika	Rendah	Maka
13	Sedang	Jika	Sedang	Rendah
14	Sedang	Jika	Sedang	Jika
15	Sedang	Jika	Sedang	Baik
16	Sedang	Jika	Tinggi	Buruk
17	Sedang	Jika	Tinggi	Cukup
18	Sedang	Jika	Tinggi	Baik
19	Tinggi	Jika	Rendah	Buruk
20	Tinggi	Jika	Rendah	Cukup
21	Tinggi	Jika	Rendah	Baik
22	Tinggi	Jika	Sedang	Buruk
23	Tinggi	Jika	Sedang	Cukup
24	Tinggi	Jika	Sedang	Baik
25	Tinggi	Jika	Tinggi	Buruk
26	Tinggi	Jika	Tinggi	Cukup
27	Tinggi	Jika	Tinggi	Baik

12	Sedang	Jika	Rendah	Jika	Baik	Maka	Rendah
13	Sedang	Jika	Sedang	Jika	Buruk	Maka	Normal
14	Sedang	Jika	Sedang	Jika	Cukup	Maka	Normal
15	Sedang	Jika	Sedang	Jika	Baik	Maka	Normal
16	Sedang	Jika	Tinggi	Jika	Buruk	Maka	Tinggi
17	Sedang	Jika	Tinggi	Jika	Cukup	Maka	Tinggi
18	Sedang	Jika	Tinggi	Jika	Baik	Maka	Tinggi
19	Tinggi	Jika	Rendah	Jika	Buruk	Maka	Normal
20	Tinggi	Jika	Rendah	Jika	Cukup	Maka	Normal
21	Tinggi	Jika	Rendah	Jika	Baik	Maka	Tinggi
22	Tinggi	Jika	Sedang	Jika	Buruk	Maka	Tinggi
23	Tinggi	Jika	Sedang	Jika	Cukup	Maka	Tinggi
24	Tinggi	Jika	Sedang	Jika	Baik	Maka	Tinggi
25	Tinggi	Jika	Tinggi	Jika	Buruk	Maka	Tinggi
26	Tinggi	Jika	Tinggi	Jika	Cukup	Maka	Tinggi
27	Tinggi	Jika	Tinggi	Jika	Baik	Maka	Tinggi

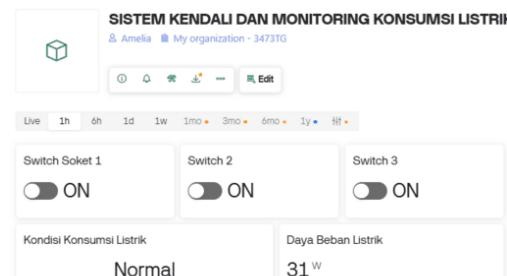
C. Tampilan Platform IoT

a. Platform Blynk

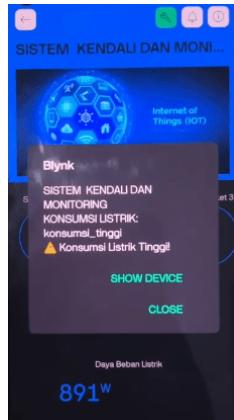
Antarmuka Blynk menampilkan data parameter listrik, status konsumsi (rendah, normal, dan tinggi), serta kontrol beban melalui switch digital. Notifikasi dikirim saat konsumsi tinggi untuk memudahkan pengendalian jarak jauh.



Gambar 13. Tampilan Platform Blynk App



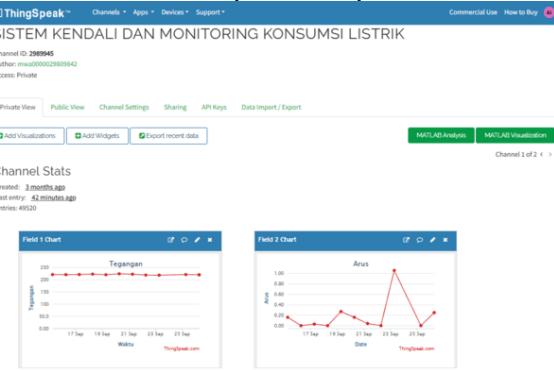
Gambar 14. Tampilan Platform Blynk Website



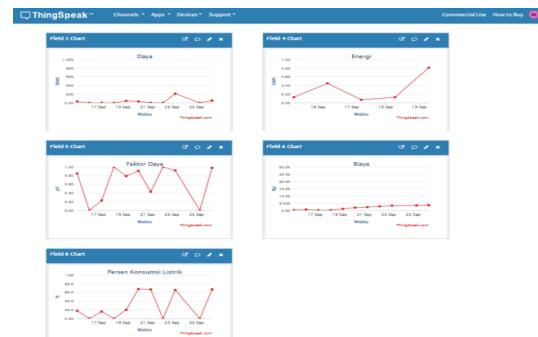
Gambar 15. Notifikasi Peringatan Konsumsi Listrik Tinggi

b. Platform ThingSpeak

ThingSpeak digunakan untuk penyimpanan dan visualisasi data konsumsi listrik berupa grafik tegangan, arus, daya, energi, faktor daya, biaya, dan persentase konsumsi listrik secara periodik tiap 15 detik.



Gambar 16. Tampilan Platform ThingSpeak (a)



Gambar 16. Tampilan Platform ThingSpeak (b)

D. Implementasi dan Pengujian Sistem

Perangkat diimplementasikan dan diuji menggunakan beban *rice cooker*, setrika, kipas angin, dan *charger*. Hasil pengukuran ditampilkan di LCD I₂C secara *real-time* serta dikirim ke *cloud IoT*.



Gambar 17 Implementasi Pengujian Perangkat dengan Beban *Rice Cooker* dan Setrika

a. Kalibrasi Sensor PZEM-004T

Pengujian kalibrasi sensor PZEM-004T dilakukan dengan menggunakan sampel variabel tegangan dan arus sebagai variabel utama dalam penentuan parameter variabel lainnya. Proses kalibrasi dilakukan dengan membandingkan nilai pengujian dan hasil pengukuran alat ukur (nilai aktual) pada 15 sampel dari masing-masing variasi beban yang berbeda, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel V.

Tabel V Data Pengujian Tegangan

No.	Beban	Nilai Watt	Nilai Aktual (Multimeter)	Nilai Pengujian (PZEM - 004T)	Persentase Error (%)
1	Setrika	275	220,3	220	0,14
2	Kipas Angin	21,8	225,1	224,7	0,18
3	Charger Laptop	32	222,4	222,2	0,09
4	Charger Hp	4,9	221,5	221	0,23
5	Rice cooker	207,7	220,3	220,2	0,05
6	Rice cooker Setrika,	451,6	217,7	217,3	0,18
7	Rice cooker Setrika, Charger Hp	269,9	220,3	219,9	0,18
8	Setrika, Charger Laptop	264,4	220,8	220,4	0,18
9	Setrika, Charger Laptop	284,6	220,5	220,2	0,14
10	Setrika, Charger Laptop	40,2	224,3	223,8	0,22
11	Setrika, Charger Laptop	27,7	226,4	225,9	0,22
12	Setrika, Charger Laptop	233,2	220,6	220,5	0,05
13	Setrika, Charger Laptop	212,7	221,1	220,8	0,14
14	Setrika, Charger Laptop	237	219,7	219,4	0,14

15	Charger Hp Charger Hp, Charger Laptop	32,2	222,7	222,5	0,09
MAPE (%)			0,15		

Data yang diperoleh dari setiap pengujian tegangan kemudian dihitung persentase *error* untuk mengetahui persentase selisih antara nilai aktual dan nilai pengujian. Berdasarkan Persamaan (11) dapat dihitung seperti berikut ini:

$$\% \text{ error} = \left| \frac{\text{Nilai Aktual} - \text{Nilai Pengujian}}{\text{Nilai Aktual}} \right| \times 100\%$$

$$\% \text{ error} = \left| \frac{(220,3 - 220)}{220,3} \right| \times 100\% = 0,14\%$$

Berdasarkan hasil persentase *error* Tabel III diperoleh nilai *Mean Absolute Error* (MAPE) sebesar 0,15 % dengan dihitung menggunakan Persamaan (11) sebagai berikut:

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100\%$$

$$\text{MAPE} = \left| \frac{0,14+0,18+0,09+0,23+0,05+0,18+0,18+0,14+0,22+0,22+0,05+0,14+0,14+0,09}{15} \right|$$

$$\text{MAPE} = 0,15\%$$

Tabel VI menunjukkan data pengujian arus dari 15 sampel beban berbeda.

Tabel VI Data Pengujian Arus

No.	Beban	Watt	Nilai Aktual (Clamp Meter)	Nilai Pengujian (PZEM - 004T)	Persentase Error (%)
1	Setrika	275	0,12	0,11	8,33
2	Kipas Angin	21,8	1,52	1,34	11,84
3	Charger Laptop	32	0,25	0,22	12,00
4	Charger Hp	4,9	0,05	0,05	0,00
5	Rice cooker	207,7	1,18	1,03	12,71
6	Setrika, Rice cooker	451,6	2,75	2,4	12,73
7	Setrika, Charger Hp	269,9	1,58	1,37	13,29
8	Setrika, Charger Laptop	264,4	1,56	1,36	12,82
9	Kipas Angin Kipas	284,6	1,63	1,4	14,11
10	Angin, Charger Hp	40,2	0,2	0,18	10,00
11	Kipas Angin, Charger Laptop	27,7	0,15	0,15	0,00
12	Kipas Angin, Rice cooker	233,2	1,31	1,2	8,40
13	Rice cooker, Rice cooker	212,7	1,21	1,06	12,40

14	Charger Laptop Rice cooker, Charger Hp	237	1,24	1,19	4,03
15	Hp, Charger Laptop	32,2	0,3	0,28	6,67

$$\text{MAPE} (%) = 9,29$$

Data yang diperoleh dari setiap pengujian arus kemudian dihitung persentase *error* untuk mengetahui persentase selisih antara nilai aktual dan nilai pengujian. Berdasarkan Persamaan (11) dapat dihitung seperti berikut ini:

$$\% \text{ error} = \left| \frac{\text{Nilai Aktual} - \text{Nilai Pengujian}}{\text{Nilai Aktual}} \right| \times 100\%$$

$$\% \text{ error} = \left| \frac{(0,12 - 0,1)}{0,12} \right| \times 100\% = 16,67\%$$

Berdasarkan dari hasil persentase *error* pada tabel 4.3 diperoleh nilai *Mean Absolute Error* (MAPE) sebesar 9,29% dengan dihitung menggunakan Persamaan (11) sebagai berikut:

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100\%$$

$$\text{MAPE} = \left| \frac{8,33+11,84+12+0+12,71+12,73+13,29+12,82+14,11+10+0+8,4+12,4+4+0,03+6,67}{15} \right|$$

$$\text{MAPE} = 9,29\%$$

Pengujian sensor PZEM-004T terhadap pembacaan tegangan dan arus dilakukan untuk mengetahui tingkat keakuratan sensor. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai MAPE 0,15% dengan nilai kebenaran 99,85% diperoleh pada pengujian tegangan dan nilai MAPE 9,29% dengan nilai kebenaran 90,71% pada pengujian arus. Dengan demikian, sensor PZEM-004T dapat diinterpretasikan sebagai sensor yang memiliki akurasi sangat baik.

b. Kinerja Mikrokontroler ESP32

ESP32 mampu menghitung biaya listrik dengan selisih hanya Rp 0,2 dibanding perhitungan manual. Koneksi WiFi dan integrasi cloud berjalan stabil, dan sistem berhasil menampilkan data pada LCD, Blynk, dan ThingSpeak secara sinkron.



Gambar 11 Tampilan Hasil Perhitungan Biaya Listrik pada LCD I2C

Pada Gambar 18 biaya listrik yang dihasilkan adalah Rp 1.096, dengan perhitungan seperti berikut:

- Daya (W) = 32 (< 900 watt = Rp 1.352/kWh)
- Energi (kWh) = 1,6 kWh
- Biaya (Rp) = Energi (kWh) × 1.352 = 1,6 × 1.352 = Rp 2.163,2.

Berdasarkan hasil pengujian, alat menunjukkan nilai Rp 2.163, sedangkan perhitungan manual Rp 2.163,2. Dengan demikian, terdapat selisih sebesar Rp. 0,2. Hal ini membuktikan bahwa sistem yang dirancang mampu menghitung biaya konsumsi listrik secara akurat.



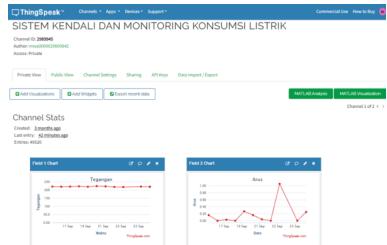
Gambar 12 Tampilan Hasil Pengujian Koneksi Wi-Fi



Gambar 3 Tampilan Hasil Pengujian LCD I2C



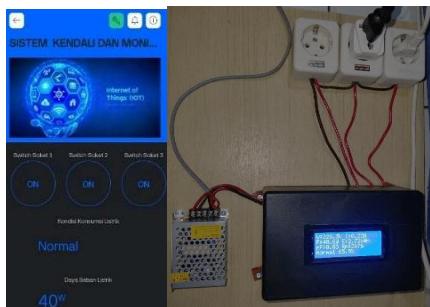
Gambar 4 Tampilan Hasil Pengujian Koneksi Cloud Blynk



Gambar 5 Tampilan Hasil Pengujian Koneksi ThingSpeak

c. Pengendalian Beban

Pengujian modul relay menunjukkan respon ON/OFF real-time dari aplikasi Blynk berfungsi sempurna, memungkinkan pengguna memutus atau menyalakan beban listrik dari jarak jauh.



Gambar 6 Pengujian Kendali Beban dengan Blynk pada Posisi Switch Mati



Gambar 7 Pengujian Kendali Beban dengan Blynk pada Posisi Switch Menyalा

d. Pengujian Logika Fuzzy

Hasil perhitungan manual dan hasil uji program menunjukkan selisih rata-rata error < 2%, menandakan sistem fuzzy Mamdani berfungsi dengan akurasi sangat baik dalam menentukan kategori konsumsi listrik.

Berikut ini perhitungan manual logika fuzzy Mamdani pada sistem kendali dan monitoring konsumsi listrik satu fasa dengan menggunakan data uji ke-4 berdasarkan rumus Persamaan 2.10.

Daya : 508 Watt

Energi : 2,55 kWh

Faktor Daya : 0,89 pF

a) Fuzzifikasi

1) Daya

Crisp input = 508

• Daya rendah:

$$\mu_{rendah}(508) = \frac{800 - 508}{800 - 400}, 400 \leq x \leq 800 \\ = \frac{292}{400} = 0,73$$

• Daya sedang:

$$\mu_{sedang}(508) = \frac{508 - 400}{800 - 400}, 400 \leq x \leq 800 \\ = \frac{108}{400} = 0,27$$

2) Energi

Crisp input = 2,55

• Energi tinggi:

$$\mu_{tinggi}(2,55) = \frac{2,55 - 2,33}{3 - 2,33}, 2,33 \leq x \leq 3 \\ = \frac{0,22}{0,67} = 0,32$$

3) Faktor daya

Crisp input = 0,89

• Faktor daya baik

$$\mu_{baik}(0,89) = \frac{0,89 - 0,8}{0,9 - 0,8}, 0,8 \leq x \leq 0,9 \\ = \frac{0,09}{0,1} = 0,9$$

b) Inferensi Fuzzy

Pada tahap ini fuzzy input akan diproses di tahapan aturan fuzzy dengan inferensi operator min dan max dari 27 rules. Berdasarkan hasil fuzzifikasi, aturan yang aktif adalah:

- IF DAYA rendah AND ENERGI tinggi AND FAKTOR DAYA baik THEN KONDISI KONSUMSI LISTRIK normal.

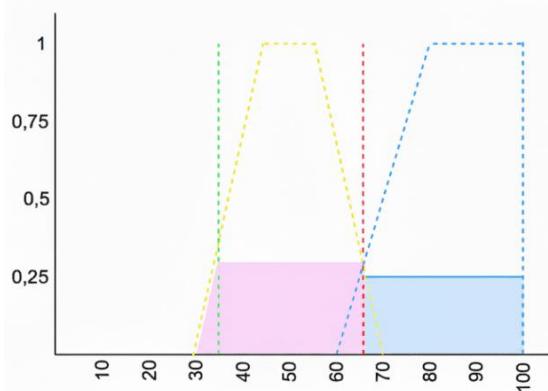
2. IF DAYA sedang AND ENERGI tinggi AND FAKTOR DAYA baik THEN KONDISI KONSUMSI LISTRIK tinggi.

Mencari fungsi \min dari rule yang pertama:

$$\begin{aligned}\mu_R &= \mu_{dRENDAH}[x] \cap \mu_eTINGGI[x] \cap \mu_pBAIK[x] \\ &= \min(\mu_{dRENDAH}[508] \cap \mu_eTINGGI[2,55] \cap \mu_pBAIK[0,89]) \\ &= \min(0,73; 0,32; 0,9) \\ &= 0,32\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_T &= \mu_{dSEDANG}[x] \cap \mu_eTINGGI[x] \cap \mu_pBAIK[x] \\ &= \min(\mu_{dSEDANG}[508] \cap \mu_eTINGGI[2,55] \cap \mu_pBAIK[0,89]) \\ &= \min(0,27; 0,32; 0,9) \\ &= 0,27\end{aligned}$$

c) Komposisi Aturan



Gambar 8 Grafik Implikasi dan Agregasi (Titik Potong dan Cross)

1. Normal dengan derajat keanggotaan $\mu_{aNORMAL} = 0,32$

- Titik potong 1 (sisi kiri, naik dari 30 – 45)

$$\frac{t_1 - 30}{30 - 45} = 0,32$$

$$t_1 - 30 = 0,32 \times 15$$

$$t_1 - 30 = 4,8$$

$$t_1 = 4,8 + 30$$

$$t_1 = 34,8$$

- Titik potong 2 (sisi kanan, turun dari 55 – 70)

$$\frac{70 - t_2}{70 - 55} = 0,32$$

$$70 - t_2 = 0,32 \times 15$$

$$70 - 4,8 = t_2$$

$$t_2 = 65,2$$

2. Tinggi dengan derajat keanggotaan $\mu_{aTINGGI} = 0,27$

- Titik potong 3 (perpotongan kurva kanan fungsi Normal dengan garis $\mu = 0,27$)

$$\frac{70 - t_3}{70 - 55} = 0,27$$

$$70 - t_3 = 0,27 \times 15$$

$$70 - 4,05 = t_3$$

$$t_3 = 65,95$$

Berdasarkan hasil inferensi, diperoleh daerah solusi fuzzy (fungsi keanggotaan gabungan) yang merupakan hasil komposisi dari aturan Normal dan Tinggi. Fungsi keanggotaan agregat ($\mu_{agg}[x]$) ditulis sebagai berikut:

$$\mu_{agg}[x] = \begin{cases} 0; & x \leq 30 \\ \frac{x-30}{15}; & 30 \leq x \leq 34,8 \\ 0,32; & 34,8 \leq x \leq 65,2 \\ \frac{70-x}{15}; & 65,2 \leq x \leq 65,95 \\ 0,27; & 65,95 \leq x \leq 100 \end{cases}$$

d) Defuzzifikasi

Perhitungan defuzzifikasi dilakukan dengan menggunakan metode *centroid*. Prosesnya terdiri dari perhitungan luas area (A) dan moment (M), kemudian dicari titik pusat daerah fuzzy.

- 1) Perhitungan Luas Area (A):

$$\begin{aligned}A1 &= \int \mu(x) dx \\ &= \int_{30}^{34,8} \frac{x-30}{15} dx = \frac{(x-30)^2}{30} = \frac{(34,8-30)^2}{30} = \\ &\quad \frac{4,8^2}{30} = 0,76\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}A2 &= \int \mu(x) dx \\ &= \int_{34,8}^{65,2} 0,32 dx = 0,32 (65,2 - 34,8) = \\ &\quad 0,32 (30,4) = 9,72\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}A3 &= \int \mu(x) dx \\ &= \int_{65,2}^{65,95} \frac{70-x}{15} dx = \frac{70}{15} (65,95 - 65,2) - \\ &\quad \frac{1}{30} (65,95^2 - 65,2^2) \\ &= \frac{70}{15} (0,75) - \frac{1}{30} (98,36) = 3,5 - 3,27 = \\ &\quad 0,23\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}A4 &= \int \mu(x) dx \\ &= \int_{65,95}^{100} 0,27 dx = 0,27 (100 - 65,95) = \\ &\quad 0,27 (34,05) = 9,19\end{aligned}$$

Sehingga:

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 = 0,76 + 9,72 + 0,23 + 9,19 = 19,9$$

- 2) Perhitungan Moment (M):

$$\begin{aligned}M1 &= \int \mu(x)x \cdot dx \\ &= \int_{30}^{34,8} \frac{x-30}{15} x \cdot dx \\ &= \frac{1}{15} \int_{30}^{34,8} (x-30)x \cdot dx \\ &= \frac{1}{15} \int_{30}^{34,8} (x^2 - 30x) dx = \frac{x^3}{3} - 15x^2 \\ &= \frac{1}{15} \left[\frac{x^3}{3} - 15x^2 \right]_{30}^{34,8} \\ &= \frac{1}{15} \left(\left(\frac{34,8^3}{3} - 15(34,8)^2 \right) - \left(\frac{30^3}{3} - 15(30)^2 \right) \right) \\ &= \frac{1}{15} ((-4117,53) - (-4500)) = \frac{1}{15} (382,47) = \\ &\quad 25,49\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M2 &= \int \mu(x)x \cdot dx \\ &= \int_{34,8}^{65,2} 0,32 x \cdot dx \\ &= \int_{34,8}^{65,2} \frac{0,32x^2}{2} \\ &= 0,32 \left[\frac{x^2}{2} \right]_{34,8}^{65,2}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 0,32 \left(\left(\frac{65,2^2}{2} \right) - \left(\frac{34,8^2}{2} \right) \right) \\
 &= 0,32((2125,52) - (605,52)) = 0,32(1520) = 486,4 \\
 M_3 &= \int \mu(x)x \cdot dx \\
 &= \int_{65,2}^{65,95} \frac{(70-x)}{15} x \cdot dx \\
 &= \frac{1}{15} \int_{65,2}^{65,95} (70-x)x \cdot dx \\
 &= \frac{1}{15} \int_{65,2}^{65,95} (70x - x^2) dx = 35x^2 - \frac{x^3}{3} \\
 &= \frac{1}{15} \left[35x^2 - \frac{x^3}{3} \right]_{65,2}^{65,95} \\
 &= \frac{1}{15} \left(\left(35(65,95)^2 - \frac{65,95^3}{3} \right) - \left(35(65,2)^2 - \frac{65,2^3}{3} \right) \right) \\
 &= \frac{1}{15} ((56.614,72) - (56.397,13)) \\
 &= \frac{1}{15} (217,59) = 14,56 \\
 M_4 &= \int \mu(x)x \cdot dx \\
 &= \int_{65,95}^{100} 0,27x \cdot dx \\
 &= \int_{65,95}^{100} \frac{0,27x^2}{2} \\
 &= 0,27 \left[\frac{x^2}{2} \right]_{65,95}^{100} \\
 &= 0,27 \left(\left(\frac{100^2}{2} \right) - \left(\frac{65,95^2}{2} \right) \right) \\
 &= 0,27((5000) - (2174,70)) = 0,32(2825,3) = 762,83
 \end{aligned}$$

Sehingga:

$$M = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 = 25,49 + 486,4 + 14,56 + 762,83 = 1.289,28$$

3) Titik Pusat (*Centroid*):

Sehingga, diperoleh titik pusat daerah fuzzy sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{\int_x \mu(x)xdx}{\int_x \mu(x)dx} \\
 x &= \frac{M_1+M_2+M_3+M_4}{A_1+A_2+A_3+A_4} \\
 x &= \frac{25,49+486,4+14,56+762,83}{0,76+9,72+0,23+9,19} \\
 x &= \frac{1.289,28}{19,9} = 64,78
 \end{aligned}$$

Tabel VII menunjukkan data pengujian *output fuzzy* Mamdani dengan lima sampel pengujian berdasarkan perbandingan antara hasil perhitungan manual dan hasil pengujian system.

Tabel VII Data Pengujian Output Fuzzy

Uji ke	Daya (Watt)	Energi (kWh)	Faktor Daya (pF)	Kondisi Konsumsi Listrik	Output Fuzzy Perhitungan Manual	Output Fuzzy Pengujian	Persentase Error (%)
1	48,3	0,22	0,74	Rendah	17,2	17,4	1,16
2	30,3	0,87	0,88	Rendah	24,34	23,9	1,81
3	202,6	1,03	0,88	Normal	50	50	0
4	508	2,55	0,89	Normal	64,78	66	1,88
5	910,2	2,6	0,91	Tinggi	81,94	80,3	2,00
MAPE (%)							1,37

Berdasarkan hasil pengujian output fuzzy, diperoleh nilai MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) sebesar 1,37% yang berarti diperoleh nilai kebenaran sebesar 98,63%. Nilai ini dihitung dari perbandingan antara output fuzzy hasil perhitungan manual dengan output fuzzy yang dihasilkan melalui program pada Arduino IDE. Hasil tersebut menunjukkan bahwa implementasi logika fuzzy dengan metode Mamdani yang diterapkan memiliki tingkat akurasi yang sangat baik. Dengan perbedaan antara perhitungan manual dan sistem relatif kecil sehingga sistem dapat dikatakan bekerja secara optimal.

E. Pembahasan

Sistem monitoring konsumsi listrik satu fasa berbasis IoT berhasil berfungsi sesuai rancangan. Sensor PZEM-004T menunjukkan akurasi tinggi dengan nilai MAPE tegangan 0,15% dan arus 9,29%, sedangkan mikrokontroler ESP32 mampu menghitung estimasi biaya listrik dengan selisih <1% serta terhubung stabil dengan Blynk dan ThingSpeak. Data ditampilkan secara *real-time* melalui LCD I2C dan Blynk, yang juga mengirim notifikasi otomatis saat konsumsi tinggi. Fitur kendali beban melalui relay bekerja dengan baik, memungkinkan pengendalian perangkat listrik jarak jauh.

Penerapan logika fuzzy Mamdani meningkatkan kecerdasan sistem dalam mengklasifikasikan konsumsi listrik menjadi rendah, normal, dan tinggi, dengan nilai MAPE 1,37% (akurasi 98,63%), lebih baik dibanding penelitian sebelumnya. Integrasi PZEM-004T, ESP32, relay, LCD I2C, Blynk, dan ThingSpeak menjadikan sistem ini efektif, efisien, dan informatif dalam memantau serta mengendalikan konsumsi listrik secara *real-time*.

V. PENUTUP

A. Kesimpulan

Sistem kendali dan monitoring listrik satu fasa berbasis IoT dengan metode logika fuzzy Mamdani telah berfungsi dengan baik dalam proses kendali, pemantauan, dan pemberian peringatan konsumsi listrik. Sensor PZEM-004T memiliki akurasi tinggi dengan nilai MAPE sebesar 0,15% untuk tegangan dan 9,29% untuk arus, sedangkan mikrokontroler ESP32 mampu menghitung estimasi biaya listrik dengan selisih kurang dari 1%. Platform Blynk dan ThingSpeak bekerja stabil dalam menampilkan data, mengendalikan beban, serta menyimpan hasil monitoring secara *realtime*. Implementasi logika fuzzy Mamdani menghasilkan nilai MAPE sebesar 1,37%, yang menunjukkan tingkat akurasi sangat baik. Secara keseluruhan, sistem ini terbukti efektif, efisien, dan informatif dalam memberikan informasi konsumsi listrik secara *realtime*.

B. Saran

Pengembangan berikutnya disarankan menggunakan tiga sensor PZEM-004T pada tiga relay dan stop kontak terpisah agar monitoring tiap beban lebih spesifik dan akurat. Sistem IoT sebaiknya dikembangkan agar seluruh fungsi monitoring, kendali, dan penyimpanan data terintegrasi dalam

satu platform. Pengujian juga perlu dilakukan dengan variasi beban dan waktu penggunaan yang lebih beragam, serta dilakukan perbandingan metode *fuzzy* dengan ANFIS atau *machine learning* untuk meningkatkan akurasi dan performa sistem.

REFERENSI

- Adiwiranto, M. N., & Waluyo, C. B. (2021). Prototipe Sistem Monitoring Konsumsi Energi Listrik Serta Estimasi Biaya Pada Peralatan Rumah Tangga Berbasis Internet of Things. *ELECTRON: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 2(2), 13–22. <https://doi.org/10.33019/electron.v2i2.2>
- Aenun, E. J., & Mashuri. (2022). Implementasi Logika Fuzzy Metode Mamdani Pada Prediksi Biaya Pemakaian Listrik. *UNNES Journal of Mathematics*, 11(2), 179–188. <http://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/ujme>
- Alfian, R. D. (2021). “Rancang bangun alat monitoring pemakaian tarif listrik dan kontrol daya listrik pada rumah kos berbasis internet of things” RANCANG BANGUN ALAT MONITORING PEMAKAIAN TARIF LISTRIK DAN KONTROL DAYA LISTRIK PADA RUMAH KOS BERBASIS INTERNET OF THINGS Subuh I.
- Alfian, Z. A., Hapsari, A. T., & Alhidayatuddinnyah, A. (2023). Monitoring Listrik Server dengan Fuzzy Logic Melalui IoT dan Aplikasi Web. *Jurnal Riset Dan Aplikasi Mahasiswa Informatika (JRAMI)*, 4(04), 775–783. <https://doi.org/10.30998/jrami.v4i04.8860>
- Ardiansyah, M. F., Lukita, M. B., Damanik, D. A., Saifudin, A., & Nirmala, E. (2021). Optimisasi Konsumsi Daya Listrik dengan Implementasi Logika Fuzzy-Mamdani Menggunakan Simulasi Matlab. 6(3), 527–535.
- Aritonang, C. L., Maisan, & Hais, R. H. (2020). Sistem Monitoring Tegangan, Arus, dan Intensitas Cahaya pada Panel Surya dengan Thingspeak. *Jurnal Engineering, Volume 2 N*, 24.
- Danuputri, C., Hakim, L., Susilo, W. S., & Samuel, F. D. (2020). Kontrol Pemakaian Peralatan Elektronik Berbasis Mikrokontroler Dan Algoritma Fuzzy Mamdani. *Jurnal RESISTOR (Rekayasa Sistem Komputer)*, 3(2), 94–107. <https://doi.org/10.31598/jurnalresistor.v3i2.646>
- ELECTRONICS, R. (n.d.). ADIY 3 CHANNEL RELAY - 5V (With Optocoupler). 4–6.
- Fithroh, A. (2021). Metode Klasifikasi Gangguan Daya Listrik Dengan Fuzzy Logic Berbasis Cloud. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro*, 6.
- Hamami, K., Muhsim, M., & Siswanto, D. (2020). Prototipe Sistem Monitoring Biaya. 1(2), 100–110.
- Hartono, D. R., Haddin, M., & Marwanto, A. (2023). Monitoring Daya Listrik Berbasis Internet of Things Menggunakan Metode Simple Exponential Smoothing untuk Prediksi Kebutuhan Energi. *CYCLOTRON: Jurnal Teknik Elektro*, 6(02), 59–67.
- Hasan, M. Z., & Junianto, E. (2023). Sistem Monitoring dan Kontrol Peralatan Listrik Berbasis IoT Menggunakan Aplikasi Blynk. *EProsiding Teknik Informatika*...4(2), 401–413.
- Hasanah, N., & Mukhaiyar, R. (2022). Pengaman alat elektronik perumahan pada jaringan distribusi tegangan rendah. *Jurnal Teknik Elektro Indonesia (JTEIN)*, 3(2), 345 – 356.
- Husein, J., & Kharisma, O. B. (2020). Kandang Ayam Berbasis Kendali Fuzzy dan IOT. February, 17–18.
- Ibrahim, R. R., & Yulianti, B. (2022). RANCANG BANGUN MONITORING PEMAKAIAN ARUS LISTRIK PLN BERBASIS IoT. *Jurnal Teknologi Industri*, 11(1), 43–51.
- Ikwan, & Djaksana, Y. M. (2021). Perancangan Sistem Monitoring Dan Kontrol Penggunaan Daya Listrik Berbasis Android. *Jurnal Riset Sistem Informasi Dan Teknologi Informasi (JURSISTEKNI)*, 3(1), 13–24. <https://doi.org/10.52005/jursistekni.v3i1.66>
- Krisnaningsih, A. (2023). Sistem Kendali Pemakaian Energi Listrik Berbasis Logika Fuzzy Pada Bangunan Gedung.
- Kristiawan, D. (2021). SMART CONTROL SYSTEM BEBAN RUMAH TANGGA MENGGUNAKAN METODE FUZZY LOGIC AHMAD FARIS TRI UTAMA Departemen Teknik Elektro Otomasi Fakultas Vokasi Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya 2021.
- Muzakir, A. (2023). SISTEM MONITORING DAYA LISTRIK INTERNET OF THINGS (IoT) MENGGUNAKAN ALGORITMA FUZZY LOGIC SUGENO DAN FIREBASE BERBASIS ANDROID. In ATTAWASSUTH: *Jurnal Ekonomi Islam: Vol. VIII* (Issue I).
- Pradana, A. A., Yuliantoro, P., & Indriyanto, S. (2024). Perancangan Sistem Monitoring Daya Listrik 1 Fasa Pada Rumah Tangga Berbasis Internet of Things. *Jurnal SINTA: Sistem Informasi Dan Teknologi Komputasi*, 1(1), 1–9. <https://doi.org/10.61124/sinta.v1i1.13>
- Putri, A. O., Tohir, T., & Putra, F. A. S. (2024). Rancang Bangun Sistem Monitoring Daya Listrik Rumah 900VA Berbasis Arduino Uno dan Node MCU ESP32 Melalui Aplikasi Blynk. *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*, 15(1), 466–472. <https://doi.org/10.35313/irwns.v1i1.6247>
- Rahmawati, Y., Fadhillah, K. L., & Kadarina, T. M. (2024). Analysis of Power Quality in Low Voltage Switch Panels in Real-Time Based on IoT Using the Fuzzy Logic Method. *JITE (Journal of Informatics and Telecommunication Engineering)*, 7(January), 486–501.
- Rohmah, R. N., Alwi, F. N., & Jatmiko, J. (2022). Alat Monitoring dan Pengendalian Konsumsi Listrik Rumah Tangga untuk Pengembangan Rumah Pintar Berbasis IoT. *Emitor: Jurnal Teknik Elektro*, 22(1), 34–38.
- Suarna, D., & Edy, E. S. (2023). Implementasi Internet of Things (IoT) dalam Memonitoring Komsumsi Listrik. *Bulletin of Information Technology (BIT)*, 4(2), 163–170. <https://doi.org/10.47065/bit.v4i2.631>
- Suprapto, H., & Simanjuntak, P. (2020). Fuzzy Logic Untuk Memprediksi Pemakaian Listrik. *Jurnal Comasic*, 3(2), 31–39.
- Technology, H. (2019). I2C Serial Interface 20x4 LCD Module. *Datasheet LCD 20X4 I2C Serial Interface*, 1–26. www.handsontec.com
- Ummah, M. S. (2024). LAPORAN KINERJA DITJEN KETENAGALISTRIKAN TAHUN 2024. *Sustainability (Switzerland)*, 11(1), 1–314.
- Watkins, A. J. (2020). PZEM-004T V3.0 User Manual. *Electrical Installation Calculations: Basic*, 86–88. <https://doi.org/10.4324/9780080953953-15>
- Winachyu, A. (2024). SISTEM MONITORING ARUS BOCOR BERBASIS INTERNET OF THINGS (IOT) PADA KABEL POWER 20KV GARDU INDUK 150KV SANGGRAHAN. *Ayan*, 15(1), 37–48.