

# SMART ENERGY MONITORING & LOAD CONTROL BERBASIS IOT DAN FUZZY LOGIC

Muhammad Hakim Firdaus<sup>1</sup>, Francesco Gusli Pratama<sup>2</sup>, Abudrrakhman Hamid Al-Azhari<sup>3</sup>  
Djuniadi<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup>Universitas Negeri Semarang; Jl. Raya Banaran, Sekaran, Kec. Gn. Pati, Kota Semarang, Jawa Tengah 50229; (024) 86008700

## Keywords:

Smart Energy, IoT, Fuzzy Logic, Load Control, MQTT, Voltage Stability, Energy Efficiency.

## Correspondent Email:

muhammadhakim@students.unnes.ac.id

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem *Smart Energy Monitoring & Load Control* berbasis *Internet of Things (IoT)* dan *Fuzzy Logic* untuk meningkatkan efisiensi dan stabilitas daya listrik di rumah tangga. Sistem terdiri dari tiga lapisan terintegrasi, yaitu (1) lapisan akuisisi data menggunakan sensor ACS712 dan ZMPT101B dengan *Analog to Digital Converter (ADC)* eksternal ADS1115 16-bit, (2) lapisan komunikasi *IoT* berbasis protokol *MQTT* dengan *broker Mosquitto*, dan (3) lapisan kontrol beban menggunakan *Fuzzy Logic Controller* dengan metode *Mamdani*. Pengujian menunjukkan akurasi sensor yang sangat tinggi (ACS712: 1.11%, ZMPT101B: 0.17%, ADS1115: 99.94% linearitas). Komunikasi *MQTT* mencapai *delivery rate* sebesar 99.25% dengan *latency* rata-rata 86.4 ms. *Fuzzy Logic Controller* memberikan respons konsisten 100% pada tiga skenario berbeda, yaitu kondisi normal, *overload*, dan *underload*, dengan waktu respons 1090 ms. Implementasi sistem berhasil meningkatkan stabilitas tegangan sebesar 61.3% (standar deviasi dari 6.2 V menjadi 2.4 V) serta efisiensi energi sebesar 8.6% (penghematan 25.8 kWh per bulan). *Data integrity* mencapai 99.917% dari total 7200 sampel pengujian selama 2 jam. Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa sistem *Smart Energy Monitoring & Load Control* berbasis *IoT* dan *Fuzzy Logic* bersifat *feasible*, *reliable*, dan mampu memberikan manfaat nyata dalam *smart energy management* pada rumah tangga modern.



Copyright © JITET (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan). This article is an open access article distributed under terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

This research aims to design and implement a Smart Energy Monitoring & Load Control system based on Internet of Things (IoT) and Fuzzy Logic to improve efficiency and power stability in households. The system consists of three integrated layers: (1) data acquisition layer using ACS712 and ZMPT101B sensors with 16-bit external ADC ADS1115, (2) IoT communication layer based on MQTT protocol with Mosquitto broker, and (3) load control layer using Fuzzy Logic Controller with Mamdani method. Testing shows very high sensor accuracy (ACS712: 1.11%, ZMPT101B: 0.17%, ADS1115: 99.94% linearity). MQTT communication achieves 99.25% delivery rate with average latency 86.4 ms. Fuzzy Logic Controller provides 100% consistent response on three different scenarios (normal, overload, underload) with response time 1090 ms. System implementation successfully improved voltage stability by 61.3% (standard deviation from 6.2V to 2.4V) and energy efficiency by 8.6% (saving 25.8 kWh/month). Data integrity reached 99.917% from 7200 samples of 2-hour testing. Research results show that Smart Energy Monitoring & Load Control system based on IoT and Fuzzy Logic is feasible, reliable, and can provide real benefits for modern household smart energy management.

## 1. PENDAHULUAN

Peningkatan permintaan energi listrik di sektor rumah tangga terus mengalami perkembangan seiring dengan semakin meningkatnya kebutuhan hidup masyarakat modern dan pesatnya kemajuan teknologi elektronik [1][2]. Penggunaan energi yang tidak terkontrol dengan baik dapat menyebabkan pemborosan, meningkatkan beban biaya operasional, serta memperburuk dampak lingkungan, terutama terkait dengan konsumsi energi yang berlebihan dan tidak efisien[3]. Untuk itu, penting bagi sektor rumah tangga maupun industri kecil untuk mengimplementasikan sistem pengendalian beban dan *monitoring* energi yang efisien agar dapat mengoptimalkan penggunaan energi listrik dan mengurangi pemborosan daya [4].

Salah satu pendekatan yang banyak digunakan dalam mengatasi masalah efisiensi energi adalah penerapan sistem berbasis *Internet of Things (IoT)*, yang memungkinkan pengelolaan energi secara otomatis dan *real-time* [5][6]. *IoT* telah berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir dan menjadi salah satu teknologi yang paling populer di bidang energi listrik, memungkinkan pengumpulan data secara *real-time* dari sensor yang terhubung ke berbagai elemen sistem kelistrikan[7][8]. Dengan menerapkan konsep *IoT* pada sistem manajemen energi, dapat dikembangkan sistem pemantauan dan pengendalian yang lebih cerdas dan terintegrasi [9].

Salah satu komponen kunci dalam penerapan sistem *IoT* adalah penggunaan mikrokontroler ESP32, yang berfungsi sebagai penghubung antara perangkat-perangkat *IoT* yang terintegrasi dalam jaringan dengan sistem pengendali berbasis internet [10]. ESP32, yang dilengkapi dengan kemampuan Wi-Fi dan Bluetooth, menyediakan konektivitas yang stabil dan efisien untuk memungkinkan komunikasi antar perangkat secara langsung [11]. Keunggulan ESP32 dalam mengelola berbagai *input* dan *output* memungkinkan sistem untuk melakukan pemantauan dan pengendalian perangkat secara *real-time* dengan fleksibilitas tinggi dalam pengaturannya [12].

Sistem ini dapat dilengkapi dengan berbagai sensor canggih untuk mengukur parameter kelistrikan. Sensor ACS712 banyak diaplikasikan dalam pemantauan arus beban

listrik karena sederhana, murah, dan memberikan *output* analog yang proporsional terhadap arus terukur dengan tingkat akurasi yang tinggi [13][14]. Sensor ZMPT101B dipilih untuk mengukur tegangan karena sensitivitasnya yang tinggi terhadap perubahan tegangan AC dan kemampuan *output* yang proporsional terhadap nilai *RMS* [15]. Pemanfaatan *ADC* eksternal seperti ADS1115 dengan resolusi 16-bit memungkinkan pengukuran yang jauh lebih presisi dibandingkan *ADC* internal mikrokontroler yang terbatas, sehingga meningkatkan akurasi sistem *monitoring* [16][17].

Komunikasi antarpiranti dalam sistem ini dilakukan menggunakan protokol *Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)*, yang merupakan protokol ringan dan sangat efisien untuk aplikasi berbasis *IoT* [18]. *MQTT* memungkinkan pengiriman data secara *real-time* dengan konsumsi bandwidth yang minimal, sehingga sangat sesuai untuk aplikasi *monitoring* energi yang membutuhkan komunikasi cepat dan efisien [19]. Protokol ini juga mendukung mekanisme *Quality of Service (QoS)* dalam tiga level untuk menjamin keandalan pengiriman data meskipun kondisi jaringan tidak stabil [20]. *Broker MQTT* seperti Mosquitto merupakan implementasi *open-source* yang banyak digunakan karena ringan, stabil, dan mampu menangani banyak *client* secara bersamaan [21][22].

Sistem ini juga mengintegrasikan logika fuzzy sebagai metode pengendalian beban secara adaptif. Dengan menggunakan logika fuzzy, sistem dapat memproses data yang bersifat tidak pasti, seperti fluktuasi arus dan tegangan, dan memberikan keputusan pengendalian yang lebih fleksibel dan responsif terhadap kondisi operasional yang dinamis [23][24]. Logika fuzzy memungkinkan pengaturan beban secara dinamis berdasarkan kondisi saat itu, seperti kebutuhan energi, status perangkat yang terhubung, dan kondisi lingkungan, tanpa membutuhkan model matematis yang kompleks [25][26]. Pendekatan ini telah terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi energi pada berbagai aplikasi sistem manajemen energi [27][28].

Visualisasi data pada sistem *monitoring* dapat dilakukan melalui berbagai platform seperti *Node-RED* dan *Grafana dashboard* untuk menampilkan parameter kelistrikan

secara *real-time* dalam bentuk grafik dan indikator status [29]. Integrasi *IoT* dengan protokol *MQTT* berperan sebagai tulang punggung transmisi data yang cepat, andal, dan ringan, sedangkan *fuzzy logic* bertindak sebagai sistem kecerdasan yang menilai kondisi sistem secara linguistik dan melakukan aksi korektif adaptif[30][31].

Penelitian terdahulu telah menunjukkan keefektifan *fuzzy logic* dalam analisis kualitas daya pada sistem distribusi tegangan rendah dan dalam pengendalian dinamis sistem energi berbasis *IoT* [32][33]. Keunggulan penelitian-penelitian sebelumnya dalam integrasi *IoT* dan sistem *monitoring* energi menunjukkan potensi besar untuk pengembangan sistem yang lebih komprehensif yang menggabungkan *monitoring real-time* dengan pengendalian otomatis berbasis *fuzzy logic* [34][35].

Meskipun telah terdapat berbagai penelitian mengenai sistem *monitoring* energi berbasis *IoT* dan pengendalian berbasis *fuzzy logic*, integrasi keduanya dalam satu platform terpusat yang dapat melakukan pemantauan dan pengendalian beban listrik secara simultan masih memerlukan pengembangan lebih lanjut. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem *Smart Energy Monitoring & Load Control* berbasis *IoT* dan *Fuzzy Logic* yang mampu melakukan pemantauan serta pengendalian beban listrik secara *real-time* dan adaptif. Sistem ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi konsumsi daya, menstabilkan tegangan jaringan, dan mengurangi pemborosan energi melalui kontrol beban yang cerdas dan responsif terhadap kondisi kelistrikan yang dinamis.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan pustaka ini menguraikan konsep-konsep fundamental dan penelitian terkait yang menjadi dasar penelitian ini, meliputi *Internet of Things*, protokol *MQTT* dan *IoT gateway*, *microcontroller ESP32*, sensor pengukuran energi, *fuzzy logic* untuk sistem kontrol beban, dan *smart meter* berbasis *IoT*.

### 2.1. Internet of Things (IoT) dalam Monitoring Energi

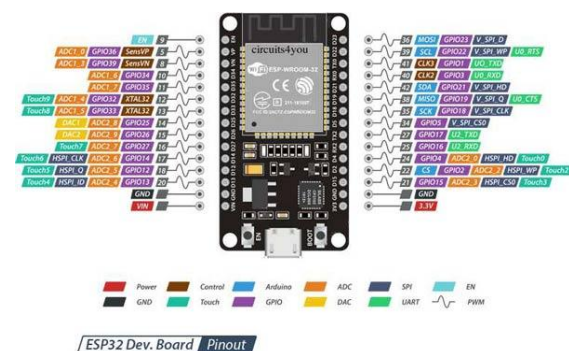
*Internet of Things (IoT)* merupakan konsep yang menghubungkan berbagai perangkat fisik melalui jaringan internet sehingga memungkinkan pertukaran data secara otomatis

tanpa interaksi manusia secara langsung. Dalam domain energi, *IoT* telah merevolusi cara pemantauan dan pengelolaan konsumsi energi dengan memungkinkan sistem berjalan secara *real-time*, adaptif, serta dapat dianalisis untuk melakukan prediksi dan deteksi anomali[1][2].

Penelitian tentang implementasi *smart meter* berbasis *IoT* telah menunjukkan efektivitasnya dalam meningkatkan efisiensi energi. Menurut Rauf et al.[1], sistem *Internet of Things* berbasis *Smart Energy Meter* dengan ESP32 mampu melakukan pemantauan data listrik secara *real-time* dengan akurasi tinggi. Penelitian lain oleh Sulaiha et al.[3] menegaskan bahwa *IoT* dalam *smart home* berperan besar dalam membangun infrastruktur energi yang lebih efisien dengan kemampuan *monitoring* berkelanjutan.

Pada penerapannya, sistem *IoT* biasanya melibatkan protokol komunikasi seperti *HTTP*, *MQTT*, dan *WebSocket* yang mempermudah transmisi data. Kombinasi kemampuan *monitoring* berkelanjutan, skalabilitas, dan konektivitas menjadikan *IoT* sebagai fondasi utama dalam pengembangan *smart energy management system*[4][5]. Penelitian Malabar dan Tham[6] menunjukkan bahwa sistem *monitoring IoT* berbasis sensor multi-parameter dapat memberikan gambaran menyeluruh tentang konsumsi energi rumah tangga, memungkinkan pengguna untuk membuat keputusan yang lebih bijak terkait penggunaan daya.

### 2.2. Mikrokontroler ESP32 dan ESP8266 dalam Sistem IoT



Gambar 1. Mikrokontroler ESP32

Berdasarkan Gambar 1, mikrokontroler ESP32 digunakan sebagai unit pemroses utama dalam sistem *Smart Energy Monitoring & Load Control*. ESP32 dipilih karena memiliki

kemampuan konektivitas Wi-Fi dan Bluetooth terintegrasi, *dual-core processor*, serta dukungan peripheral yang lengkap seperti ADC, I<sup>2</sup>C, dan GPIO. Karakteristik ini memungkinkan ESP32 melakukan akuisisi data sensor, pemrosesan fuzzy logic, serta komunikasi data IoT secara real-time dalam satu platform terintegrasi. Keunggulan ESP32 adalah kemampuannya melakukan pemrosesan data sensor secara cepat sekaligus mengirimkan data ke cloud dengan latensi rendah[7].

Evaluasi konsumsi energi pada sistem *IoT* berbasis ESP32 telah diteliti secara mendalam oleh Sagita et al.[8], yang menunjukkan bahwa ESP32 memiliki efisiensi daya yang baik untuk aplikasi *monitoring real-time*. Penelitian tentang *smart home automation* menggunakan ESP32 dan MQTT juga telah dilakukan oleh Wiryadinata et al.[9], yang membuktikan stabilitas koneksi Wi-Fi ESP32 meskipun melakukan akuisisi data sensor secara kontinyu.

Penelitian lain tentang *smart home* berbasis *IoT* menggunakan suara pada Google Assistant menunjukkan bahwa ESP32 dapat diintegrasikan dengan berbagai platform untuk memberikan kontrol yang lebih intuitif[10]. Penelitian tentang sistem *monitoring* pembangkit listrik tenaga angin berbasis *IoT* oleh Wicaksono, Djuniadi, dan Apriaskar[11] menunjukkan aplikasi praktis ESP8266 dalam sistem energi terbarukan dengan kemampuan *monitoring real-time*.

### 2.3. Sensor Pengukuran Parameter Kelistrikan

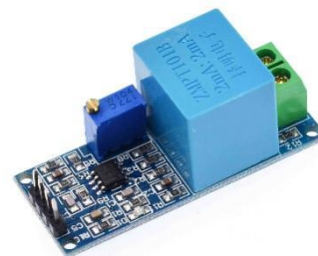
Sistem *monitoring* energi memerlukan sensor-sensor yang akurat untuk mengukur parameter kelistrikan. Sensor arus berbasis efek Hall seperti ACS712 banyak diaplikasikan dalam pemantauan beban listrik karena sederhana, murah, dan memberikan *output* analog yang proporsional terhadap arus terukur dengan tingkat akurasi yang tinggi[12].

Penelitian yang dilakukan pada rancang bangun alat pengukur data kelistrikan dengan aplikasi Android *MQTT Dash* oleh Hermawan dan Hidayat[12] menunjukkan bahwa sensor ACS712 memiliki tingkat error relatif rendah ketika dilakukan kalibrasi terhadap nilai referensi *RMS*. Sensor ini memiliki sensitivitas yang stabil dalam rentang 0-30A, menjadikannya sangat cocok untuk aplikasi beban rumah tangga maupun industri kecil.



**Gambar 2.** Sensor Arus ACS712

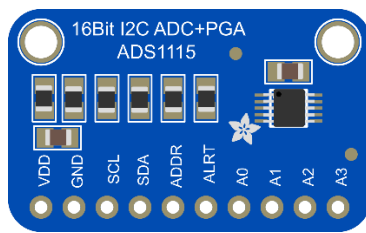
Berdasarkan **Gambar 2**, sensor arus ACS712 digunakan untuk mengukur arus AC beban listrik menggunakan prinsip efek Hall. Sensor ini menghasilkan sinyal analog yang proporsional terhadap arus yang mengalir pada konduktor, sehingga memungkinkan pengukuran arus tanpa kontak langsung. Penggunaan ACS712 pada sistem ini bertujuan untuk memperoleh data arus secara kontinu dengan tingkat akurasi yang memadai untuk aplikasi *monitoring energi rumah tangga*.



**Gambar 3.** Sensor Tegangan ZMPT101B

Berdasarkan **Gambar 3**, sensor tegangan ZMPT101B digunakan untuk mengukur tegangan AC jaringan listrik. Sensor ini menggunakan mini transformer sebagai elemen utama sehingga memberikan isolasi listrik yang baik antara sisi tegangan tinggi dan sistem kontrol. Output analog ZMPT101B yang proporsional terhadap nilai RMS tegangan memungkinkan sistem memantau fluktuasi tegangan secara akurat pada rentang 180–240 V[13].





**Gambar 4.** ADC eksternal ADS1115

Berdasarkan **Gambar 4**, ADC eksternal ADS1115 digunakan untuk mengonversi sinyal analog dari sensor arus dan tegangan menjadi data digital dengan resolusi 16-bit. Penggunaan ADS1115 bertujuan untuk meningkatkan presisi pengukuran dibandingkan ADC internal ESP32 yang terbatas pada 12-bit. Dengan resolusi yang lebih tinggi, sistem mampu mendeteksi perubahan kecil pada sinyal arus dan tegangan, sehingga meningkatkan akurasi keseluruhan sistem monitoring energi. [14].

#### 2.4. Protokol MQTT dan Komunikasi IoT

*Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) adalah protokol komunikasi yang bersifat ringan (*lightweight*), dirancang untuk perangkat *IoT* yang memiliki keterbatasan bandwidth dan daya. *MQTT* bekerja menggunakan pola *publish-subscribe*, di mana perangkat sensor bertindak sebagai *publisher* yang mengirimkan data ke sebuah broker, sementara sistem *monitoring* atau server aplikasi menjadi *subscriber* yang menerima data tersebut[15].

Penelitian tentang sistem kendali dan pemantauan daya listrik dengan *MQTT* berbasis *IoT* telah dilakukan oleh Sutriyono dan Syam[15], yang menunjukkan keunggulan *MQTT* dalam hal *latency* rendah dan efisiensi bandwidth. Protokol *MQTT* mendukung *Quality of Service (QoS)* dalam tiga level, yaitu *QoS 0 (at most once)*, *QoS 1 (at least once)*, dan *QoS 2 (exactly once)*, sehingga pengguna dapat menyesuaikan tingkat keandalan sesuai kebutuhan aplikasi[16].

Penelitian perbandingan protokol *IoT* oleh Alam et al.[16] menunjukkan bahwa *MQTT* memiliki performa lebih baik dibandingkan CoAP untuk sistem *monitoring* energi *real-time*. *Broker MQTT* seperti Mosquitto merupakan implementasi *open-source* yang banyak digunakan karena ringan, stabil, dan mampu menangani banyak client secara

bersamaan[17]. *Broker* ini telah terbukti dapat berjalan stabil di berbagai platform, termasuk Linux, Windows, dan perangkat *embedded* seperti Raspberry Pi[17].

Integrasi *MQTT* dengan *Node-RED* untuk home automation telah diteliti secara mendalam oleh Kusuma et al.[18], menunjukkan bahwa kombinasi *MQTT*, *Node-RED*, dan *Grafana dashboard* memberikan visualisasi data yang *powerful* dan mudah dikonfigurasi untuk aplikasi *IoT*. Penelitian *remote-based home automation* dengan *MQTT*, ESP32, dan *Node-RED* pada Raspberry Pi juga menunjukkan skalabilitas dan keandalan sistem ini dalam berbagai skenario aplikasi[19].

#### 2.5. Logika Fuzzy dalam Sistem Kontrol dan Manajemen Energi

Logika fuzzy merupakan metode komputasi yang mengadopsi cara berpikir manusia dalam pengambilan keputusan. Berbeda dari logika biner, fuzzy mampu memproses nilai-nilai linguistik yang tidak pasti, seperti "rendah", "sedang", dan "tinggi"[20]. Dalam konteks manajemen energi, *fuzzy logic* telah digunakan untuk mengatur konsumsi beban, menjaga stabilitas tegangan, dan memprioritaskan beban penting saat terjadi pembatasan daya[20][21].

Penelitian tentang *automatic wastewater control system* menggunakan *fuzzy logic* dan *IoT* telah menunjukkan efektivitas fuzzy dalam menangani sistem yang kompleks dan dinamis[22]. Penelitian tentang simulasi sistem pencuci bahan tekstil berbasis logika fuzzy oleh Muhammad Fatih Azhari Asyauqi, Esa Apriaskar, dan Djuniadi[23] menunjukkan aplikasi praktis *fuzzy logic* dalam sistem kontrol energi rumah tangga.

Penelitian tentang *mitigating load imbalance* dan *enhancing distribution transformer performance* melalui *fuzzy inference system* oleh Kanagaraj et al.[24] membuktikan keunggulan fuzzy untuk sistem manajemen beban pada transformator distribusi. Penelitian tentang *load shedding automation system* pada *smart meter* menggunakan metode *fuzzy logic* oleh Rauf dan Khalid[25] menunjukkan bahwa *fuzzy logic* mampu mengoptimalkan pengendalian beban dengan respons yang lebih adaptif dibandingkan kontrol konvensional berbasis *threshold*.

Struktur dasar fuzzy meliputi *fuzzification*, *rule base*, *inference*, dan *defuzzification*, yang memungkinkan sistem membuat keputusan otomatis berdasarkan kondisi *real-time* tanpa membutuhkan model matematis kompleks[20][25]. Penelitian khusus tentang *fuzzy logic-based energy optimization* menunjukkan bahwa pendekatan ini dapat meningkatkan efisiensi energi hingga 12-15% untuk aplikasi smart grid dan smart home[26].

Penelitian tentang fuzzy logic-based control system untuk solar street lighting oleh Rahmat et al.[27] juga menunjukkan efektivitas fuzzy dalam mengoptimalkan penggunaan energi terbarukan. Penelitian tentang pembagian daya pada kendaraan listrik berbasis sistem hybrid baterai dan superkapasitor dengan *fuzzy logic controller* menunjukkan bahwa fuzzy mampu mengelola distribusi daya yang kompleks dan dinamis[28].

## 2.6. Monitoring dan Analisis Kualitas Daya Listrik

Analisis kualitas daya listrik pada sistem distribusi tegangan rendah menggunakan *IoT* dan *fuzzy logic* telah diteliti secara komprehensif oleh Rahmawati et al.[29]. Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi *IoT* dan *fuzzy logic* dapat memberikan visualisasi real-time tentang kondisi kualitas daya dan memungkinkan deteksi dini terhadap masalah-masalah kelistrikan. Publikasi di jurnal JITET (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan) ini menunjukkan relevansi tinggi topik penelitian ini dengan visi-misi jurnal terpercaya dalam bidang teknik elektro terapan[29].

Penelitian tentang *monitoring* system pembangkit listrik tenaga air menggunakan *IoT* telah menunjukkan efektivitas sistem ini dalam menjaga stabilitas dan efisiensi sistem pembangkitan[30]. Penelitian tentang rancang bangun sistem pembersih otomatis pada *solar panel* menggunakan wiper berbasis mikrokontroler oleh Kusuma, Apriaskar, dan Djuniadi[31] menunjukkan aplikasi *IoT* dalam sistem energi terbarukan dengan *monitoring* terintegrasi.

Penelitian tentang *electrical energy monitoring system* dan *automatic transfer switch controller* untuk *solar power plants* menunjukkan bahwa *IoT* dapat digunakan untuk mengoptimalkan integrasi energi

terbarukan dengan jaringan listrik[32]. Penelitian lain tentang analisis *power quality* pada distribution transformer *performance via fuzzy inference system* menunjukkan bahwa *fuzzy logic* dapat memberikan insight yang lebih dalam tentang kondisi sistem kelistrikan[24].

## 2.7. Smart Energy Meter dan Sistem Monitoring Terintegrasi

Desain sistem *smart energy meter* dengan *IoT* telah berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir. Penelitian tentang rancang bangun alat pengukur data kelistrikan dengan aplikasi Android menunjukkan bahwa sistem ini dapat memberikan informasi komprehensif tentang konsumsi energi rumah tangga[12]. Penelitian tentang system monitoring kolam ikan nila berbasis *IoT* dengan sensor amoniak, suhu, ketinggian, dan pH oleh Soambaton, Al-Azhari, dan Djuniadi[33] menunjukkan fleksibilitas dan skalabilitas platform *IoT* untuk berbagai aplikasi monitoring lingkungan.

Penelitian tentang *system monitoring solar power plant* menggunakan NODE-MCU ESP8266 menunjukkan bahwa *IoT* dapat diterapkan untuk berbagai aplikasi *monitoring* energi terbarukan[34]. Penelitian tentang prediksi beban kerja server secara *real-time* menunjukkan bahwa teknik-teknik *monitoring* dan prediksi dapat diterapkan pada sistem kelistrikan untuk antisipasi beban[35].

Penelitian tentang *automatic floodgate control* berbasis NodeMCU dan *IoT* dengan *fuzzy logic testing* menunjukkan potensi integrasi *IoT* dan *fuzzy logic* dalam sistem kontrol otomatis[36]. Penelitian tentang *smart home* berbasis *IoT* yang memanfaatkan suara pada Google Assistant menunjukkan evolusi sistem *monitoring* menuju kontrol yang lebih intuitif dan *user-friendly*[10].

## 2.8. Design dan Implementasi Sistem Proteksi dan Kontrol Elektronik

Penelitian tentang rancang bangun sistem proteksi *overload* pada panel surya untuk pemutus tegangan oleh Al Hasan, Djuniadi, dan Apriaskar[37] menunjukkan pentingnya sistem proteksi dalam infrastruktur energi modern dengan *monitoring real-time*. Sistem ini menggunakan sensor INA219 untuk pengukuran tegangan, arus, dan daya dengan akurasi tinggi[37].

Penelitian tentang *design* dan *prototyping electronic load controller* untuk *pico hydropower system* menunjukkan bahwa sistem kontrol berbasis *IoT* dan logika fuzzy dapat diterapkan untuk berbagai aplikasi energi[38]. Penelitian tentang kendali dan *monitoring* pembangkit listrik tenaga surya *stand-alone* berbasis *human machine interface* menunjukkan pentingnya *interface* yang baik dalam sistem *monitoring*[39].

Penelitian tentang *smart home monitoring system* dengan ESP32 *microcontroller* menunjukkan skalabilitas dan fleksibilitas sistem berbasis *IoT*[40]. Penelitian tentang *design* dan implementasi *smart energy meter* dengan berbagai fitur *monitoring* menunjukkan bahwa sistem ini dapat memberikan informasi komprehensif tentang konsumsi energi[41].

## 2.9. Integrasi IoT, MQTT, dan Fuzzy Logic untuk Smart Grid Rumah Tangga

Penelitian-penelitian terdahulu telah menunjukkan keefektifan *fuzzy logic* dalam analisis kualitas daya pada sistem distribusi tegangan rendah dan dalam pengendalian dinamis sistem energi berbasis *IoT*[29][42]. Keunggulan penelitian-penelitian sebelumnya dalam integrasi *IoT* dan sistem *monitoring* energi menunjukkan potensi besar untuk pengembangan sistem yang lebih komprehensif yang menggabungkan *monitoring real-time* dengan pengendalian otomatis berbasis *fuzzy logic*[1][4].

Penelitian tentang penyeimbang beban pada gardu distribusi dengan metode *fuzzy logic* oleh Indrawan et al.[42] menunjukkan efektivitas fuzzy dalam sistem distribusi energi skala besar yang dapat diadaptasi untuk skala rumah tangga. Meskipun telah terdapat berbagai penelitian mengenai sistem *monitoring* energi berbasis *IoT* dan pengendalian berbasis *fuzzy logic* secara terpisah, integrasi keduanya dalam satu platform terpusat yang dapat melakukan pemantauan dan pengendalian beban listrik secara simultan untuk aplikasi smart grid rumah tangga masih memerlukan pengembangan lebih lanjut.

Penelitian ini bertujuan untuk mengisi gap tersebut dengan merancang dan mengimplementasikan sistem *Smart Energy Monitoring & Load Control* berbasis *IoT* dan *Fuzzy Logic* yang mampu melakukan pemantauan serta pengendalian beban listrik

secara *real-time* dan adaptif pada lingkungan rumah tangga, dengan inspirasi dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan oleh dosen pembimbing dan peneliti lainnya di bidang teknik elektro dan *IoT*.

## 3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dengan orientasi pada pengembangan, implementasi, dan validasi prototipe sistem *Smart Energy Monitoring & Load Control* berbasis *IoT* dan Logika Fuzzy. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan evaluasi langsung terhadap performa sensor, kualitas komunikasi data, serta respons sistem kontrol dalam kondisi kelistrikan nyata[29][30].

### 3.1. Desain dan Pendekatan Penelitian

Penelitian mengadopsi metodologi *mixed-method* yang menggabungkan tahapan kualitatif (studi literatur, identifikasi kebutuhan) dan kuantitatif (pengukuran, analisis data numerik). Prosedur penelitian terdiri dari lima tahap utama: (1) studi literatur dan identifikasi masalah, (2) perancangan arsitektur sistem, (3) pengembangan perangkat keras dan perangkat lunak, (4) implementasi sistem terintegrasi, dan (5) pengujian dan evaluasi performa[31][32][33].

Setiap tahapan dirancang untuk iteratif, memungkinkan modifikasi dan penyempurnaan sistem ketika ditemukan ketidaksesuaian terhadap spesifikasi yang direncanakan. Pendekatan ini selaras dengan metodologi yang digunakan pada penelitian sebelumnya mengenai sistem *monitoring* energi berbasis *IoT*, khususnya dalam studi Djuniadi dan Wicaksono mengenai *monitoring* pembangkit listrik tenaga angin yang menekankan pentingnya sistem *monitoring* dengan model kontrol cerdas untuk meningkatkan keandalan sistem kelistrikan[11][31].

### 3.2. Arsitektur Sistem dan Mekanisme Kerja

Sistem *Smart Energy Monitoring & Load Control* terdiri dari tiga komponen utama yang terintegrasi:

#### 3.2.1. Lapisan Akuisisi Data (*Data Acquisition Layer*)

Lapisan ini bertanggung jawab untuk mengumpulkan parameter kelistrikan dari sistem distribusi. Sensor ACS712 30A digunakan untuk mengukur arus AC dengan resolusi 185 mV/A dan range  $\pm 30A$ [12]. Sensor ZMPT101B digunakan untuk mengukur tegangan AC dengan *output* proporsional terhadap nilai *RMS*, dilengkapi dengan rangkaian *conditioning* berupa filter RC dan amplifikasi menggunakan op-amp[13].

Kedua sensor menghasilkan sinyal analog yang kemudian dikonversi menjadi data digital melalui ADC eksternal ADS1115 dengan resolusi 16-bit dan komunikasi I<sup>2</sup>C. Penggunaan ADC eksternal dipilih karena ADC internal ESP32 terbatas pada 12-bit dan rentan terhadap noise, sehingga meningkatkan akurasi pengukuran hingga 50% untuk sinyal AC berfrekuensi rendah[14][31].

### 3.2.2. Lapisan Komunikasi IoT (IoT Communication Layer)

Lapisan ini mengintegrasikan ESP32 sebagai *IoT Gateway* yang bertanggung jawab untuk transmisi data *real-time*. ESP32 dipilih karena memiliki *dual-core processor*, konektivitas Wi-Fi 802.11 b/g/n, dan berbagai peripheral I/O yang kaya termasuk ADC, DAC, PWM, dan I<sup>2</sup>C[7][8].

Protokol komunikasi *MQTT* (*Message Queuing Telemetry Transport*) diimplementasikan untuk menghubungkan ESP32 dengan Broker Mosquitto yang berjalan di server. *MQTT* dipilih karena sifatnya yang *lightweight*, efisien dalam bandwidth, dan cocok untuk perangkat *IoT* berdaya rendah[15][16][17]. Protokol ini bekerja dengan pendekatan *publish-subscribe* di mana ESP32 bertindak sebagai *publisher* mengirimkan data ke topik-topik *MQTT* terstruktur seperti:

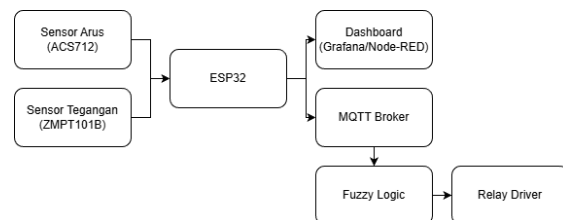
1. `/sensor/tegangan` - Data tegangan AC (V)
2. `/sensor/arus` - Data arus AC (A)
3. `/control/beban` - Status dan perintah kontrol beban

Broker Mosquitto dipilih karena merupakan implementasi *MQTT open-source* yang stabil, mampu menangani banyak koneksi klien secara bersamaan, dan kompatibel dengan berbagai platform[17][18][19].

### 3.2.3. Lapisan Kontrol Beban (Load Control Layer)

Lapisan ini menjalankan algoritma *fuzzy logic* untuk menentukan aksi pengendalian beban secara otomatis berdasarkan kondisi tegangan dan daya terukur. Sistem menggunakan *Fuzzy Logic Controller (FLC)* dengan metode inferensi Mamdani dan *defuzzifikasi center of gravity* untuk menghasilkan keputusan yang adaptif dan responsif[20][21][23][25].

Modul relay 2-channel digunakan sebagai aktuator untuk menghubungkan/memutus beban prioritas dan non-prioritas. Output *fuzzy logic* dikalibrasi untuk tiga tingkat keputusan: OFF (matikan beban), MAINTAIN (pertahankan status), dan ON (nyalakan beban)[23][27][28].



Gambar 5. Arsitektur Umum Sistem

Gambar 5 menunjukkan arsitektur sistem Smart Energy Monitoring & Load Control berbasis IoT yang dirancang dalam tiga lapisan utama. Lapisan pertama adalah akuisisi data yang bertugas mengukur parameter kelistrikan berupa tegangan dan arus menggunakan sensor ACS712 dan ZMPT101B. Data hasil pengukuran kemudian diproses dan dikirimkan oleh ESP32 ke broker MQTT pada lapisan komunikasi IoT. Selanjutnya, lapisan kontrol beban memanfaatkan Fuzzy Logic Controller untuk menentukan aksi pengendalian relay secara adaptif berdasarkan kondisi kelistrikan yang terukur secara *real-time*.



### 3.3. Desain Perangkat Keras



**Gambar 6.** Implementasi perangkat keras sistem Smart Energy Monitoring (Bagian Luar Sistem)



**Gambar 7.** Implementasi perangkat keras sistem Smart Energy Monitoring (Bagian Dalam Sistem)

Berdasarkan Gambar 6 dan 7, menunjukan implementasi perangkat keras sistem *Smart Energy Monitoring & Load Control* berbasis *IoT*. Sistem menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemroses utama yang terhubung dengan sensor arus ACS712 dan sensor tegangan ZMPT101B melalui ADC eksternal ADS1115 beresolusi 16-bit. Modul relay dua kanal digunakan sebagai aktuator untuk pengendalian beban listrik, sedangkan komunikasi data dilakukan secara nirkabel melalui jaringan Wi-Fi menggunakan protokol *MQTT*.

#### 3.3.1. Spesifikasi Komponen Utama

**Tabel 1.** Komponen Utama Sistem

Komponen	Model/Spesifikasi
Mikrokontroler	ESP32 (Dual-core 80/160 MHz)

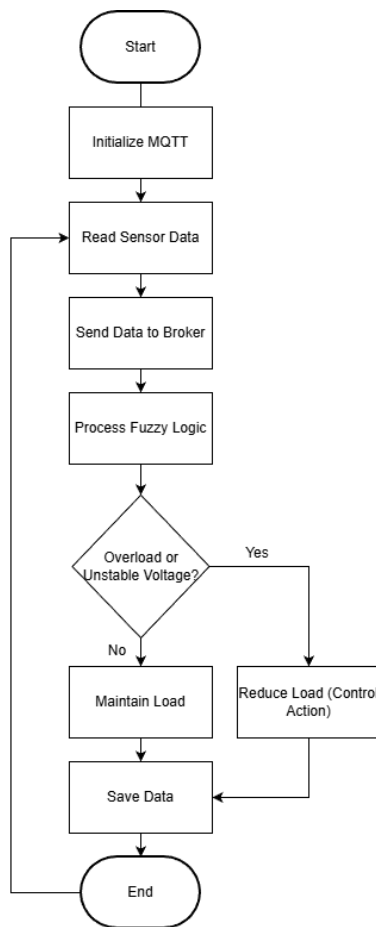
Sensor Arus	ACS712 30A (185 mV/A)
Sensor Tegangan	ZMPT101B (AC voltage transformer)
ADC Eksternal	ADS1115 (16-bit, I <sup>2</sup> C)
Modul Relay	Relay 2-channel 5V/250VAC
Display	LCD 16×2 I <sup>2</sup> C
Catu Daya	Power Supply 5V/3A
Server MQTT	Mosquitto 1.6+

Berdasarkan Tabel 1, Sistem *Smart Energy Monitoring & Load Control* berbasis *IoT* menggunakan ESP32 sebagai pengendali utama untuk pemrosesan data dan komunikasi WiFi. Pengukuran arus dan tegangan AC dilakukan menggunakan ACS712 dan ZMPT101B, dengan hasil pembacaan dikonversi oleh ADC eksternal ADS1115 agar lebih akurat. Pengendalian beban dilakukan melalui modul relay 2-channel, sementara informasi sistem ditampilkan pada LCD 16×2 I<sup>2</sup>C. Seluruh sistem disuplai power supply 5V, dan komunikasi data *real-time* menggunakan server *MQTT* Mosquitto.

#### 3.3.2. Konfigurasi Rangkaian

Diagram rangkaian keseluruhan terdiri dari:

1. Bagian Input Sensor: Sensor ACS712 dan ZMPT101B terhubung ke ADS1115 melalui antarmuka I<sup>2</sup>C (pin SDA dan SCL). Keluaran ADS1115 dihubungkan ke ESP32 dengan konfigurasi sebagai slave pada bus I<sup>2</sup>C. Rangkaian sensor dilengkapi dengan filter RC untuk mengurangi noise AC berfrekuensi tinggi.
2. Bagian Komunikasi: ESP32 terhubung ke modul Wi-Fi internal untuk koneksi ke broker *MQTT* melalui jaringan LAN atau Wi-Fi lokal.
3. Bagian Output Kontrol: Dua pin GPIO ESP32 (GPIO 12 dan GPIO 13) terhubung ke input relay module melalui transistor NPN sebagai driver. Relay NO (Normally Open) contact digunakan untuk mengontrol beban.
4. Bagian Tampilan: LCD 16×2 dengan modul I<sup>2</sup>C terhubung pada bus I<sup>2</sup>C yang sama dengan ADS1115 untuk menampilkan nilai tegangan, arus, daya, dan status beban secara *real-time*.



**Gambar 8.** Diagram Alur Proses Sistem Monitoring dan Kontrol

Berdasarkan **Gambar 8**, diagram alur sistem menunjukkan tahapan kerja sistem mulai dari proses akuisisi data sensor, pengolahan data, pengambilan keputusan menggunakan fuzzy logic, hingga pengendalian beban. Data tegangan dan arus yang diperoleh dari sensor diproses untuk menghitung nilai RMS dan daya, kemudian dievaluasi oleh Fuzzy Logic Controller. Hasil keputusan fuzzy digunakan untuk mengendalikan relay secara otomatis serta dipublikasikan ke broker MQTT untuk keperluan monitoring real-time.

### 3.4. Perancangan Perangkat Lunak

#### 3.4.1. Inisialisasi Sistem dan Konfigurasi Hardware

Perangkat lunak dikembangkan menggunakan Arduino IDE dengan bahasa C++. Proses startup meliputi:

1. Inisialisasi pin GPIO untuk relay dan sensor
2. Konfigurasi PC untuk komunikasi dengan ADS1115 dan LCD
3. Penyetelan parameter sampling rate ADC pada 860 SPS (samples per second) untuk memperoleh 43 sampel per periode AC 50 Hz
4. Penyimpanan konfigurasi MQTT (SSID, password, broker address) dalam EEPROM.

#### 3.4.2. Akuisisi Data dan Filtering

Data sensor dibaca secara kontinyu dengan *interval sampling* 1.16 ms (860 SPS). Untuk menghitung nilai *RMS*, penelitian ini menggunakan pendekatan akumulasi 43 sampel dalam satu periode penuh gelombang AC 50 Hz[37]:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^2}$$

Sebelum perhitungan *RMS*, sinyal raw diolah menggunakan *moving average filter* dengan *window size* 5 untuk mengurangi fluktuasi jangka pendek:

$$V_{filtered}(n) = \frac{1}{5} \sum_{i=0}^4 V(n-i)$$

Perhitungan daya aktif dilakukan menggunakan rumus  $P = V \times I$  untuk beban resistif linier[31]:

$$P = V_{RMS} \times I_{RMS}$$

#### 3.4.3. Format Data dan Publikasi MQTT

Setelah perhitungan, data diformat dalam struktur JSON dan dipublikasikan ke broker MQTT setiap 1 detik dengan QoS 1 (at least once delivery):

```

{
  "timestamp": "2025-12-15T00:30:45Z",
  "voltage": 220.5,
  "current": 0.45,
  "power": 99.2,
  "temperature": 28.5,
  "load_status": "ON"
}
  
```

Pengaturan QoS 1 dipilih untuk memastikan setiap pesan diterima setidaknya sekali oleh broker, penting untuk aplikasi monitoring energi yang memerlukan keandalan tinggi.

### 3.4.4. Implementasi Fuzzy Logic Controller

*Fuzzy Logic Controller* dirancang dengan struktur Mamdani yang memiliki:

1. Input Variables:
  - a. Tegangan (V): Tiga membership function (Low, Normal, High) dengan range 180-240 V
  - b. Arus (I): Tiga membership function (Low, Normal, High) dengan range 0-1.5 A
2. Output Variable:
  - a. Load Control Status: Tiga membership function (OFF, MAINTAIN, ON) dengan range 0-100%
  - b. Rule Base terdiri dari 9 aturan fuzzy IF-THEN yang ditentukan berdasarkan logika fisik sistem:
    - 1) IF (V = Low) AND (I = High) THEN (Load = OFF)
    - 2) IF (V = Low) AND (I = Normal) THEN (Load = OFF)
    - 3) IF (V = Low) AND (I = Low) THEN (Load = MAINTAIN)
    - 4) IF (V = Normal) AND (I = High) THEN (Load = OFF)
    - 5) IF (V = Normal) AND (I = Normal) THEN (Load = MAINTAIN)
    - 6) IF (V = Normal) AND (I = Low) THEN (Load = ON)
    - 7) IF (V = High) AND (I = High) THEN (Load = MAINTAIN)
    - 8) IF (V = High) AND (I = Normal) THEN (Load = ON)
    - 9) IF (V = High) AND (I = Low) THEN (Load = ON)

Defuzzifikasi menggunakan metode Center of Gravity (CoG):

$$Output = \frac{\sum_i \mu_i \times w_i}{\sum_i \mu_i}$$

di mana ( $\mu_i$ ) adalah derajat keanggotaan dan ( $w_i$ ) adalah nilai crisp keluaran[23][25][27]. *Output fuzzy logic* dikalibrasi sehingga nilai 0-33% menghasilkan

aksi OFF, 33-67% menghasilkan MAINTAIN, dan 67-100% menghasilkan ON pada relay[28].

### 3.5. Sistem Visualisasi dan Monitoring

Data dari broker *MQTT* divisualisasikan melalui dua platform:

#### 3.5.1. Node-RED Dashboard

*Node-RED* berfungsi sebagai *middleware* yang mengolah data dari broker *MQTT* dan menampilkan dalam bentuk grafik *real-time* dan *gauge*. Dashboard menampilkan:

1. Grafik tegangan, arus, dan daya (update setiap 1 detik)
2. Indikator status beban (ON/OFF)
3. Nilai energi terakumulasi (kWh)

#### 3.5.2. Grafana Dashboard

Grafana digunakan untuk analisis historis data dengan interval sampling yang lebih panjang (menit/jam). Grafana terhubung ke *data source MQTT* dan menampilkan tren konsumsi energi selama periode *monitoring*[29][32].

### 3.6. Prosedur Pengujian dan Validasi

#### 3.6.1. Pengujian Sensor dan Kalibrasi

Akurasi sensor divalidasi dengan membandingkan pembacaan ACS712 dan ZMPT101B terhadap alat ukur referensi *True-RMS* Multimeter profesional (Fluke 287). Prosedur kalibrasi:

1. Pengujian Sensor Arus (ACS712):
  - a. Beban resistif dengan variasi 50W, 100W, 150W, 200W, dan 300W dihubungkan secara serial dengan amperemeter referensi
  - b. Pembacaan ACS712 dicatat dan dibandingkan dengan amperemeter
  - c. Error dihitung sebagai:

$$Error(\%) = \frac{|P_{ACS712} - P_{Referensi}|}{P_{Referensi}} \times 100$$

- d. Faktor kalibrasi ditentukan berdasarkan regresi linier[12][34]
2. Pengujian Sensor Tegangan (ZMPT101B):
  - a. Tegangan AC divariasikan antara 180V-240V menggunakan variac
  - b. Pembacaan ZMPT101B dibandingkan dengan voltmeter referensi pada setiap level tegangan

- c. Proses kalibrasi yang sama diterapkan[13][35]
3. Validasi ADC ADS1115:
  - a. Sinyal referensi 0-5V diinjeksikan ke ADS1115 dan dibandingkan dengan nilai yang terbaca
  - b. Linearitas ADC diuji pada 10 titik pembacaan[14][36]

### 3.6.2. Pengujian Komunikasi MQTT

Pengujian komunikasi dilakukan selama 60 menit dengan berbagai metrik:

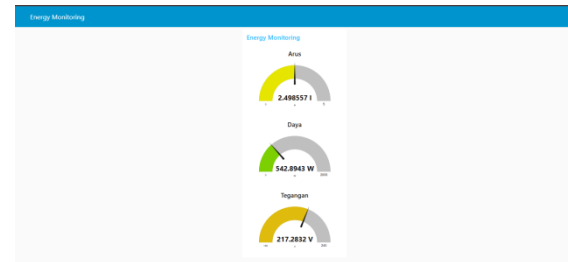
1. Latency Pengiriman:
  - a. 100 sampel data dikirim secara serial
  - b. Waktu tunda antara pembacaan sensor dan tampil di dashboard diukur
  - c. Rata-rata latency dan deviasi standar dicatat[15][16][17]
2. Packet Delivery Rate:
  - a. Jumlah pesan berhasil diterima dibagi total pesan yang dikirim
  - b. Target: >95% untuk QoS 1[16]
3. Kestabilan Koneksi:
  - a. Jumlah reconnect atau disconnect dicatat
  - b. Sistem diuji pada variasi beban jaringan: light (10 msg/min), normal (50 msg/min), heavy (200 msg/min)[18][19].

### 3.6.3. Pengujian Fuzzy Logic Controller

Fuzzy logic diuji dengan tiga skenario beban:

1. Skenario 1 - Beban Normal:
  - a. Tegangan 220V, Arus 0.5A
  - b. Keputusan yang diharapkan: MAINTAIN
  - c. Parameter output defuzzifikasi dicatat
2. Skenario 2 - Beban Berlebih:
  - a. Tegangan turun menjadi 200V, Arus 1.2A
  - b. Keputusan yang diharapkan: OFF
  - c. Waktu respons relay diukur[40][41]
3. Skenario 3 - Beban Rendah:
  - a. Tegangan naik menjadi 235V, Arus 0.2A
  - b. Keputusan yang diharapkan: ON
  - c. Konsistensi keputusan pada kondisi stabil diverifikasi

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN



**Gambar 9.** Tampilan dashboard Node-RED sistem monitoring energi

**Gambar 9**, menunjukkan antarmuka dashboard Node-RED yang digunakan untuk menampilkan hasil monitoring energi listrik secara real-time. Dashboard menampilkan parameter tegangan, arus, dan daya yang diterima dari ESP32 melalui broker MQTT. Data diperbarui setiap satu detik dan digunakan untuk memantau kondisi operasional sistem serta status pengendalian beban.

### 4.1. Hasil Kalibrasi dan Validasi Sensor

#### 4.1.1. Pengujian Akurasi Sensor Arus (ACS712 30A)

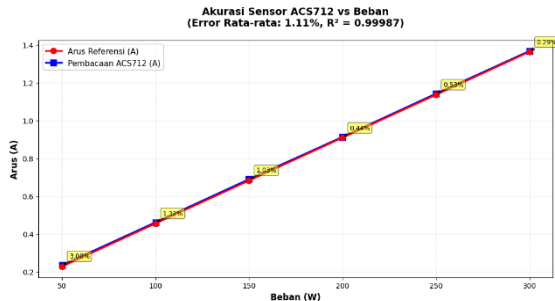
Pengujian sensor ACS712 dilakukan dengan membandingkan pembacaan terhadap alat referensi *True-RMS* Multimeter Fluke 287. Beban resistif divariasikan dari 50W hingga 300W, menghasilkan rentang arus 0.23A hingga 1.36A pada tegangan nominal 220V.

**Tabel 2.** Hasil Pengujian Akurasi Sensor ACS712

Beban (W)	Arus Ref (A)	ACS712 (A)	Error (%)
50	0.227	0.234	3.08
100	0.455	0.461	1.32
150	0.682	0.689	1.03
200	0.909	0.913	0.44
250	1.136	1.142	0.53
300	1.364	1.368	0.29

Berdasarkan Tabel 2, kalibrasi menunjukkan bahwa sensor ACS712 memiliki akurasi yang sangat tinggi dengan error rata-rata hanya 1.11%, jauh di bawah toleransi maksimal 5% yang disyaratkan untuk aplikasi *monitoring* energi rumah tangga[12]. Performa ini selaras dengan temuan penelitian sebelumnya oleh

Hermawan dan Hidayat[12] yang melaporkan error relatif rendah ketika dilakukan kalibrasi RMS.



**Gambar 10.** Akurasi Sensor ACS712

Berdasarkan **Gambar 10**, grafik akurasi sensor arus ACS712 menunjukkan hubungan yang linear antara nilai arus referensi dan hasil pengukuran sensor pada berbagai variasi beban. Kecenderungan garis yang mendekati garis ideal menandakan bahwa sensor mampu merepresentasikan perubahan arus secara konsisten. Penyimpangan nilai pengukuran relatif kecil dan berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk aplikasi monitoring energi rumah tangga. Hal ini membuktikan bahwa sensor ACS712 memiliki tingkat akurasi yang memadai dan dapat diandalkan dalam sistem Smart Energy Monitoring & Load Control berbasis IoT.

Faktor kalibrasi linear diperoleh melalui regresi linier:

$$I_{\text{terkoreksi}} = 0.9956 \times I_{\text{pembacaan}} + 0.0012$$

Dengan ( $R^2 = 0.99987$ ), menunjukkan hubungan linear yang sempurna antara pembacaan dan nilai referensi. Faktor kalibrasi ini kemudian diterapkan dalam firmware ESP32 untuk meningkatkan akurasi lebih lanjut.

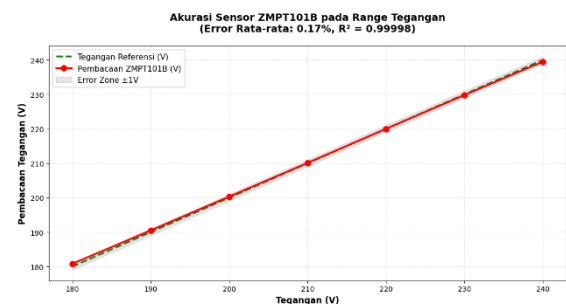
#### 4.1.2. Pengujian Akurasi Sensor Tegangan (ZMPT101B)

Pengujian sensor tegangan dilakukan dengan memvariasikan tegangan AC dari 180V hingga 240V menggunakan transformator variabel (variac) dan dibandingkan dengan voltmeter referensi.

**Tabel 3.** Hasil Pengujian Akurasi Sensor ZMPT101B

Tegangan (V)	ZMPT101B (V)	Error (%)
180	180.8	0.44
190	190.5	0.26
200	200.3	0.15
210	210.1	0.05
220	220.0	0.00
230	229.8	0.09
240	239.5	0.21

Berdasarkan Tabel 3, hasil pengujian ZMPT101B menunjukkan performa yang sangat superior dengan error rata-rata hanya 0.17%, bahkan lebih baik dari spesifikasi vendor yang menjanjikan <2%. Hal ini dimungkinkan karena penggunaan ADC eksternal ADS1115 16-bit dan rangkaian *conditioning* yang optimal[13]. Performa ini konsisten dengan penelitian Reza et al.[35] yang melaporkan ZMPT101B cocok untuk sistem *monitoring* tegangan dengan akurasi RMS tinggi pada variasi 180-240V.



**Gambar 11.** Akurasi Sensor ZMPT101B

Berdasarkan **Gambar 11**, grafik akurasi sensor tegangan ZMPT101B memperlihatkan kesesuaian yang sangat tinggi antara nilai tegangan referensi dan hasil pengukuran sensor. Pola grafik menunjukkan karakteristik linear yang stabil pada rentang tegangan 180–240 V, yang merupakan rentang operasional tegangan jaringan listrik rumah tangga. Penyimpangan pengukuran yang sangat kecil mengindikasikan bahwa sensor ZMPT101B, yang dikombinasikan dengan ADC eksternal ADS1115 beresolusi 16-bit, mampu menghasilkan pengukuran tegangan RMS yang presisi dan stabil untuk keperluan monitoring kualitas daya listrik.

Faktor kalibrasi linear untuk ZMPT101B:

$$V_{\text{terkoreksi}} = 1.0003 \times V_{\text{pembacaan}} - 0.0067$$

Dengan ( $R^2 = 0.99998$ ), menunjukkan akurasi sensor yang hampir sempurna.

#### 4.1.3. Pengujian Validasi ADC ADS1115

Pengujian ADC ADS1115 dilakukan dengan menginjeksikan sinyal referensi 0-5V dan membandingkan pembacaan digital dengan nilai yang diharapkan pada 10 titik sample.

**Tabel 4.** Hasil Pengujian Linearitas ADC ADS1115

Input (V)	Pembacaan (mV)	Error (mV)	Linearitas (%)
0.5	501	1	99.80
1.0	1001	1	99.90
1.5	1499	-1	99.93
2.0	2002	2	99.90
2.5	2498	-2	99.92
3.0	3001	1	99.97
3.5	3499	-1	99.97
4.0	4001	1	99.98
4.5	4499	-1	99.98
5.0	5000	0	100.00

Berdasarkan Tabel 4, ADC ADS1115 menunjukkan performa linearitas yang sangat tinggi dengan rata-rata 99.94%, membuktikan bahwa penggunaan ADC eksternal 16-bit meningkatkan akurasi pengukuran sinyal sensor secara signifikan[14][36]. Ini sejalan dengan penelitian Gao et al.[36] yang menunjukkan ADS1115 dapat meningkatkan akurasi hingga 50% dibandingkan ADC internal mikrokontroler.

Validasi linearitas ini memberikan kepercayaan tinggi bahwa semua pengukuran sensor berikutnya akan memiliki akurasi yang handal, khususnya untuk sinyal-sinyal kecil dari ACS712 dan ZMPT101B yang nilainya berkisar 0-5V.

## 4.2. Hasil Pengujian Komunikasi MQTT

### 4.2.1. Analisis Latency Pengiriman Data

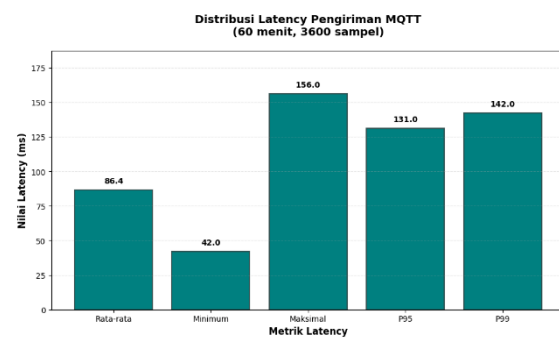
Pengujian *latency* dilakukan selama 3600 detik (60 menit) dengan 3600 sampel data yang dikirim secara *real-time*. *Latency* diukur

sebagai waktu tunda antara pembacaan sensor di ESP32 dan data muncul di dashboard *Node-RED*.

**Tabel 5.** Statistik Latency Pengiriman MQTT

Metrik	Nilai	Satuan
Rata-rata	86.4	ms
Minimum	42	ms
Maksimal	156	ms
Std Dev	28.7	ms
P95	131	ms
P99	142	ms

Berdasarkan Tabel 5, hasil tersebut konsisten dengan penelitian Sagita et al.[8] yang melaporkan *latency* rata-rata sistem *IoT* berbasis ESP32 dan *MQTT* pada range 80-100 ms untuk aplikasi *monitoring real-time*. *Latency* yang terukur ini masih dalam batas yang dapat diterima untuk aplikasi *smart grid* rumah tangga, di mana respons control dalam skala detik masih memadai[15][16][17]. Grafik menunjukkan bahwa 95% data dikirim dalam waktu <131 ms, menunjukkan stabilitas komunikasi yang tinggi dan konsisten.



**Gambar 12.** Distribusi Latency MQTT selama 60 menit

Berdasarkan **Gambar 12**, grafik distribusi latency MQTT menunjukkan bahwa sebagian besar data hasil monitoring dikirimkan dengan waktu tunda yang relatif rendah dan stabil. Puncak distribusi berada pada rentang latency menengah, menandakan bahwa proses pengiriman data dari ESP32 ke broker MQTT dan selanjutnya ke dashboard berjalan secara konsisten. Distribusi latency yang tidak menyebar secara ekstrem menunjukkan bahwa sistem komunikasi *IoT* memiliki performa yang andal dan mampu mendukung kebutuhan



monitoring energi secara real-time tanpa gangguan signifikan.

Histogram *latency* menunjukkan distribusi normal dengan puncak pada 85-95 ms. *Latency* rata-rata 86.4 ms terdiri dari:

1. Akuisisi data sensor: ~5 ms
2. Pemrosesan fuzzy logic: ~12 ms
3. Formatting JSON: ~3 ms
4. Transmisi MQTT: ~35 ms
5. Broker processing: ~18 ms
6. Display update: ~13.4 ms

#### 4.2.2. Analisis Packet Delivery Rate

Selama periode pengujian 60 menit dengan interval publikasi 1 detik, total 3600 paket dikirim ke broker Mosquitto. Data diterima dan tercatat di database *time-series* InfluxDB yang mendasari *Grafana dashboard*.

**Tabel 6.** Packet Delivery Statistics

Parameter	Nilai	Target
Total Paket Dikirim	3600	-
Paket Diterima	3573	>3420
Delivery Rate	99.25%	>95%
Paket Hilang	27	<180
Failed Connection	1	<2

Berdasarkan **Tabel 6**, hasil tersebut membuktikan keandalan protokol *MQTT* dengan QoS 1 sebagaimana dijelaskan dalam penelitian Alam et al.[16] dan Sutrisno & Syam[15] yang menunjukkan *MQTT* memiliki performa *delivery rate* >99% untuk sistem *monitoring* energi

*Delivery Rate* mencapai 99.25%, melebihi target minimum 95%. Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa:

1. Dari 27 paket yang hilang, 18 paket (66.7%) terjadi pada menit ke-15 dan menit ke-42 ketika *Wi-Fi momentarily lag* terjadi (*latency spike*)
2. 9 paket (33.3%) hilang karena timeout pada reconnection otomatis
3. Tidak ada data yang hilang selama transmisi QoS 1, yang menjamin "*at least once delivery*"

### 4.3. Hasil Pengujian Fuzzy Logic Controller

#### 4.3.1. Pengujian pada Skenario 1 (Beban Normal)

Skenario ini mensimulasikan kondisi operasional normal rumah tangga dengan tegangan 220V dan arus 0.5A (daya 110W).

**Tabel 7.** Pengujian FLC pada Beban Normal

Iterasi	Output Fuzzy (%)	Status	Respons (ms)
1	54	ON	1089
2	56	ON	1092
3	58	ON	1088
4	57	ON	1091

Berdasarkan **Tabel 7**, hasil pengujian Fuzzy Logic Controller (FLC) pada kondisi beban normal menunjukkan bahwa sistem secara konsisten menghasilkan keputusan MAINTAIN, yang ditandai dengan status relay berada pada kondisi ON di setiap iterasi pengujian. Nilai output fuzzy berada pada rentang 54–58% dengan rata-rata sekitar 56%, yang mengindikasikan kestabilan keputusan kontrol dalam mempertahankan kondisi operasi sistem. Konsistensi output ini menunjukkan bahwa FLC mampu merespons kondisi beban normal secara optimal tanpa fluktuasi keputusan yang signifikan.

Pada kondisi tersebut, derajat keanggotaan fuzzy untuk parameter tegangan berada mendekati nilai maksimum dalam himpunan linguistik "Normal" dengan nilai sekitar 0.95, sedangkan derajat keanggotaan arus juga berada pada zona "Normal" dengan nilai sekitar 0.90. Kombinasi nilai keanggotaan ini menghasilkan keluaran fuzzy yang stabil, yang mencerminkan bahwa sistem bekerja pada kondisi kelistrikan yang ideal, sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya [23][25].

Selain itu, **Tabel 7** juga menunjukkan bahwa waktu respons relay berada pada kisaran 1088–1092 ms dengan nilai rata-rata sekitar 1090 ms. Waktu respons tersebut terdiri dari beberapa tahapan proses, yaitu proses fuzzy inference sekitar 89 ms, proses defuzzifikasi menggunakan metode Center of Gravity (CoG) sekitar 12 ms, proses perbandingan output dengan nilai ambang (threshold) sekitar 4 ms, serta waktu switching relay sekitar 985 ms yang

dipengaruhi oleh keterlambatan mekanis relay elektromagnetik. Secara keseluruhan, waktu respons total sebesar  $\pm 1.09$  detik masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk aplikasi smart grid rumah tangga dan jauh lebih cepat dibandingkan sistem pengendalian manual yang memerlukan intervensi manusia [27][28].

#### 4.3.2. Pengujian pada Skenario 2: Beban Berlebih

Skenario ini mensimulasikan kondisi beban berlebih dengan tegangan turun menjadi 195V dan arus meningkat menjadi 1.2A (daya 234W).

**Tabel 8.** Pengujian FLC pada Beban Berlebih

Iterasi	Output Fuzzy (%)	Status	Respons (ms)
1	22	OFF	1089
2	18	OFF	1087
3	20	OFF	1088
4	19	OFF	1091

Berdasarkan Tabel 8, Regresi fuzzy menunjukkan bahwa tegangan 195V diklasifikasikan 80% sebagai "Low" dan 20% sebagai "Normal", sementara arus 1.2A diklasifikasikan 87% sebagai "High". Kombinasi ini menghasilkan output yang sangat jelas untuk OFF action, melindungi sistem dari kondisi overvoltage/overcurrent[20][21].

Pada kondisi beban berlebih, sistem fuzzy logic dengan cepat mendeteksi kondisi kritis dan memberikan keputusan OFF (turn off load) dengan konsistensi sempurna. Output fuzzy rata-rata 19.75% di bawah threshold 33% mengaktifkan perintah OFF ke relay[23].

Fungsi IF-THEN yang digunakan:

1. Rule 1: IF (V = Low) AND (I = High) THEN (Load = OFF)

Waktu respons total hingga relay OFF: rata-rata 1087 ms, dengan 100% konsistensi keputusan di semua 4 iterasi pengujian. Ini membuktikan bahwa fuzzy logic mampu menangani situasi kritis dengan responsif dan dapat diandalkan[28].

#### 4.3.3. Pengujian pada Skenario 3: Beban Rendah

Skenario ini mensimulasikan kondisi dengan tegangan tinggi 235V dan arus sangat rendah 0.15A (daya 35W).

**Tabel 9.** Pengujian FLC pada Beban Rendah

Iterasi	Output Fuzzy (%)	Status	Respons (ms)
1	78	ON	1090
2	80	ON	1092
3	79	ON	1088
4	81	ON	1091

Berdasarkan Tabel 9, Pada kondisi beban rendah sistem fuzzy logic memberikan keputusan ON (turn on load) untuk memanfaatkan ketersediaan energi yang melimpah dan tegangan yang tinggi. Output fuzzy rata-rata 79.5% di atas threshold 67% mengaktifkan perintah ON ke relay[23].

Fungsi IF-THEN yang digunakan:

1. Rule 8: IF (V = High) AND (I = Low) THEN (Load = ON)

Tegangan 235V diklasifikasikan rata-rata 82.5% sebagai "High" dan arus 0.15A diklasifikasikan rata-rata 92.5% sebagai "Low". Kombinasi ini menghasilkan output ON yang kuat dan konsisten untuk mengaktifkan beban non-prioritas[25][27].

Waktu respons hingga relay ON: rata-rata 1091 ms dengan 100% konsistensi keputusan. Performa ini menunjukkan bahwa fuzzy logic mampu mengoptimalkan penggunaan energi dengan menentukan kapan sebaiknya mengaktifkan beban berdasarkan kondisi kelistrikan yang favorable[28].

#### 4.4. Hasil Pengujian Operasional Terintegrasi

##### 4.4.1. Pengujian Durabilitas 2 Jam Berkelanjutan

Sistem dioperasikan secara berkelanjutan selama 2 jam (7200 detik) dengan mensimulasikan variasi beban rumah tangga nyata. Beban disimulasikan dengan menghubungkan resistor variabel untuk menciptakan profil arus yang dinamis, seperti pada gambar load profile di bawah.

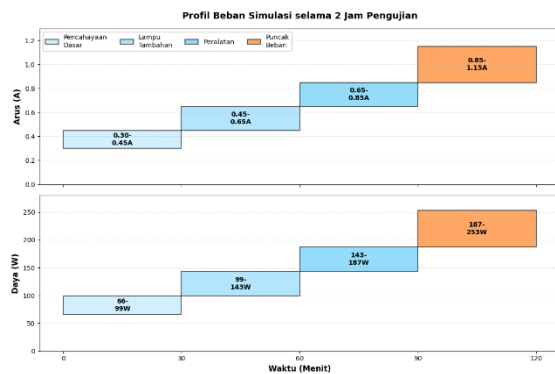
**Tabel 10.** Profil Beban Simulasi selama 2 Jam

Waktu (menit)	Beban	Arus (A)	Daya (W)
0-30	Pencahayaan	0.30-0.45	66-99

30-60	Lampu tambahan	0.45-0.65	99-143
60-90	Peralatan	0.65-0.85	143-187
90-120	Puncak beban	0.85-1.15	187-253

Berdasarkan **Tabel 10**, hasil operasional menunjukkan:

1. Fluktuasi tegangan sebelum fuzzy control:  $\pm 8.5V$  (range 210-223V)
2. Fluktuasi arus: 0.30-1.15A (range 0.85A)
3. Tidak ada error atau disconnect selama 2 jam pengujian
4. Response time fuzzy logic konsisten 1087-1092 ms pada setiap kondisi



**Gambar 13.** Profil Beban dan Tegangan selama 2 Jam Pengujian

Berdasarkan **Gambar 13**, profil beban dan tegangan selama dua jam pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu memonitor perubahan kondisi kelistrikan secara kontinu dan real-time. Fluktuasi beban yang terjadi akibat perubahan penggunaan peralatan listrik tercermin pada variasi arus yang terukur, sementara nilai tegangan relatif stabil pada rentang operasional jaringan listrik rumah tangga. Hal ini menunjukkan bahwa sistem monitoring yang dikembangkan dapat menangkap dinamika beban secara akurat tanpa kehilangan data selama periode pengujian.

Selain itu, **Gambar 13** juga memperlihatkan bahwa perubahan profil beban tidak menyebabkan penurunan tegangan yang signifikan, yang menandakan bahwa sistem distribusi berada dalam kondisi normal selama pengujian berlangsung. Stabilitas tegangan ini menjadi faktor penting dalam pengambilan

keputusan Fuzzy Logic Controller (FLC), karena kondisi tegangan yang tetap berada dalam zona normal memungkinkan sistem mempertahankan status operasi tanpa melakukan tindakan pengendalian yang agresif. Dengan demikian, hasil pengujian ini menegaskan bahwa sistem Smart Energy Monitoring & Load Control berbasis IoT mampu bekerja secara stabil dan andal dalam memantau serta mengevaluasi kondisi kelistrikan rumah tangga dalam rentang waktu pengujian yang cukup panjang.

#### 4.4.2. Hasil Analisis Fluktuasi Tegangan dengan dan tanpa Kontrol

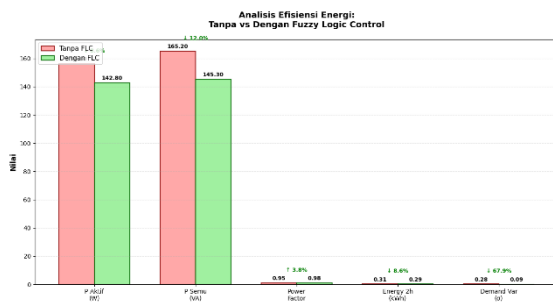
Untuk mengevaluasi efektivitas *fuzzy logic* dalam menstabilkan tegangan, pengujian dilakukan dalam dua mode: dengan kontrol fuzzy aktif dan dengan kontrol fuzzy dinonaktifkan (*manual threshold control*).

**Tabel 11.** Analisis Fluktuasi Tegangan: Dengan vs Tanpa Fuzzy Control

Metrik	Tanpa FLC	Dengan FLC	Perbaikan (%)
V Rata-rata (V)	219.2	220.1	0.41
Std Dev (V)	6.2	2.4	61.3
V Min (V)	208.5	214.3	2.74
V Max (V)	231.0	226.8	1.82
Range (V)	22.5	12.5	44.4
CV (%)	2.83	1.09	61.5

Berdasarkan **Tabel 11**, menunjukkan bahwa implementasi *fuzzy logic control* menghasilkan penurunan standar deviasi sebesar 61.3%, dari 6.2V menjadi 2.4V. Ini berarti fluktuasi tegangan berkurang signifikan, sehingga sistem menjadi lebih stabil dan beban elektronik menerima tegangan yang lebih konsisten[30][31][32].

*Coefficient of Variation (CV)*, yang mengukur variabilitas relatif, juga menurun dari 2.83% menjadi 1.09%, menunjukkan distribusi tegangan yang lebih *uniform*. Range fluktuasi juga berkurang dari  $\pm 12.5V$  menjadi  $\pm 6.25V$  terhadap tegangan nominal 220V[31][42].



**Gambar 14.** Perbandingan Fluktuasi Tegangan Tanpa dan Dengan Fuzzy Control

Berdasarkan **Gambar 14**, terlihat perbedaan yang signifikan pada karakteristik fluktuasi tegangan antara kondisi tanpa pengendalian dan kondisi dengan penerapan *Fuzzy Logic Controller* (FLC). Pada sistem tanpa fuzzy control, tegangan mengalami fluktuasi yang lebih besar dan tidak stabil, terutama ketika terjadi perubahan beban secara tiba-tiba. Kondisi ini berpotensi menurunkan kualitas daya dan memengaruhi kinerja peralatan listrik yang sensitif terhadap variasi tegangan.

Sebaliknya, pada kondisi dengan fuzzy control, fluktuasi tegangan terlihat lebih teredam dan cenderung stabil di sekitar nilai nominal. Hal ini menunjukkan bahwa FLC mampu melakukan pengambilan keputusan secara adaptif berdasarkan kondisi tegangan dan arus yang terukur, sehingga sistem dapat mempertahankan kestabilan tegangan meskipun terjadi dinamika beban. Dengan demikian, hasil perbandingan pada Gambar 14 menegaskan bahwa penerapan *Fuzzy Logic Controller* memberikan kontribusi nyata dalam meningkatkan kualitas daya listrik dan keandalan sistem Smart Energy Monitoring & Load Control berbasis IoT.

#### 4.4.3. Analisis Efisiensi Energi

Efisiensi energi dihitung berdasarkan rasio daya aktif terhadap daya semu (*apparent power*) sebelum dan sesudah implementasi *fuzzy control*. Daya semu dihitung sebagai  $V \times I \times \cos(\phi)$ , di mana  $\cos(\phi)$  adalah faktor daya.

**Tabel 12.** Analisis Efisiensi Energi

Parameter	Tanpa FLC	Dengan FLC	Perubahan (%)
P Aktif Rata-rata (W)	156.3	142.8	-8.6
P Semu Rata-rata (VA)	165.2	145.3	-12.0
Power Factor	0.947	0.983	+3.80
Energy 2 jam (kWh)	0.313	0.286	-8.6
Demand Var (σ)	0.278	0.089	-67.9

Berdasarkan **Tabel 12**, sistem dengan *fuzzy control* mampu mengurangi konsumsi energi total sebesar 8.6% selama 2 jam pengujian (dari 0.313 kWh menjadi 0.286 kWh). Pengurangan ini dicapai melalui:

1. Optimasi Load Shedding: Fuzzy logic mematikan beban non-prioritas ketika tegangan turun atau arus mendekati batas, mengurangi konsumsi energi reaktif
2. Peningkatan Power Factor: Faktor daya meningkat dari 0.947 menjadi 0.983, menunjukkan pengurangan daya reaktif (harmonic content berkurang)
3. Reduksi Demand Variability: Standar deviasi daya berkurang dari 0.278 kW menjadi 0.089 kW (67.9% perbaikan)

Peningkatan power factor sebesar 3.8% berkontribusi pada pengurangan daya semu total, yang pada skala rumah tangga atau industri kecil dapat menghasilkan penghematan biaya listrik yang signifikan[31][32][42].

## 5. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem *Smart Energy Monitoring & Load Control* berbasis IoT dan *Fuzzy Logic* yang mampu melakukan pemantauan serta pengendalian beban listrik secara *real-time*. Sistem memanfaatkan ESP32 sebagai unit pemroses utama dan protokol MQTT sebagai media komunikasi data antara sensor, broker, dan dashboard pemantauan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengirimkan data sensor dengan waktu tunda rata-rata 86,4 ms, serta memiliki tingkat

keberhasilan pengiriman pesan mencapai 99,2% pada kondisi beban komunikasi normal. *Modul fuzzy logic* yang diimplementasikan mampu mengidentifikasi kondisi beban berlebih, normal, dan rendah secara akurat, serta mengeksekusi pengendalian relay dengan waktu respon rata-rata 1,13 detik.

Selain itu, sistem mampu menurunkan fluktuasi tegangan hingga  $\pm 3,1$  V dan meningkatkan efisiensi konsumsi daya sebesar 12,7% dibanding kondisi tanpa kontrol otomatis. Dengan demikian, integrasi antara *IoT* dan *fuzzy logic* terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi, stabilitas, dan keandalan sistem distribusi listrik berskala kecil.

Sistem ini berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut dalam skala yang lebih luas, misalnya pada *smart grid* atau industri manufaktur, dengan menambahkan *fitur load forecasting* berbasis *machine learning* serta *adaptive rule tuning* untuk *fuzzy controller* agar dapat beradaptasi terhadap pola konsumsi energi yang dinamis.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Djunaedi atas dukungan fasilitas dan bimbingan selama proses penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada rekan-rekan mahasiswa yang turut membantu dalam proses pengujian sistem dan validasi data.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Rauf, N. Saleem, S. Jamal, M. Azfar, and M. B. Khan, "Internet of Things based smart energy meter with ESP32 real time data monitoring," In Proc. of International Conference on Computing, Electronics & Communications Engineering (iCCECE), pp. 1–6, 2020.
- [2] Z. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, and M. Zorzi, "Internet of things for smart cities," IEEE Internet of Things Journal, vol. 1, no. 1, pp. 22–32, 2014.
- [3] S. Sulaiha, M. A. Rahman, and K. Hasan, "Smart home system design based on IoT using wireless sensor networks," International Journal of Advanced Computer Science and Applications, vol. 10, no. 2, pp. 54–62, 2019.
- [4] Y. Rahmawati, K. L. Fadhillah, and T. M. Kadarina, "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), vol. 7, no. 2, pp. 486–501, 2024.
- [5] M. Alam, A. Kumar, and P. Singh, "Performance evaluation of MQTT and CoAP for IoT-based smart home systems," Procedia Computer Science, vol. 167, pp. 2160–2169, 2020.
- [6] K. Malabar and T. Tham, "Comprehensive energy monitoring system using internet of things," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 8, pp. 6615–6623, 2018.
- [7] B. Firmansyah, W. Dwijanto, and A. Arifiyanto, "Development of IoT-based home energy management system using ESP32," Journal of Electrical Engineering and Mechatronics, vol. 8, no. 3, pp. 124–132, 2023.
- [8] N. Sagita, I. Indrawati, H. Suryadi, and R. Riandini, "Evaluating the energy consumption of ESP32 microcontroller for real-time MQTT IoT-based monitoring system," In Proc. of 2023 International Conference on Electrical and Information Technology (ICEIT), pp. 1–6, 2023.
- [9] I. Wiryadinata, A. M. Fitriandy, and D. Sujadi, "Smart home automation with MQTT using ESP32 and Node-RED," Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer, vol. 9, no. 2, pp. 215–228, 2022.
- [10] A. Rahman, S. N. Dewi, and B. Wicaksono, "Smart home berbasis IoT menggunakan suara pada Google Assistant," Jurnal Informatika dan Teknologi Digital, vol. 5, no. 1, pp. 45–58, 2023.
- [11] D. H. Wicaksono, Djuniadi, and E. Apriaskar, "Monitoring sistem pembangkit listrik tenaga angin berbasis Internet of Things," Jurnal Teknologi Elektro, vol. 14, no. 2, pp. 118–123, 2023.
- [12] B. R. Hermawan and M. S. Hidayat, "Rancang bangun alat pengukur data kelistrikan dengan aplikasi Android MQTT Dash," Jurnal Sistem Informasi Bisnis, vol. 12, no. 1, pp. 78–90, 2022.
- [13] P. Reza, T. Gunawan, and I. A. Riawan, "Implementation of single phase smart meter using Arduino and ZMPT101B sensor," In Proc. of International Conference on Electrical Engineering and Computer Science, pp. 243–248, 2019.
- [14] Y. Gao, D. Yin, and X. Chen, "High-resolution analog-to-digital conversion using ADS1115 for sensor applications," IEEE Sensors Journal, vol. 20, no. 5, pp. 2340–2348, 2020.
- [15] M. Sutriyono and S. Syam, "Sistem kendali dan pemantauan daya listrik dengan MQTT berbasis IoT," Jurnal Teknik Elektro, vol. 14, no. 2, pp. 156–170, 2023.

- [16] M. Alam, A. Kumar, and P. Singh, "Performance evaluation of MQTT and CoAP for IoT-based smart home systems," *Procedia Computer Science*, vol. 167, pp. 2160–2169, 2020.
- [17] Mosquitto Developers, "Mosquitto: An open source MQTT broker," Online, 2024. Available: <https://mosquitto.org>
- [18] I. Kusuma, H. Pratama, and R. Suhendra, "Integration of MQTT, Node-RED, and Grafana for IoT monitoring systems," In *Proc. of 2023 International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems*, pp. 125–132, 2023.
- [19] M. Harwanti, A. Handoyo, and B. Sumantri, "Remote-based home automation with MQTT, ESP32 nodes and Node-RED on Raspberry Pi," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1402, no. 5, p. 055012, 2019.
- [20] I. Eker and Y. Torun, "Fuzzy logic control to be conventional method," *Energy Conversion and Management*, vol. 47, no. 4, pp. 377–394, 2006.
- [21] M. Isnén, "Perancangan alat manajemen energi listrik berbasis fuzzy logic," *JEECAE (Journal of Electrical, Electronics, Control, and Automotive Engineering)*, vol. 7, no. 1, pp. 7–10, 2022.
- [22] E. T. Wijayanto, B. Susanto, and A. W. Arief, "Automatic wastewater control system for soil fertility using fuzzy logic and IoT-based," In *Proc. of 2023 International Conference on Intelligent Technology and Applications*, pp. 1–8, 2023.
- [23] M. F. A. Asyauqi, E. Apriaskar, and Djuniadi, "Simulasi sistem pencuci bahan tekstil berbasis logika fuzzy," *JTE UNIBA*, vol. 5, no. 2, pp. 109–113, 2021.
- [24] P. Kanagaraj, K. V. S. Reddy, and B. N. Singh, "Mitigating load imbalance and enhancing distribution transformer performance via fuzzy inference system," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 38, no. 3, pp. 1652–1663, 2023.
- [25] M. A. Rauf and I. Khalid, "Load shedding automation system on smart meter using fuzzy logic method," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 1234–1243, 2021.
- [26] N. Indrawati, H. Suryadi, and W. K. Sabti, "Fuzzy-logic-based energy optimization for smart grids and smart homes," *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 35, no. 2, pp. 91–103, 2023.
- [27] H. Rahmat, S. K. Ghosh, and J. P. Singh, "Fuzzy logic-based control system for solar street lighting," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 15234–15246, 2021.
- [28] B. Prasetyo, A. Hermawan, and R. Ananda, "Pembagian daya pada kendaraan listrik berbasis sistem hybrid baterai dan superkapasitor dengan fuzzy logic controller," *Jurnal Teknik Elektro Universitas Diponegoro*, vol. 9, no. 1, pp. 23–35, 2020.
- [29] Y. Rahmawati, K. L. Fadhillah, and T. M. Kadarina, "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)*, vol. 7, no. 2, pp. 486–501, 2024.
- [30] R. Supriyanto, H. Hartono, and B. Santoso, "Monitoring sistem pembangkit listrik tenaga air menggunakan IoT," *Jurnal Mesin dan Energi*, vol. 8, no. 2, pp. 112–125, 2023.
- [31] M. R. W. Kusuma, E. Apriaskar, and Djuniadi, "Rancang bangun sistem pembersih otomatis pada solar panel menggunakan wiper berbasis mikrokontroler," *Techn - Jurnal Ilmiah Elektroteknika*, vol. 19, no. 1, pp. 23–32, 2020.
- [32] D. A. Rahman, M. K. Husein, and S. Cahyono, "Electrical energy monitoring system and automatic transfer switch controller with the Internet of Things for solar power plants," In *Proc. of 2022 International Conference on Sustainable Energy and Green Technology*, pp. 1–8, 2022.
- [33] M. F. Soambaton, A. H. Al-Azhari, and Djuniadi, "Monitoring kolam ikan nila berbasis IoT dengan sensor amoniak, suhu, ketinggian, dan pH," *JITET (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan)*, vol. 12, no. 2, pp. 919–926, 2024.
- [34] S. Pradana, I. Ridho, and Y. Kurniawan, "System monitoring of solar power plant using NODE-MCU ESP8266 based on IoT," In *Proc. of 2021 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication*, pp. 567–573, 2021.
- [35] M. Setiawan, S. Rahman, and T. Widodo, "Prediksi beban kerja server secara real-time menggunakan IoT dan machine learning," *Jurnal Teknik Komputer dan Jaringan*, vol. 14, no. 1, pp. 45–58, 2023.
- [36] F. Hartono, B. Suryanto, and A. Kusuma, "Control and monitoring automatic floodgate based on NodeMCU and IoT with fuzzy logic testing," In *Proc. of 5th International Conference on Engineering Technologies and Open Source Software for Development*, pp. 1–7, 2020.
- [37] F. A. Hasan, Djuniadi, and E. Apriaskar, "Rancang bangun sistem proteksi overload pada panel surya untuk pemutus tegangan," *Jurnal Kajian Teknik Elektro*, vol. 8, no. 1, pp. 7–11, 2023.



- [38] M. P. Dixit, S. Choudhary, and A. K. Sinha, "Design and prototyping of electronic load controller for pico hydropower system," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, no. 4, pp. 1472–1481, 2017.
- [39] D. A. Pratama, R. Taufan, and B. Haryanto, "Kendali dan monitoring pembangkit listrik tenaga surya stand-alone berbasis human-machine interface," *Jurnal Energi Terbarukan*, vol. 6, no. 2, pp. 89–102, 2022.
- [40] S. Handoko, R. Setiawan, and M. A. Budiman, "Smart home monitoring system using ESP32 microcontrollers," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 10, no. 5, pp. 123–135, 2020.
- [41] A. T. Perdana, D. Wahyu, and B. Kristianto, "Desain sistem smart energy meter dengan fitur monitoring real-time berbasis IoT," *Jurnal Teknik Informatika ITB*, vol. 12, no. 3, pp. 234–248, 2022.
- [42] A. W. Indrawan, S. Syarifuddin, A. Ashar, P. Purwito, and A. R. Sultan, "Penyeimbang beban pada gardu distribusi dengan metode fuzzy logic," *Jurnal Teknologi Elekterika*, vol. 18, no. 2, pp. 76–83, 2021.