

CESS

(Journal of Computer Engineering, System and Science)

Available online: <https://jurnal.unimed.ac.id/2012/index.php/cess>

ISSN: 2502-714x (Print) | ISSN: 2502-7131 (Online)



Implementasi Konsumsi Energi Listrik Perabotan Rumah Tangga Berbasis IoT Menggunakan ESP-32, Sensor PZEM 004T dan Fuzzy Mamdani

Implementation of IoT-Based Household Appliance Electricity Consumption Using ESP-32, PZEM 004T Sensor and Fuzzy Mamdani

Sultan Azka El Husein Lubis^{1*}, Rakhmat Kurniawan R²

^{1,2}Ilmu Komputer, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara, Indonesia
Jl. Lapangan Golf Tuntungan, Pancur Batu, Deliserdang

Email: ¹sultanazkaelhusein@gmail.com, ²rakhmat.kr@uinsu.ac.id

*Corresponding Author

ABSTRAK

Peningkatan konsumsi energi listrik rumah tangga menuntut adanya sistem monitoring dan kontrol yang efektif untuk meningkatkan efisiensi penggunaan energi. Penelitian ini dirancang untuk mengembangkan serta menerapkan infrastruktur sistem pemantauan dan pengendalian konsumsi energi listrik yang terintegrasi dengan teknologi *Internet of Things* (IoT) melalui metode logika fuzzy Mamdani. Sistem dirancang dengan mikrokontroler ESP32 berfungsi sebagai unit pemrosesan data utama, modul sensor PZEM-004T sebagai alat ukur parameter kelistrikan, relay sebagai perangkat pengendali beban, serta platform IoT Blynk sebagai media monitoring jarak jauh. Data hasil pengukuran ditampilkan secara *real-time* melalui antarmuka LCD dan aplikasi berbasis *Internet of Things* (IoT). Metode fuzzy Mamdani diterapkan dengan dua parameter input, yaitu arus dan daya, yang ditransformasi melalui proses fuzzifikasi ke dalam tiga himpunan fuzzy, linguistik kategori rendah, kategori sedang, dan kategori tinggi. Sistem menggunakan sembilan kaidah fuzzy sebagai dasar pengambilan keputusan dalam mengontrol relay. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu memantau parameter listrik secara *real-time* dengan tingkat akurasi yang tinggi. Hasil pengujian menunjukkan nilai rata-rata kesalahan pengukuran tegangan berkisar pada 0,114%, sedangkan kesalahan data pengukuran arus dan daya berada di bawah 1,3%. Mekanisme kontrol relay bekerja sesuai hasil inferensi fuzzy dan konsisten dengan perhitungan manual. Selain itu, sistem mampu mendeteksi kondisi *standby power* serta menghitung dan menampilkan biaya pemakaian listrik secara *real-time*, sehingga membantu pengguna dalam mengontrol konsumsi energi listrik secara lebih beroperasi secara optimal.

Kata kunci: *Internet of Things; fuzzy Mamdani; monitoring energi listrik; ESP32; PZEM-004T*



ABSTRACT

The increase in household electricity consumption requires an effective monitoring and control system to improve energy efficiency. This study was designed to develop and implement an integrated electricity consumption monitoring and control system infrastructure using Internet of Things (IoT) technology through the Mamdani fuzzy logic method. The system is designed with an ESP32 microcontroller functioning as the main data processing unit, a PZEM-004T sensor module as an electrical parameter measuring device, a relay as a load control device, and a Blynk IoT platform as a remote monitoring medium. The measurement data is displayed in *real-time* through an LCD interface and an Internet of Things (IoT)-based application. The Mamdani fuzzy method is applied with two input parameters, namely current and power, which are transformed through a fuzzification process into three fuzzy sets: low, medium, and high linguistic categories. The system uses nine fuzzy rules as the basis for decision making in controlling the relay. The results show that the system is capable of monitoring electrical parameters in real time with a high degree of accuracy. Test results show that the average voltage measurement error is around 0.114%, while the current and power measurement data errors are below 1.3%. The relay control mechanism works according to fuzzy inference results and is consistent with manual calculations. In addition, The system is capable of detecting standby power conditions and calculating and displaying electricity usage costs in real time, thereby helping users control their electricity consumption more optimally.

Keywords: *Internet of Things; fuzzy Mamdani; electrical energy monitoring; ESP32; PZEM-004T*

1. PENDAHULUAN

Energi listrik telah berkembang menjadi komponen vital yang tidak terpisahkan dari kehidupan manusia modern. Di era digital, hampir seluruh aktivitas manusia bergantung pada pasokan energi listrik, mulai dari kebutuhan rumah tangga sederhana hingga operasional industri berskala besar. Di lingkungan domestik, listrik menjadi sumber tenaga utama bagi berbagai perangkat elektronik seperti lampu penerangan, peralatan dapur, hingga perangkat hiburan. Namun, tingkat ketergantungan yang tinggi ini sering kali menyebabkan pola konsumsi energi yang tidak terkendali, kurang efisien, serta berdampak pada meningkatnya biaya pemakaian listrik.

Pemborosan energi listrik tidak hanya berimplikasi pada meningkatnya beban biaya operasional rumah tangga, tetapi juga menimbulkan dampak serius terhadap kelestarian lingkungan. Setiap energi listrik yang terbuang berkontribusi terhadap peningkatan emisi karbon serta percepatan penipisan sumber daya alam. Oleh karena itu, pengembangan sistem pemantauan konsumsi energi listrik secara *real-time* menjadi salah satu solusi strategis. Implementasi teknologi monitoring memungkinkan pengguna memperoleh informasi aktual mengenai pemakaian energi sehingga pengelolaan daya dapat dilakukan secara lebih optimal dan bertanggung jawab.

Upaya peningkatan rasio elektrifikasi nasional terus digalakkan oleh pemerintah. Data statistik menunjukkan adanya peningkatan signifikan dalam konsumsi energi listrik per kapita selama beberapa tahun terakhir. Pada periode 2022–2023 tercatat pertumbuhan sebesar

9,5% dalam pemakaian listrik per penduduk. Meskipun demikian, sebagian besar konsumen belum memiliki akses informasi rinci mengenai pola konsumsi energi harian, karena pemakaian listrik umumnya baru diketahui saat menerima tagihan bulanan. Kondisi ini berpotensi menyebabkan pemborosan energi serta pengelolaan daya yang kurang optimal. Oleh sebab itu, sistem pemantauan berbasis teknologi mutakhir menjadi solusi penting untuk memberikan transparansi konsumsi energi secara langsung, sehingga masyarakat dapat melakukan pengaturan pemakaian listrik secara lebih efisien dan terencana serta mendukung program konservasi energi nasional [1].

Perkembangan teknologi telah melahirkan konsep *Internet of Things* (IoT), yaitu suatu ekosistem perangkat fisik yang saling terhubung melalui jaringan internet untuk memungkinkan pertukaran data dan pengambilan keputusan secara otomatis tanpa campur tangan manusia secara langsung. Sistem IoT bekerja berdasarkan algoritma tertentu yang dirancang untuk memproses data secara *real-time* dan menjalankan fungsi kontrol sesuai parameter yang telah ditentukan. Kemampuan IoT dalam menyediakan akses monitoring jarak jauh dan kontrol otomatis menjadikannya teknologi yang fleksibel dan efisien. Oleh karena itu, IoT memiliki potensi besar untuk diterapkan dalam sistem pemantauan dan pengendalian konsumsi energi listrik rumah tangga guna meningkatkan efisiensi penggunaan daya [2].

Berbagai penelitian terkait monitoring konsumsi energi listrik berbasis IoT telah dilakukan dengan memanfaatkan metode logika fuzzy. Rofiq et al. mengembangkan sistem monitoring dan kontrol energi listrik rumah tangga berbasis IoT menggunakan mikrokontroler ESP8266, sensor PZEM-004T, serta modul ACS712, yang mampu menampilkan data pengukuran secara *real-time* melalui LCD dan platform Blynk dengan penerapan logika fuzzy Mamdani [3]. Sementara itu, Zalmi et al. membuktikan bahwa penerapan logika fuzzy Mamdani dapat digunakan untuk memprediksi konsumsi energi listrik rumah tangga dan memperkirakan biaya pemakaian listrik [4]. Namun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada fungsi monitoring atau estimasi konsumsi energi, tanpa mengintegrasikan fitur pengendalian beban, deteksi kondisi *standby power*, serta perhitungan biaya pemakaian listrik secara *real-time* dalam satu sistem terpadu.

Oleh karena itu, penelitian ini menghadirkan pembaruan melalui integrasi logika fuzzy Mamdani pada sistem IoT berbasis ESP32 dan sensor PZEM-004T yang tidak hanya berfungsi untuk memantau konsumsi energi listrik secara *real-time*, tetapi juga mengendalikan beban listrik secara adaptif, mendeteksi kondisi *standby power*, serta menampilkan perhitungan biaya pemakaian listrik secara langsung. Dengan pendekatan tersebut, sistem yang dikembangkan diharapkan mampu membantu pengguna dalam mengoptimalkan penggunaan energi listrik rumah tangga secara lebih efektif dan efisien.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Desain Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan kajian mendalam mengenai permasalahan efisiensi energi listrik, dengan fokus pada penerapan implementasi teknologi *Internet of Things* (IoT) yang dikombinasikan dengan pendekatan metode Fuzzy Mamdani dalam sistem pemantauan dan pengendalian yang lebih cerdas. Tujuan utamanya adalah menciptakan sebuah sistem yang

mampu mengoptimalkan penggunaan energi listrik melalui pendekatan adaptif berbasis algoritma fuzzy, sekaligus menyediakan mekanisme kontrol yang presisi dan *real-time*.

Tahap pertama penelitian berupa analisis kebutuhan sistem, dimana dilakukan identifikasi menyeluruh terhadap spesifikasi teknis yang diperlukan, termasuk jenis data yang harus diproses, tingkat akurasi pengukuran yang diharapkan, serta berbagai kendala potensial dalam implementasi solusi IoT ini. Berdasarkan analisis tersebut, kemudian dirancang konsep sistem terintegrasi yang memanfaatkan jaringan sensor untuk pemantauan konsumsi energi secara *real-time*, dipadukan dengan algoritma Fuzzy Mamdani sebagai inti pengambilan keputusan cerdas, serta antarmuka pengguna yang intuitif untuk memudahkan kontrol jarak jauh.

Prototipe sistem kemudian dikembangkan melalui serangkaian proses yang meliputi instalasi sensor daya, pemrograman mikrokontroler dengan algoritma fuzzy, serta pembuatan aplikasi monitoring. Sistem ini menjalani berbagai tahap evaluasi menyeluruh yang mencakup pengujian kinerja, validasi akurasi data, hingga penilaian pengalaman pengguna. Hasil evaluasi menjadi dasar untuk melakukan penyempurnaan sistem, seperti optimalisasi parameter algoritma, kalibrasi sensor, dan peningkatan antarmuka pengguna.

Setelah melalui proses validasi yang ketat untuk memastikan keandalan sistem dalam berbagai kondisi operasional, penelitian diakhiri dengan tahap implementasi dan diseminasi solusi. Sistem akhir yang dihasilkan mampu menyediakan fungsi pemantauan konsumsi energi secara *real-time* melalui antarmuka digital, sekaligus memberikan rekomendasi pengoptimalan berbasis analisis fuzzy. Melalui penelitian ini, diharapkan dapat tercipta sebuah model pengelolaan energi listrik yang lebih efisien dan adaptif terhadap kebutuhan pengguna.

2.2 Rencana Pembahasan

2.2.1 Teknik Pengumpulan Data

Awal investigasi berfokus pada eksplorasi menyeluruh mengenai tantangan pengelolaan daya listrik, dengan menitikberatkan pada solusi berbasis jaringan perangkat pintar yang memadukan logika fuzzy Mamdani. Pendekatan ini dirancang untuk menciptakan mekanisme pengawasan dan pengaturan energi yang lebih dinamis, dimana sistem secara otomatis menyesuaikan operasinya berdasarkan pola konsumsi aktual.

Fase perancangan diawali dengan pemetaan komprehensif terhadap seluruh komponen pendukung, mencakup spesifikasi teknis perangkat sensor, kebutuhan komputasi algoritma, serta rancangan antarmuka kontrol. Solusi yang dikembangkan mengintegrasikan unit pengukuran *real-time* dengan mesin inferensi fuzzy, menciptakan sistem hibrid yang mampu merespon fluktuasi beban listrik secara cerdas sekaligus memberikan visualisasi data yang interaktif.

Proses pengembangan melibatkan konstruksi bertahap mulai dari pembuatan modul sensor mandiri, perakitan unit pemrosesan pusat, hingga pengembangan platform antarmuka berbasis web. Setiap komponen menjalani serangkaian pengujian ketat untuk memverifikasi ketepatan pengukuran, kecepatan respon sistem, dan stabilitas operasi jangka panjang sebelum diintegrasikan menjadi solusi utuh.

Implementasi final menghadirkan arsitektur terdistribusi dimana titik-titik pengukuran tersebar berkomunikasi dengan pusat kendali melalui jaringan nirkabel. Sistem ini tidak hanya

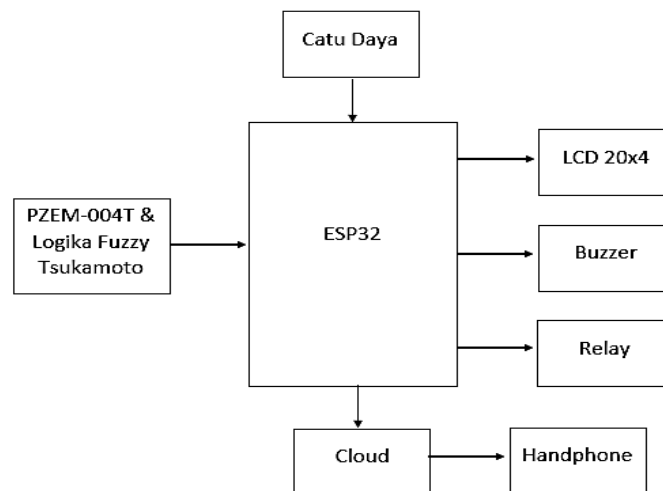
memberikan gambaran menyeluruh tentang pola konsumsi energi, tetapi juga secara proaktif menyarankan penyesuaian operasi perangkat untuk mencapai efisiensi optimal. Melalui mekanisme umpan balik berkelanjutan, solusi ini terus berkembang menyesuaikan dengan kebutuhan pengguna dan perubahan lingkungan operasi.

2.2.2 Analisis Kebutuhan

Tahap identifikasi spesifikasi kebutuhan sistem merupakan fondasi penting dalam perancangan suatu solusi teknologi, dimana fokus utamanya adalah merumuskan seluruh komponen esensial yang dibutuhkan. Pada penerapan jaringan IoT dengan logika Fuzzy Mamdani untuk pengawasan dan pengaturan daya listrik, proses ini meliputi penetapan kriteria perangkat fisik (meliputi unit sensor dan perangkat transmisi data) maupun sistem komputasi (termasuk algoritma pengolahan informasi dan platform antarmuka). Pemahaman menyeluruh terhadap persyaratan teknis ini memungkinkan perancang menciptakan solusi yang tidak hanya beroperasi dengan baik, tetapi juga mampu beradaptasi dengan berbagai skenario penggunaan di lapangan. Temuan dari proses identifikasi ini selanjutnya akan menjadi acuan utama dalam menyusun arsitektur sistem yang efektif dan tepat guna.

2.3 Diagram Blok Penelitian

Lebih mudah mempelajari dan memahami cara kerjanya, kerangka rencana dibuat berdasarkan grafik blok di mana setiap blok memiliki kemampuan dan pendekatan tertentu untuk bekerja.



Gambar 1. Diagram Blok Alat

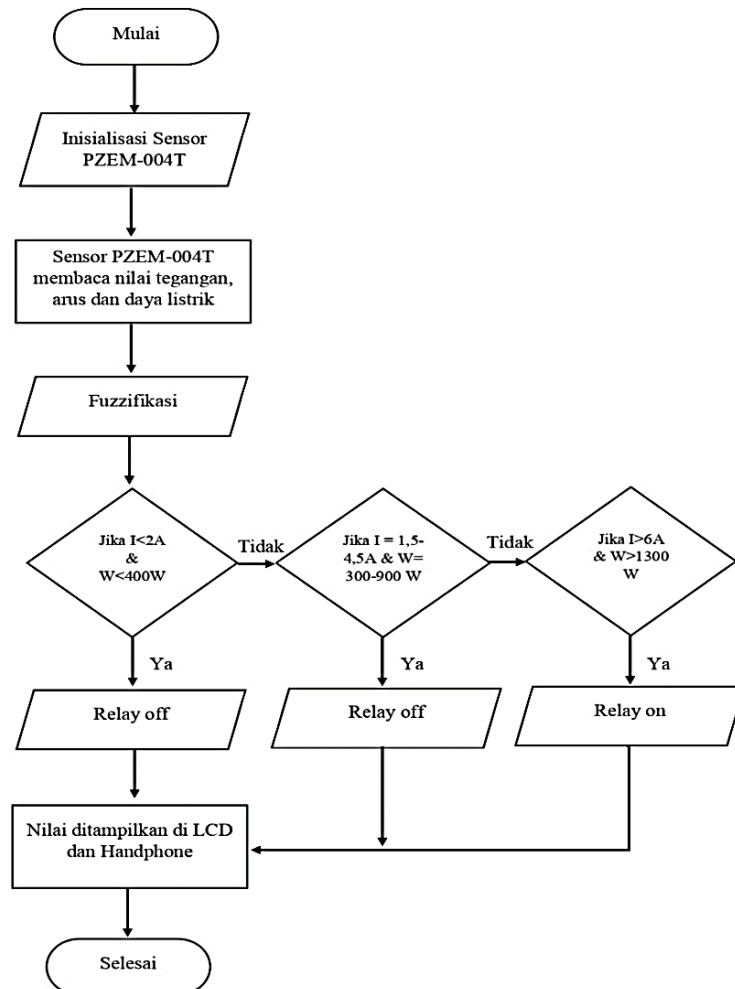
Arsitektur sistem ini memanfaatkan modul ESP32 sebagai unit pengendali inti. Unit pengukuran daya PZEM-004T berfungsi sebagai antarmuka akuisisi data, menangkap berbagai parameter kelistrikan termasuk besaran tegangan dan aliran arus. Proses pengolahan data dilakukan oleh engine inferensi fuzzy Mamdani yang menghasilkan keputusan kontrol cerdas. Implementasi tindakan kontrol dilakukan melalui modul relay yang berfungsi sebagai antarmuka aktuasi perangkat elektronik.

Untuk keperluan antarmuka lokal, panel *display* LCD 20x4 menyajikan informasi operasional secara *live*, dilengkapi dengan indikator akustik berupa buzzer yang aktif pada

kondisi abnormal. Konektivitas *cloud* terintegrasi memungkinkan akses dan pengendalian jarak jauh melalui platform *mobile*. Seluruh subsistem didukung oleh unit *power supply* yang telah melalui proses stabilisasi untuk menjamin performa sistem yang andal dan berkelanjutan.

2.4 Diagram Alir Alat Secara Keseluruhan

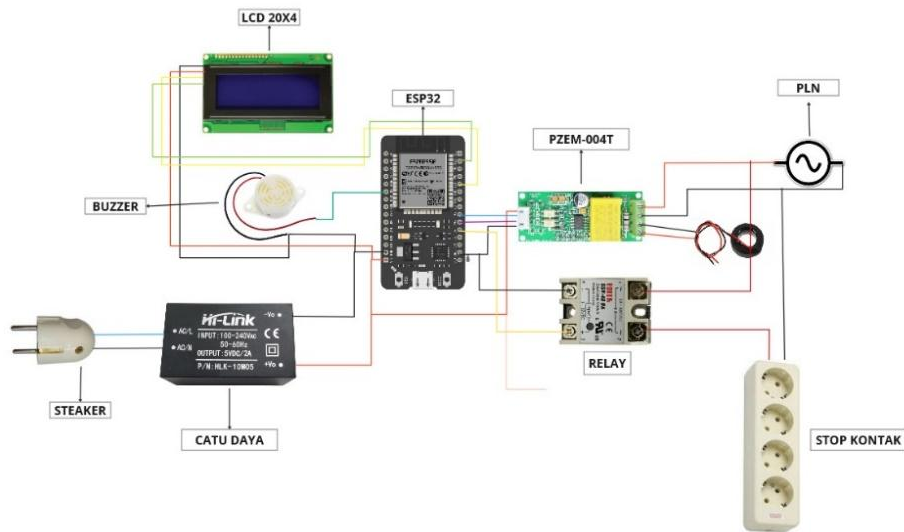
Diagram alir alat secara keseluruhan ditunjukkan pada gambar di bawah ini, yang menggambarkan seluruh proses dan alur kerja sistem dari awal hingga akhir.



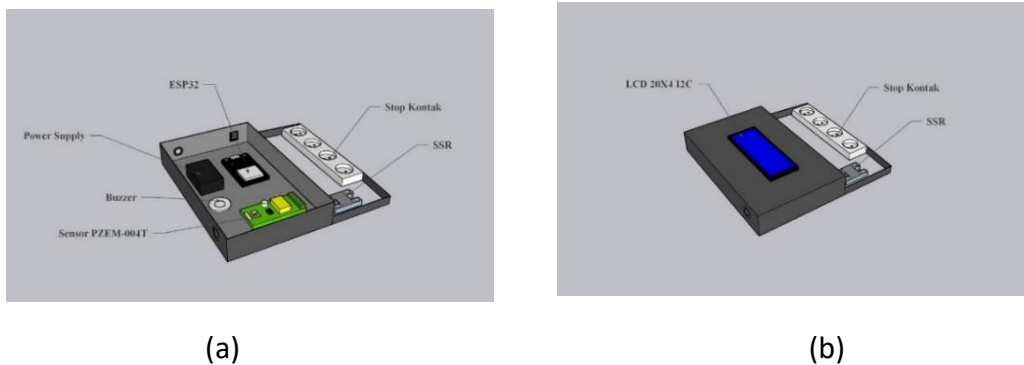
Gambar 2. Diagram Alir Alat Secara Keseluruhan

2.5 Rangkaian Alat Secara Keseluruhan

Berikut rangkaian alat secara keseluruhan yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini, yang menggambarkan hubungan antar komponen serta alur kerja sistem secara terintegrasi. Rangkaian ini memperlihatkan keterkaitan antara mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemrosesan utama, sensor PZEM-004T sebagai perangkat akuisisi data kelistrikan, relay sebagai pengendali beban, serta modul pendukung lainnya yang berfungsi menunjang proses monitoring dan pengendalian konsumsi energi listrik berbasis *Internet of Things (IoT)*.



Gambar 3. Rangkaian Alat Secara Keseluruhan



(a)

(b)

Gambar 4. Gambar 3D (a) Bagian Dalam Alat dan (b) Tampilan Luar Alat Secara Keseluruhan

2.5 Fuzzy Mamdani

Metode Mamdani, yang dikenal pula sebagai metode Max-Min, pertama kali dikembangkan oleh Ebrahim Mamdani pada tahun 1975. Proses pengolahan data menggunakan model Mamdani melibatkan beberapa tahapan utama, yaitu formulasi himpunan fuzzy, aplikasi fungsi implikasi, dan proses inferensi. Pada tahap formulasi himpunan fuzzy, variabel masukan maupun keluaran diklasifikasikan ke dalam satu atau lebih kelompok fuzzy untuk merepresentasikan rentang nilai yang mungkin. Selanjutnya, pada tahap aplikasi fungsi implikasi, metode ini menerapkan fungsi implikasi minimum (min) dalam proses pengambilan keputusan fuzzy. Tahap berikutnya adalah proses inferensi, di mana berbeda dengan logika konvensional, sistem dengan multi-aturan menghasilkan kesimpulan melalui integrasi dan relasi antar seluruh aturan yang ada. Perhitungan Defuzzifikasi dari Fuzzy Mamdani:

$$Z^* = \frac{\alpha_{nyala}}{\alpha_{nyala} + \alpha_{mati}} \quad (1)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Representasi Data

1) Fuzzifikasi

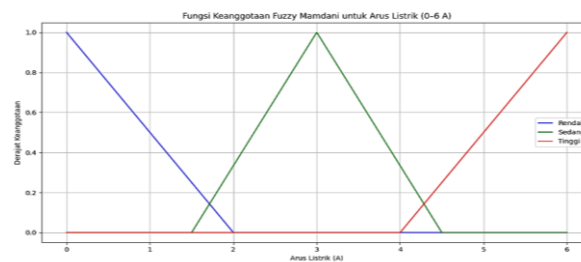
Dalam paradigma sistem logika fuzzy, domain merepresentasikan rentang nilai numerik (*input/output*) yang akan ditransformasi menjadi variabel fuzzy. Nilai-nilai yang terdapat dalam domain tersebut selanjutnya diklasifikasikan melalui mekanisme fungsi keanggotaan (*membership function*) yang menentukan derajat kebenaran (*degree of truth*) suatu nilai numerik terhadap kategori himpunan fuzzy tertentu.

Tabel 1. Domain Fuzzy Arus dan Daya pada Listrik Rumah Tangga

No.	Variabel	Himpunan Fuzzy	Semesta Pembicara	Domain
1	Arus Listrik	Rendah	[0 6 A]	[0 0 2 A]
		Sedang		[1,5 3 4,5 A]
		Tinggi		[4 6 6 A]
		Rendah		[0 0 400 W]
2	Daya Listrik	Sedang	[0 1300 W]	[250 600 850 W]
		Tinggi		[800 1300 1300 W]

a. Fuzzy Arus Listrik

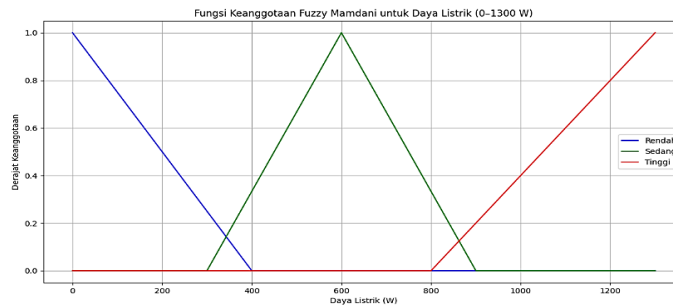
Pada fungsi keanggotaan *input* (masukan) sensor PZEM-004T untuk variabel arus listrik, grafik di bawah ini menggunakan tiga jenis fungsi keanggotaan, yaitu representasi naik, representasi turun, dan kurva segitiga. Ketiga fungsi tersebut digunakan untuk memodelkan perubahan nilai arus secara bertahap dari kondisi rendah ke tinggi sehingga dapat merepresentasikan karakteristik data sensor secara lebih fleksibel.



Gambar 5. Fuzzy Keanggotaan Arus Listrik

b. Fuzzy Daya Listrik

Pada fungsi keanggotaan *input* (masukan) sensor PZEM-004T untuk variabel daya listrik, grafik yang ditunjukkan pada gambar di atas menggunakan tiga jenis fungsi keanggotaan, yaitu fungsi keanggotaan naik, fungsi keanggotaan turun, dan fungsi keanggotaan berbentuk kurva segitiga. Ketiga fungsi keanggotaan tersebut digunakan untuk merepresentasikan kondisi daya listrik pada tingkat rendah, sedang, dan tinggi sebagai dasar proses inferensi pada metode Fuzzy Mamdani.



Gambar 6. Fuzzy Keanggotaan Daya Listrik

2) Penentuan Basis Aturan Fuzzy

Dalam implementasi sistem IoT untuk monitoring dan pengamanan kelistrikan rumah tangga berbasis metode fuzzy Mamdani, digunakan sembilan aturan fuzzy sebagai dasar pengambilan keputusan. Kondisi *relay* diatur pada posisi OFF ketika kombinasi beban berada pada level rendah, yaitu pada kondisi Rendah–Rendah, Rendah–Sedang, Sedang–Rendah, dan Tinggi–Rendah. Sebaliknya, *relay* akan diaktifkan (ON) saat terjadi peningkatan beban, yaitu pada kondisi Rendah–Tinggi, Sedang–Sedang, Sedang–Tinggi, Tinggi–Sedang, dan Tinggi–Tinggi.

3) Komposisi Aturan

Pada implementasi konsumsi energi listrik perabotan rumah tangga berbasis IoT menggunakan ESP-32, sensor PZEM-004T, dan fuzzy mamdani untuk mendapatkan nilai α -predikat dengan menggunakan fungsi implikasi MIN pada setiap *rule*. Selanjutnya nilai masing-masing α -predikat tersebut digunakan untuk menghitung *output* (keluaran) hasil inferensi pada masing-masing rule ($z_1, z_2, z_3, \dots, z_n$) secara *crisp* (tegas). Pada hasil pengukuran arus 1 A dan daya 220 W maka di dapat komposisi *rule* berikut ini:

a. IF arus = rendah AND daya = rendah THEN relay = Matikan

$$\begin{aligned}\alpha\text{-predikat}_1 &= \mu_{\text{Rendah}} \cap \mu_{\text{Rendah}} \\ &= \min(\mu_{\text{Rendah}}[1], \mu_{\text{Rendah}}[220]) \\ &= \min(0,5;0,45) \\ &= 0,45\end{aligned}$$

b. IF arus = rendah AND daya = sedang THEN relay = Matikan

$$\begin{aligned}\alpha\text{-predikat}_2 &= \mu_{\text{Rendah}} \cap \mu_{\text{Sedang}} \\ &= \min(\mu_{\text{Rendah}}[1], \mu_{\text{Sedang}}[220]) \\ &= \min(0,5;0) \\ &= 0\end{aligned}$$

c. IF arus = rendah AND daya = tinggi THEN relay = Nyalakan

$$\begin{aligned}\alpha\text{-predikat}_3 &= \mu_{\text{Rendah}} \cap \mu_{\text{Tinggi}} \\ &= \min(\mu_{\text{Rendah}}[1], \mu_{\text{Tinggi}}[220]) \\ &= \min(0,5;0) \\ &= 0\end{aligned}$$

d. IF arus = sedang AND daya = rendah THEN relay = Matikan

$$\alpha\text{-predikat}_4 = \mu_{\text{Sedang}} \cap \mu_{\text{Rendah}}$$

$$\begin{aligned}
 &= \min (\mu_{\text{Sedang}} [1], \mu_{\text{Rendah}} [220]) \\
 &= \min (0;0,45) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

e. IF arus = sedang AND daya = sedang THEN relay = Nyalakan

$$\begin{aligned}
 \alpha\text{-predikat}_5 &= \mu_{\text{Sedang}} \cap \mu_{\text{Sedang}} \\
 &= \min (\mu_{\text{Sedang}} [1], \mu_{\text{Sedang}} [220]) \\
 &= \min (0;0) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

f. IF arus = sedang AND daya = tinggi THEN relay = Nyalakan

$$\begin{aligned}
 \alpha\text{-predikat}_6 &= \mu_{\text{Sedang}} \cap \mu_{\text{Tinggi}} \\
 &= \min (\mu_{\text{Sedang}} [1], \mu_{\text{Tinggi}} [220]) \\
 &= \min (0;0) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

g. IF arus = tinggi AND daya = rendah THEN relay = Matikan

$$\begin{aligned}
 \alpha\text{-predikat}_7 &= \mu_{\text{Tinggi}} \cap \mu_{\text{Rendah}} \\
 &= \min (\mu_{\text{Tinggi}} [1], \mu_{\text{Rendah}} [220]) \\
 &= \min (0;0,45) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

h. IF arus = tinggi AND daya = sedang THEN relay = Nyalakan

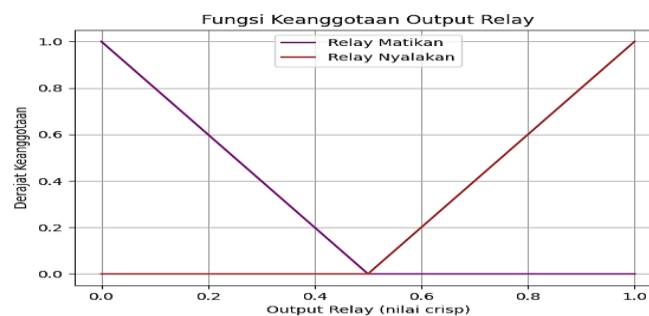
$$\begin{aligned}
 \alpha\text{-predikat}_8 &= \mu_{\text{Tinggi}} \cap \mu_{\text{Sedang}} \\
 &= \min (\mu_{\text{Tinggi}} [1], \mu_{\text{Sedang}} [220]) \\
 &= \min (0;0) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

i. IF arus = tinggi AND daya = tinggi THEN relay = Nyalakan

$$\begin{aligned}
 \alpha\text{-predikat}_9 &= \mu_{\text{Tinggi}} \cap \mu_{\text{Tinggi}} \\
 &= \min (\mu_{\text{Tinggi}} [1], \mu_{\text{Tinggi}} [220]) \\
 &= \min (0;0) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

4) Defuzzifikasi

Gambar di bawah ini menunjukkan fungsi keanggotaan dari hasil keluaran fuzzy.



Gambar 7. Output Fuzzy

Maka, α -predikat tertinggi = 0,45 dan *Output* aktif hanya *relay* = Matikan, keputusan sistem relay mati dari pengukuran arus 1 A dan daya 220 W.

3.2 Hasil Pengujian

1) Pengukuran Tegangan Elektrik

Pengujian tegangan listrik merupakan prosedur penting dalam evaluasi keandalan dan keselamatan perangkat elektronik serta sistem kelistrikan. Pengujian ini dilakukan untuk memverifikasi bahwa komponen atau perangkat dapat menahan tegangan nominal yang ditetapkan serta menentukan batas tegangan maksimal sebelum terjadi kegagalan atau kerusakan. Melalui pengujian tegangan listrik yang sistematis, dapat dipastikan bahwa perangkat memenuhi standar keselamatan internasional dan siap untuk digunakan dalam aplikasi praktis.

Tabel 2. Pengujian Tegangan Listrik rumah Tangga

No.	Tegangan Sensor PZEM-004T (V)	Tegangan Multimeter (V)	Persentase Kesalahan (%)
1	220,00	220,3	0,13
2	220,10	220,3	0,09
3	220,00	220,3	0,13
4	220,10	220,3	0,09
5	220,00	220,3	0.13

Data dari kelima pengujian menunjukkan bahwa pembacaan multimeter digital tetap konsisten di angka 220,3 V, sementara sensor PZEM-004T berfluktuasi antara 220,00 V dan 220,10 V. Persentase kesalahan pengukuran berkisar antara 0,09% hingga 0,13%, dengan rata-rata kesalahan sebesar 0,114%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor PZEM-004T memiliki tingkat akurasi yang sangat baik dalam mengukur tegangan listrik. Persentase kesalahan yang diperoleh berkisar antara 0,09% hingga 0,13%, jauh di bawah toleransi kesalahan maksimal yang umumnya diterima untuk alat ukur kelistrikan industri yang biasanya berkisar antara 0,5% hingga 2%. Konsistensi pembacaan multimeter pada 220,3 V menunjukkan bahwa alat ini memiliki stabilitas yang baik sebagai alat referensi. Fluktuasi kecil pada pembacaan sensor PZEM-004T antara 220,00 V dan 220,10 V masih dalam batas toleransi dan dapat disebabkan oleh *noise* atau variasi tegangan AC yang alami.

2) Pengujian Arus dan Daya

Pengujian arus dan daya dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sensor PZEM-004T dalam mengukur parameter kelistrikan tambahan selain tegangan. Pengujian ini penting karena sensor PZEM-004T dirancang sebagai alat pengukur satu fase yang dapat mengukur tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, faktor daya, dan energi yang dikonsumsi. Dengan melakukan pengujian arus dan daya, dapat diverifikasi apakah sensor ini memberikan pembacaan yang akurat untuk semua parameter kelistrikan yang ditampilkan.

Tabel 3. Pengujian Arus dan Daya Kipas Angin, Pemanas dan Lem Tembak

No.	Sensor PZEM-004T		Tang Ampere		Persentase Kesalahan (%)	
	Arus (A)	Daya (W)	Arus (A)	Daya (W)	Arus	Daya
1	0,36	76,50	0,36	76,30	0	0,26
2	0,36	76,50	0,36	76,30	0	0,26
3	0,36	76,50	0,36	76,30	0	0,26

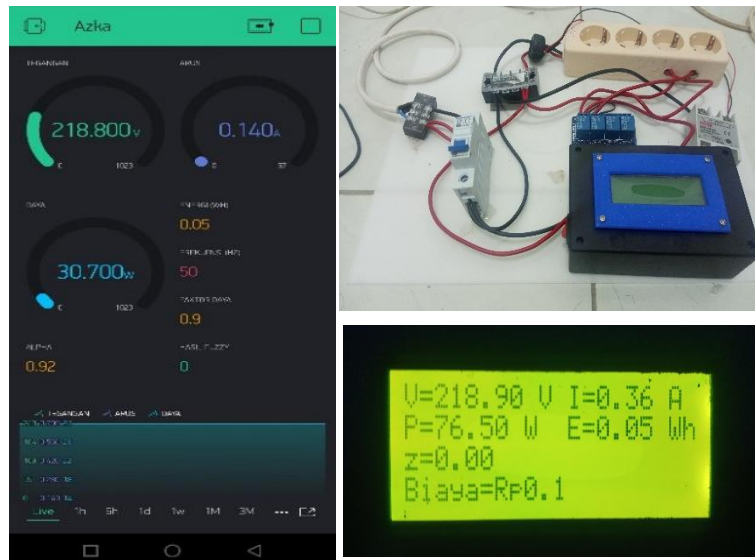
Pengujian arus dan daya pada kipas angin, pemanas, dan lem tembak dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor PZEM-004T terhadap tang ampere sebagai alat referensi. Hasil pengujian dari tiga kali pengulangan menunjukkan data yang konsisten, di mana sensor PZEM-004T mencatat arus sebesar 0,36 A dan daya sebesar 76,50 W, sedangkan tang ampere menunjukkan arus sebesar 0,36 A dan daya sebesar 76,30 W. Persentase kesalahan yang diperoleh adalah 0% untuk pengukuran arus dan 0,26% untuk pengukuran daya, yang masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima. Konsistensi hasil pada setiap pengulangan menunjukkan bahwa sensor PZEM-004T memiliki tingkat akurasi yang baik dan dapat diandalkan untuk pengukuran arus dan daya pada beban kipas angin, pemanas, dan lem tembak.

3) Pengujian Biaya Pemakaian Listrik

Pengujian dilakukan pada perangkat penyolder 30 W untuk memvalidasi akurasi sistem dan menghasilkan informasi biaya energi. Data monitoring menunjukkan hubungan linear antara durasi penggunaan dengan energi dan biaya operasional, di mana perangkat 30 W mengkonsumsi 1 Wh per 2 menit dengan biaya operasional Rp 1,47 per 2 menit, sehingga dapat digunakan sebagai referensi dalam perencanaan anggaran energi rumah tangga.

4) Pengujian Platform IoT

Implementasi teknologi *Internet of Things* (IoT) menggunakan platform Blynk dirancang untuk melakukan pemantauan *real-time* terhadap karakteristik kelistrikan rumah tangga, meliputi tegangan, arus, daya, energi, faktor daya, dan frekuensi. Penelitian ini memanfaatkan sensor PZEM-004T sebagai instrumen pengakuisisi data pengukuran secara langsung dan akurat. Informasi yang dikumpulkan oleh sensor selanjutnya ditransmisikan ke aplikasi Blynk melalui konektivitas *Wi-Fi*, sehingga memberikan kemudahan akses monitoring dari lokasi mana pun. Platform Blynk menyediakan antarmuka visualisasi berbentuk grafik interaktif yang menampilkan semua parameter kelistrikan untuk setiap fase secara terperinci. Visualisasi grafis ini memfasilitasi pengguna dalam melakukan analisis performa sistem kelistrikan secara cepat dan efektif, sekaligus memudahkan deteksi dini terhadap anomali atau gangguan pada sistem. Dengan pendekatan IoT berbasis Blynk, proses pemantauan sistem kelistrikan menjadi lebih efisien, terintegrasi, dan *user-friendly*.



Gambar 8. Pengujian Platform IoT

4. KESIMPULAN

Hasil pengujian menunjukkan bahwa implementasi konsumsi energi listrik perabotan rumah tangga berbasis IoT menggunakan ESP-32, Sensor PZEM-004T, dan fuzzy mamdani telah berhasil dicapai dan berfungsi sesuai dengan parameter yang ditetapkan. Arsitektur sistem IoT berbasis logika fuzzy Mamdani berhasil dirancang menggunakan ESP32, sensor PZEM-004T, platform Blynk, dan relay SSR. Sistem mampu melakukan monitoring energi listrik secara *real-time* dengan tingkat akurasi yang baik. Mekanisme kontrol berbasis fuzzy Mamdani berhasil diimplementasikan melalui integrasi ESP32, PZEM-004T, dan *relay*. Keputusan ON/OFF *relay* sesuai dengan hasil inferensi fuzzy dan perhitungan manual. Sistem mampu mendeteksi kondisi standby power serta menghitung dan menampilkan biaya pemakaian listrik secara *real-time* melalui LCD dan aplikasi IoT, sehingga membantu pengguna mengontrol konsumsi energi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. C. Adi, "Konsumsi Listrik Masyarakat Meningkat, Tahun 2023 Capai 1.285 kWh/Kapita," kementerian ESDM. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/konsumsi-listrik-masyarakat-meningkat-tahun-2023-capai-1285-kwh-kapita>
- [2] Andrianto bala, Cindy P.C Munaiseche, Kristofel Santa, "Sistem Kontrol Alat Pengukur Berbasis IoT Menggunakan Fuzzy Tsukamoto Dipertenakan Ayam Broiler Desa Tonsea Lama," *JOINTER J. Informatics Eng.*, vol. 3, no. 02, pp. 24–35, 2022, doi: 10.53682/jointer.v3i02.71.
- [3] M. A. Rofiq *et al.*, "Implementasi Logika Fuzzy Terhadap Kontrol dan Monitoring Pada Konsumsi Energi Listrik Rumah Tangga," *J. Teknol. Elektro*, vol. 15, no. 1, p. 47, 2024, doi: 10.22441/jte.2024.v15i1.008.

- [4] W. F. Zalmi, D. Pang, and M. K. Nurgraha, "Prediksi Biaya Pemakaian Listrik Dengan Metode Logika Fuzzy Mamdani," *Informatika*, vol. 12, no. 3, pp. 609–619, 2024, doi: 10.36987/informatika.v12i3.6337.
- [5] A. Setiawan, B. Yanto, and K. Yasdomi, *A. Setiawan and U. P. Pengaraian, Penyakit Bayi dengan Fuzzy Tsukamoto*, no. March. 2018.
- [6] Y. Efendi, "Internet Of Things (Iot) Sistem Pengendalian Lampu Menggunakan Raspberry Pi Berbasis Mobile," *J. Ilm. Ilmu Komput.*, vol. 4, no. 2, pp. 21–27, 2018, doi: 10.35329/jiik.v4i2.41.
- [7] I. Syukhron, "Penggunaan Aplikasi Blynk untuk Sistem Monitoring dan Kontrol Jarak Jauh pada Sistem Kompos Pintar berbasis IoT," *Electrician*, vol. 15, no. 1, pp. 1–11, 2021, doi: 10.23960/elc.v15n1.2158.
- [8] A. A. SHELEMO, "Sistem Monitoring Daya Listrik Internet Of Things (IoT) Menggunakan Algoritma Fuzzy Logic Sugeno Dan Firebase Berbasis Android," Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah, 2023.
- [9] S. U. Filla and S. Suhardi, "Prototype Alat Pengatur Temperatur Ruang Kerja Pada Rumah Menggunakan Logika Fuzzy Tsukamoto Berbasis Iot," *J. Sci. Soc. Res.*, vol. 7, no. 1, pp. 68–77, 2024.
- [10] R. T. Budiyaniti, *Buku Ajar Internet of Things*. 2021.
- [11] M. F. Nasution, "Rancang Bangun Monitoring Daya Listrik Rumah Tinggal Interface Android," *J. Energi Elektr.*, vol. 4, pp. 20–24, 2023, [Online]. Available: <https://repositori.uma.ac.id/handle/123456789/20183%0Ahttps://repositori.uma.ac.id/jspui/bitstream/123456789/20183/1/168120025>
- [12] A. B. Pramudha, "Aplikasi Android Monitoring Suhu dan Kelembaban Ruangan Berbasis Internet of Things (IoT) Menggunakan Logika Fuzzy," *Resist. (Elektronika Kendali Telekomun* vol. 7, no. 2, pp. 85–92, 2024, [Online]. Available: <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/resistor/article/view/21767%0Ahttps://jurnal.umj.ac.id/index.php/resistor/article/download/21767/11412>
- [13] A. Ardiansyah, "Monitoring Daya Listrik Berbasis IoT (Internet of Things)," *Univ. Islam Indones.*, 2020, [Online]. Available: <https://dspace.uui.ac.id/handle/123456789/23561>
- [14] A. Yohandrik, B. Dawe, P. Dani, and P. Adi, "Electricity Monitoring System based on Fuzzy Logic and Internet of things," vol. 01, 2021, doi: 10.31763/iota.v1i2.459.
- [15] F. R. Hariri, "Penerapan Metode Fuzzy Sugeno Dalam Pendaftaran Siswa Baru di SDN Sonopatik 1 Nganjuk," *Tek. Inform. Univ. Nusantara PGRI Kediri*, vol. 3, no. 1, pp. 41–46, 2016, [Online]. Available: Penerapan Metode Fuzzy Sugeno Dalam Pendaftaran Siswa Baru di SDN Sonopatik 1 Nganjuk
- [16] M. Mehta, "ESP8266 : A Breakthrough in Wireless Sensor Networks and Internet of Things," *Int. J. Electron. Commun. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 8, pp. 7–11, 2015, [Online]. Available: www.iaeme.com/IJECET/index.asp
- [17] S. Nirwan and M. S. Hafidz, "Rancang Bangun Aplikasi untuk Prototipe Sistem Monitoring Konsumsi Energi Listrik pada Peralatan Elektronik Berbasis PZEM-004T," *J. Tek. Inform.*, vol. 12, no. 2, pp. 79–84, 2020, [Online]. Available: <https://ejurnal.ulbi.ac.id/index.php/informatika/article/view/871%0Ahttps://ejurnal.ulbi.ac.id/index.php/informatika/article/view/871/657>

- [18] C. Danuputri, L. Hakim, W. S. Susilo, and F. D. Samuel, "Kontrol Pemakaian Peralatan Elektronik Berbasis Mikrokontroler Dan Algoritma Fuzzy Mamdani," *J. Resist. (Rekayasa Sist. Komputer)*, vol. 3, no. 2, pp. 94–107, 2020, doi: 10.31598/jurnalresistor.v3i2.646.
- [19] K. I. Listyoningrum, D. Y. Ferida, and N. Hamidi, "Inovasi Berkelanjutan dalam Bisnis: Manfaatkan Flowchart untuk Mengoptimalkan Nilai Limbah Perusahaan," *J. Inf. Pengabd. Masy.*, vol. 1, no. 4, pp. 100–112, 2023.
- [20] S. Anwar, T. Artono, and J. Teknik Elektro Politeknik Negeri Padang, "Pengukuran Energi Listrik Berbasis PZEM-004T," *Proceeding Semin. Nas. Politek. Negeri Lhokseumawe*, vol. 3, no. 1, pp. 1–5, 2019.
- [21] Soni, M. Jannah, and Y. Fatma, "Sistem Notifikasi Token Listrik Menggunakan Metode Fuzzy Tsukamoto Dengan Sms Gateway Berbasis Arduino," *J. CoSciTech (Computer Sci. Inf. Technol.)*, vol. 4, no. 1, pp. 226–234, 2023, doi: 10.37859/coscitech.v4i1.4839.
- [22] U. M. Area, "Simulator Sistem Otomatisasi Dengan Solid State Relay Untuk Pertukaran Sumber Energi Listrik Antara Pln Dan Genset Laporan ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat kelulusan menempuh pendidikan program Sarjana Program Studi Teknik Elektro Disusun oleh," 2017.
- [23] A. Anggito, "Sistem Deteksi Kebocoran Gas LPG di Rumah Berbasis Internet Of Things," *Ejournal Univ. Teknol. Digit. Indones.*, pp. 2–3, 2021.