

VOLTIFY: SISTEM PENDUKUNG KEPUTUSAN MONITORING DAN MANAJEMEN KONSUMSI LISTRIK RUMAH TANGGA BERBASIS WEB MENGGUNAKAN METODE FUZZY LOGIC

Abidzar Sabil Handoyo, Alvin Alfandy, Ridho Fauzi

Teknik Informatika, Universitas Pelita Bangsa

Jalan Inpeksi Kalimalang No.9, Cibatu, Cikarang Selatan, Bekasi, Jawa Barat, Indonesia

abidzarsabil05@gmail.com

ABSTRAK

Konsumsi listrik rumah tangga di Indonesia terus meningkat, namun meteran konvensional hanya menampilkan total pemakaian tanpa rincian per perangkat, sehingga menyulitkan identifikasi perangkat boros energi dan menghambat upaya penghematan secara efektif. Penelitian ini mengembangkan Voltify, sebuah aplikasi web sistem pendukung keputusan yang memanfaatkan metode *Fuzzy Logic* untuk mengklasifikasikan tingkat konsumsi energi perangkat listrik rumah tangga. Pengguna memasukkan data berupa daya perangkat (W) dan durasi penggunaan (jam/hari), kemudian sistem menghitung konsumsi energi (kWh), biaya harian, serta melakukan klasifikasi ke dalam kategori Hemat, Normal, atau Boros. Hasil pengujian menunjukkan sistem berhasil menghasilkan keluaran akurat: AC 750 W selama 8 jam diklasifikasikan Boros (78% *confidence*), kulkas 150 W selama 24 jam Normal (85%), lampu LED 10 W selama 5 jam Hemat (92%), dan perangkat lain menunjukkan konsistensi klasifikasi. Sistem juga mampu menampilkan *dashboard* statistik mingguan, grafik konsumsi, total biaya, dan estimasi bulanan. Dengan pendekatan *Fuzzy Logic*, Voltify membantu pengguna mengidentifikasi perangkat boros energi serta memungkinkan penghematan biaya listrik secara signifikan. Aplikasi dibangun menggunakan React.js dan Vite untuk *frontend*, Node.js dan Express.js untuk *backend*, serta MongoDB sebagai *database*.

Kata kunci : *Fuzzy Logic, Monitoring Energi, Web App, Manajemen Listrik, Smart Home, Decision Support System.*

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan konsumsi listrik rumah tangga di Indonesia terus mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya jumlah dan variasi perangkat elektronik yang digunakan dalam aktivitas sehari-hari. Sektor rumah tangga diketahui menjadi salah satu kontributor utama konsumsi listrik nasional, sehingga pengelolaan energi pada sektor ini menjadi isu strategis dalam upaya efisiensi energi dan pengurangan pemborosan listrik [1]. Namun, rendahnya kesadaran masyarakat terhadap pola penggunaan listrik menyebabkan terjadinya konsumsi berlebih yang berdampak langsung pada peningkatan biaya listrik bulanan.

Permasalahan utama yang dihadapi pengguna listrik rumah tangga adalah keterbatasan informasi detail mengenai konsumsi energi per perangkat. Sistem meteran listrik konvensional umumnya hanya menampilkan total pemakaian listrik tanpa memberikan informasi spesifik terkait kontribusi masing-masing perangkat elektronik [2]. Kondisi ini menyulitkan pengguna dalam mengidentifikasi perangkat yang paling boros energi serta menghambat upaya pengendalian konsumsi listrik secara efektif.

Perkembangan teknologi informasi, khususnya aplikasi berbasis web dan *Internet of Things (IoT)*, membuka peluang untuk menghadirkan sistem monitoring energi yang lebih informatif dan mudah diakses. Aplikasi web memiliki keunggulan dalam hal aksesibilitas lintas perangkat, kemudahan penggunaan, serta tidak memerlukan instalasi khusus

di sisi pengguna [3]. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa sistem monitoring energi berbasis web dan *IoT* mampu meningkatkan kesadaran pengguna terhadap pola konsumsi listrik dan membantu pengambilan keputusan yang lebih tepat dalam pengelolaan energi [4].

Dalam konteks pengambilan keputusan, metode *Fuzzy Logic* banyak digunakan karena kemampuannya menangani ketidakpastian dan variasi data konsumsi energi yang bersifat dinamis [6]. Berbeda dengan metode *threshold* konvensional yang bersifat biner (ya/tidak), *Fuzzy Logic* mampu merepresentasikan kondisi antara dengan derajat keanggotaan yang bersifat kontinu, sehingga lebih sesuai untuk memodelkan pola konsumsi listrik yang tidak selalu memiliki batas tegas. Keunggulan *Fuzzy Logic* antara lain: (1) mampu menangani nilai linguistik seperti “hemat”, “normal”, dan “boros” secara komputasional; (2) tidak memerlukan model matematika yang kompleks dari sistem yang dikendalikan; (3) robust terhadap noise dan ketidakpastian data input; serta (4) mudah dipahami dan diinterpretasikan oleh pengguna awam. Pendekatan ini memungkinkan sistem untuk mengklasifikasikan tingkat konsumsi listrik secara lebih fleksibel dengan mempertimbangkan derajat keanggotaan pada setiap kategori [5].

Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan sebuah aplikasi web sistem pendukung keputusan bernama Voltify, yang memanfaatkan metode *Fuzzy Logic* untuk mengklasifikasikan konsumsi listrik

rumah tangga ke dalam kategori hemat, normal, atau boros berdasarkan parameter daya perangkat dan durasi penggunaan.

Tujuan dari penelitian ini adalah merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring dan manajemen konsumsi listrik rumah tangga berbasis web yang mampu menampilkan informasi konsumsi secara terperinci, menghitung estimasi biaya pemakaian, serta memberikan klasifikasi dan rekomendasi penggunaan listrik secara cerdas menggunakan *Fuzzy Logic*. Sistem ini dapat membantu pengguna dalam mengoptimalkan penggunaan energi, menekan biaya listrik, serta mendukung gaya hidup hemat energi dan ramah lingkungan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Monitoring Energi Berbasis IoT dan Web

Sistem monitoring energi merupakan solusi teknologi yang dirancang untuk memantau, mengukur, dan menganalisis konsumsi energi listrik secara *real-time* maupun periodik guna meningkatkan efisiensi penggunaan energi [1]. Implementasi sistem monitoring berbasis *IoT* memungkinkan pengambilan data konsumsi listrik secara otomatis dan terintegrasi dengan aplikasi web sebagai media visualisasi dan kontrol.

Patil *et al.* mengembangkan *smart energy meter* berbasis *IoT* yang terhubung dengan aplikasi web untuk monitoring dan kontrol konsumsi energi, dan hasil penelitian menunjukkan peningkatan efisiensi penggunaan listrik pada rumah tangga [2]. Penelitian serupa dilakukan oleh Putra *et al.* yang mengembangkan sistem monitoring konsumsi energi rumah tangga terintegrasi internet, sehingga pengguna dapat mengakses data konsumsi listrik dari berbagai perangkat secara daring [3]. Selain itu, Narkhede *et al.* membuktikan bahwa integrasi monitoring energi dengan aplikasi mobile dan web mampu meningkatkan kesadaran pengguna terhadap pola pemakaian listrik [4].

2.2. Penerapan Fuzzy Logic dalam Manajemen Energi

Fuzzy Logic merupakan metode komputasi yang dirancang untuk menangani ketidakpastian dan data yang bersifat tidak pasti atau ambigu dengan menggunakan derajat keanggotaan [6]. Metode ini banyak diterapkan dalam sistem manajemen energi karena mampu memberikan keputusan yang lebih adaptif terhadap variasi konsumsi listrik.

Khajeh *et al.* menerapkan kontrol *Fuzzy Logic* pada smart home dengan sistem penyimpanan energi untuk mengelola daya aktif dan reaktif secara fleksibel, dengan hasil peningkatan efisiensi energi yang signifikan [6]. Acun dan Çunkaş mengembangkan sistem manajemen energi rumah berbiaya rendah berbasis *Fuzzy Logic* yang terbukti efektif dalam mengoptimalkan konsumsi energi [7].

Krishna dan Gupta juga menerapkan *Fuzzy Logic* dalam *smart home energy management system* untuk mengklasifikasikan pola penggunaan energi berdasarkan parameter yang bervariasi [8].

Selain itu, Tsampasis *et al.* mengembangkan sistem kontrol *fuzzy* untuk manajemen energi pada bangunan residensial berbasis data lingkungan, yang menunjukkan peningkatan efisiensi energi secara optimal [9]. Berbagai penelitian tersebut menunjukkan bahwa *Fuzzy Logic* sangat efektif digunakan sebagai metode pendukung keputusan dalam sistem manajemen energi rumah tangga.

2.3. Teknologi Web dan Database

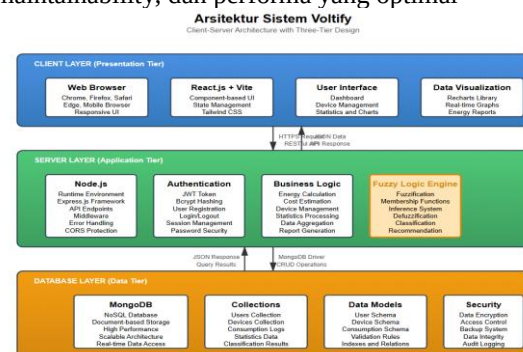
Pemilihan teknologi web dan *database* berperan penting dalam menentukan performa dan skalabilitas sistem monitoring energi. Karimi *et al.* melakukan perbandingan performa *database* NoSQL *real-time* dan menunjukkan keunggulan NoSQL dalam menangani data yang bersifat dinamis dan *real-time* [10]. Cissy dan Thomas juga membandingkan performa MongoDB dan MySQL, dan menyimpulkan bahwa MongoDB lebih sesuai untuk aplikasi *real-time* dengan kebutuhan skalabilitas tinggi [11].

Dari sisi keamanan aplikasi web, Bucko dan Leka meneliti peningkatan mekanisme autentikasi dan otorisasi berbasis *JSON Web Token (JWT)* untuk meningkatkan keamanan sistem [12]. Auth0 juga menyediakan panduan implementasi *JWT* sebagai standar autentikasi yang aman dan efisien pada aplikasi web modern [13]. Dalam konteks sistem energi pintar, Kharel *et al.* mengembangkan *smart energy management system* berbasis *IoT* yang mendukung monitoring *real-time* dan deteksi pencurian listrik [14]. Jain *et al.* mengombinasikan *Fuzzy Logic* dengan *reinforcement learning* untuk mengoptimalkan manajemen energi dan meminimalkan biaya listrik rumah tangga [15].

3. METODE PENELITIAN

3.1. Arsitektur Sistem

Sistem Voltify dikembangkan menggunakan arsitektur *client-server* dengan pola *three-tier* architecture yang memisahkan lapisan presentasi, logika aplikasi, dan penyimpanan data secara jelas. Arsitektur ini dipilih untuk memastikan skalabilitas, maintainability, dan performa yang optimal



Gambar 1. Arsitektur sistem voltify

Dari Gambar 1 dapat dilihat bahwa sistem terbagi menjadi tiga lapisan utama. Lapisan pertama adalah *Client Layer (Presentation Tier)* yang dibangun menggunakan React.js dan Vite sebagai *frontend framework* dengan Tailwind CSS untuk *styling*. Lapisan ini menangani antarmuka pengguna yang responsif dan dapat diakses melalui berbagai web browser modern baik desktop maupun mobile. Komponen utama meliputi dashboard untuk menampilkan statistik konsumsi energi, *device management* untuk mengelola data perangkat elektronik, dan visualisasi data menggunakan *library Recharts* untuk menampilkan grafik konsumsi dalam bentuk *line chart*, *bar chart*, dan *pie chart*.

Lapisan kedua adalah *Server Layer (Application Tier)* yang berjalan di atas Node.js dengan Express.js *framework* untuk menangani RESTful API. Lapisan ini mengimplementasikan seluruh logika bisnis aplikasi termasuk autentikasi pengguna menggunakan *JWT (JSON Web Token)* dan *bcrypt* untuk *password hashing*, kalkulasi konsumsi energi dan biaya listrik, serta pemrosesan data statistik. Komponen kritis pada lapisan ini adalah *Fuzzy Logic Engine* yang melakukan klasifikasi konsumsi energi melalui tahapan *fuzzification* dengan *membership functions* untuk tiga kategori (*Low, Medium, High*), *inference system* untuk evaluasi derajat keanggotaan, *defuzzification* menggunakan metode *weighted average*, dan menghasilkan klasifikasi akhir serta rekomendasi penghematan energi yang adaptif.

Lapisan ketiga adalah *Database Layer (Data Tier)* menggunakan MongoDB sebagai *NoSQL database* untuk menyimpan data pengguna, perangkat elektronik, riwayat konsumsi, dan statistik agregat. MongoDB dipilih karena sifat *document-based storage* yang fleksibel, performa tinggi untuk operasi *real-time*, dan skalabilitas yang baik. *Database* terdiri dari empat *collections* utama yaitu *Users* untuk data pengguna, *Devices* untuk data perangkat elektronik, *Consumption Logs* untuk riwayat konsumsi harian, dan *Statistics* untuk agregasi data mingguan dan bulanan. Setiap *collection* dilengkapi dengan *validation rules*, *indexing* untuk optimasi *query*, dan *security measures* termasuk *encryption at rest* dan *access control*.

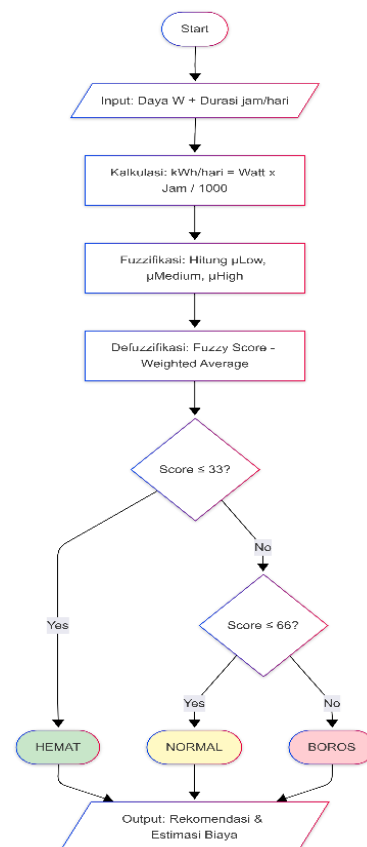
Komunikasi antar lapisan menggunakan protokol *HTTPS* untuk keamanan data dan *RESTful API* dengan format *JSON* untuk pertukaran data. Sistem juga terintegrasi dengan layanan eksternal seperti *email service* menggunakan *Nodemailer* untuk notifikasi pengguna, *cloud hosting* pada Vercel untuk *frontend* dan *Railway* untuk *backend*, serta *SSL certificate* dari *Let's Encrypt* untuk enkripsi koneksi. Arsitektur *three-tier* ini memastikan *separation of concerns* yang jelas sehingga memudahkan *maintenance*, pengembangan fitur baru, dan memungkinkan *scaling independen* pada setiap layer sesuai kebutuhan beban sistem.

3.2. Metode Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan metode pengumpulan data primer melalui observasi langsung terhadap konsumsi listrik perangkat elektronik rumah tangga. Data dikumpulkan dengan cara mencatat spesifikasi daya (Watt) dari 6 perangkat elektronik umum yang digunakan di rumah peneliti, yaitu AC, Kulkas, Lampu LED, TV LED, Mesin Cuci, dan Setrika. Durasi penggunaan harian masing-masing perangkat juga dicatat berdasarkan pola penggunaan aktual selama periode observasi. Data yang terkumpul kemudian digunakan sebagai input untuk pengujian sistem klasifikasi *Fuzzy Logic* dan validasi akurasi sistem. Metode pengumpulan data ini dipilih karena memberikan representasi nyata dari pola konsumsi listrik rumah tangga Indonesia dan memungkinkan validasi sistem dengan skenario penggunaan yang realistis.

3.3. Alur Proses Fuzzy Logic

Alur proses *Fuzzy Logic* pada sistem Voltify divisualisasikan dalam flowchart pada Gambar 2 berikut:



Gambar 2. Flowchart alur proses *Fuzzy Logic*

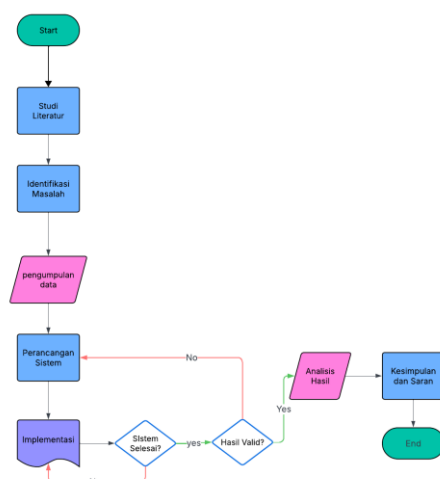
Dari Gambar 2 dapat dilihat bahwa proses *Fuzzy Logic* pada sistem Voltify berjalan melalui tujuh tahapan sebagai berikut:

- Input: Pengguna memasukkan data daya perangkat dalam satuan Watt (W) dan durasi penggunaan dalam satuan jam per hari (jam/hari).

- b. Kalkulasi Konsumsi Energi: Sistem menghitung nilai konsumsi energi harian menggunakan formula: $\text{kWh/hari} = \text{Watt} \times \text{Jam} / 1000$. Hasil kalkulasi ini menjadi nilai *crisp* input yang akan diproses pada tahap fuzzifikasi.
- c. Fuzzifikasi: Nilai kWh/hari dikonversi menjadi derajat keanggotaan (*membership degree*) pada tiga himpunan fuzzy, yaitu μ_{Low} , μ_{Medium} , dan μ_{High} , menggunakan fungsi keanggotaan yang telah didefinisikan pada masing-masing kategori.
- d. Defuzzifikasi: Nilai derajat keanggotaan diproses menggunakan metode *Weighted Average* untuk menghasilkan satu nilai *Fuzzy Score* dalam rentang 0 hingga 100.
- e. Keputusan $\text{Score} \leq 33$: Sistem mengevaluasi nilai *Fuzzy Score*. Jika nilai ≤ 33 , konsumsi diklasifikasikan sebagai HEMAT dan proses langsung menuju output.
- f. Keputusan $\text{Score} \leq 66$: Jika nilai $\text{Score} > 33$, sistem melanjutkan evaluasi kedua. Jika nilai ≤ 66 , konsumsi diklasifikasikan sebagai NORMAL. Jika nilai > 66 , konsumsi diklasifikasikan sebagai BOROS.
- g. Output: Berdasarkan hasil klasifikasi, sistem menampilkan rekomendasi penghematan energi yang adaptif beserta estimasi biaya listrik harian dan bulanan kepada pengguna.

3.4. Alur Penelitian

Seluruh tahapan penelitian divisualisasikan dalam flowchart pada Gambar 3 berikut:



Gambar 3. Flowchart alur penelitian

Dari Gambar 3 dapat dilihat bahwa penelitian dilaksanakan melalui delapan tahapan sistematis sebagai berikut:

- a. Studi Literatur: Melakukan review terhadap jurnal dan penelitian terkait sistem monitoring energi berbasis IoT dan web, penerapan Fuzzy Logic dalam manajemen energi, serta teknologi web modern untuk membangun landasan teoritis penelitian.

- b. Identifikasi Masalah: Menganalisis permasalahan konsumsi listrik rumah tangga, keterbatasan sistem meteran konvensional, dan kebutuhan akan sistem monitoring yang informatif dan mudah diakses.
- c. Pengumpulan Data: Melakukan observasi dan pencatatan data konsumsi perangkat elektronik rumah tangga sebagai data primer penelitian, mencakup spesifikasi daya dan durasi penggunaan harian.
- d. Perancangan Sistem: Mendesain arsitektur sistem client-server, merancang database schema menggunakan MongoDB, dan mendefinisikan membership function untuk implementasi *Fuzzy Logic* dengan tiga kategori (Hemat, Normal, Boros).
- e. Implementasi: Membangun frontend menggunakan React.js dan Vite, mengembangkan backend dengan Node.js dan Express.js, mengimplementasikan algoritma *Fuzzy Logic* untuk klasifikasi konsumsi energi, serta mengintegrasikan keseluruhan komponen sistem.
- f. Pengujian Sistem: Melakukan blackbox testing terhadap seluruh fungsionalitas sistem, menguji akurasi klasifikasi *Fuzzy Logic* dengan empat skenario konsumsi berbeda, dan mengukur performa sistem meliputi *load time*, *API response time*, dan *fuzzy processing time*.
- g. Analisis Hasil: Mengevaluasi hasil pengujian sistem, menganalisis akurasi klasifikasi, menghitung potensi penghematan energi, dan membandingkan pendekatan *Fuzzy Logic* dengan metode threshold konvensional.
- h. Kesimpulan dan Saran: Menarik kesimpulan dari hasil penelitian dan memberikan saran untuk pengembangan sistem selanjutnya.

Penelitian dilakukan secara bertahap dan sistematis dengan pendekatan *waterfall* yang memastikan setiap tahapan diselesaikan dengan baik sebelum melanjutkan ke tahapan berikutnya. Metode ini dipilih untuk memastikan kualitas sistem yang dihasilkan dan validitas hasil penelitian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Implementasi Sistem

Sistem Voltify telah berhasil diimplementasikan dan dapat diakses melalui <https://www.voltify.my.id> dengan semua fitur yang direncanakan termasuk registrasi dan autentikasi pengguna, manajemen perangkat elektronik, kalkulasi konsumsi dan biaya, klasifikasi *fuzzy logic*, serta dashboard statistik. Halaman landing sistem menampilkan informasi utama tentang Voltify sebagai platform manajemen listrik pintar dengan *Fuzzy Logic* untuk mengklasifikasikan pola penggunaan dan memberikan rekomendasi hemat energi hingga 30%.

4.2. Proses Fuzzy Logic

Sistem Voltify mengimplementasikan metode *Fuzzy Logic* melalui empat tahapan utama. Tahap pertama adalah Fuzzifikasi (*Fuzzification*), yaitu proses mengubah nilai input *crisp* berupa konsumsi energi harian (kWh) menjadi nilai derajat keanggotaan (*membership degree*) pada himpunan *fuzzy* yang telah didefinisikan. Nilai input dihitung dari perkalian daya perangkat (W) dan durasi penggunaan (jam/hari) dibagi 1000. Input tersebut kemudian dipetakan ke dalam tiga fungsi keanggotaan: *Low* (Hemat), *Medium* (Normal), dan *High* (Boros), menggunakan fungsi keanggotaan trapesoid dan segitiga.

Tahap kedua adalah Pembentukan Basis Aturan (*Rule Base*), yaitu kumpulan aturan *IF-THEN* yang mendefinisikan hubungan antara input dan output *fuzzy*. Basis aturan pada Voltify mencakup tiga aturan utama: (1) *IF* konsumsi *Low* *THEN* kategori Hemat dengan bobot 20; (2) *IF* konsumsi *Medium* *THEN* kategori Normal dengan bobot 50; (3) *IF* konsumsi *High* *THEN* kategori Boros dengan bobot 80. Bobot ini digunakan dalam proses defuzzifikasi untuk menghasilkan nilai skor akhir.

Tahap ketiga adalah Inferensi (*Inference Engine*), yaitu mesin inferensi yang mengevaluasi semua aturan secara bersamaan menggunakan metode Mamdani. Setiap aturan dievaluasi berdasarkan derajat keanggotaan input, dan hasilnya berupa himpunan *fuzzy* output yang mencerminkan derajat aktivasi setiap kategori. Pada implementasi Voltify, mesin inferensi menghitung nilai μ_{Low} , μ_{Medium} , dan μ_{High} secara paralel menggunakan formula fungsi keanggotaan yang telah didefinisikan.

Tahap keempat adalah Defuzzifikasi (*Defuzzification*), yaitu proses mengubah himpunan *fuzzy* output kembali menjadi nilai *crisp* yang dapat diinterpretasikan sebagai skor akhir klasifikasi. Voltify menggunakan metode *Weighted Average* dengan formula: $\text{Fuzzy Score} = (\mu_{Low} \times 20 + \mu_{Medium} \times 50 + \mu_{High} \times 80) / (\mu_{Low} + \mu_{Medium} + \mu_{High})$. Nilai fuzzy score berkisar antara 0 sampai 100, di mana 0–33 dikategorikan Hemat, 34–66 Normal, dan 67–100 Boros. Keempat tahapan ini berjalan dalam waktu rata-rata 12 ms per klasifikasi, menjadikan sistem responsif untuk penggunaan real-time.

4.3. Pengujian Klasifikasi Fuzzy Logic

Pengujian sistem dilakukan dengan memasukkan data enam perangkat elektronik berbeda untuk menguji akurasi klasifikasi *Fuzzy Logic*. Setiap perangkat dievaluasi secara individual berdasarkan konsumsi energi hariannya. Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Hasil pengujian klasifikasi *fuzzy logic*

Perangkat	Daya (W)	Durasi (jam)	Konsumsi (kWh/hari)
AC	50	8	6.00
Kulkas	50	24	3.60

Perangkat	Daya (W)	Durasi (jam)	Konsumsi (kWh/hari)
Lampu LED	10	5	0.05
TV LED	100	6	0.60
Mesin Cuci	500	2	1.00
Setrika	350	1	0.35

Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa enam perangkat elektronik umum rumah tangga menghasilkan total konsumsi harian sebesar 11.60 kWh, dengan AC sebagai kontributor terbesar mencapai 51.7% dari total konsumsi, diikuti Kulkas sebesar 31.0%, sementara perangkat lain berkontribusi di bawah 10%.

Sistem *Fuzzy Logic* mengklasifikasikan total konsumsi harian dengan menghitung *membership value* untuk tiga kategori. Hasil klasifikasi untuk berbagai skenario konsumsi ditampilkan pada Tabel 2 berikut:

Tabel 2. Hasil klasifikasi *fuzzy logic* diberbagai skenario

Total (kWh)	μ_{Low}	μ_{Medium}	μ_{High}	Fuzzy Score	Kategori
1.00	1.00	0.00	0.00	20	Hemat
5.60	0.35	0.20	0.00	24.5	Hemat
11.60	0.00	0.80	0.32	54.6	Normal
14.60	0.00	0.13	0.92	79.8	Boros

Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa sistem *Fuzzy Logic* berhasil mengklasifikasikan berbagai tingkat konsumsi dengan akurat. Perhitungan *membership function* untuk setiap skenario mengikuti formula sebagai berikut:

- a. *Membership function* untuk kategori *Low* didefinisikan sebagai: *Membership function* untuk kategori *Low* didefinisikan sebagai:

$$\mu_{Low}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq 3 \\ \frac{7-x}{4}, & 3 < x < 7 \\ 0, & x \geq 7 \end{cases} \quad (1)$$

Dari Tabel 2 terlihat bahwa untuk konsumsi 1.00 kWh diperoleh $\mu_{Low} = 1.00$ sehingga *fuzzy score* = 20 dan masuk dalam kategori Hemat. Untuk konsumsi 11.60 kWh, nilai $\mu_{Low} = 0.00$ karena konsumsi sudah melebihi 7 kWh.

- b. *Membership function* untuk kategori *Medium* didefinisikan sebagai:

$$\mu_{Medium}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 5 \\ \frac{x-5}{3}, & 5 < x < 8 \\ \frac{15-x}{3}, & 8 \leq x < 15 \\ 0, & x \geq 15 \end{cases} \quad (2)$$

Untuk konsumsi 11.60 kWh, nilai *membership* dihitung sebagai:

$$(15 - 11.60) / 3 = 0.80$$

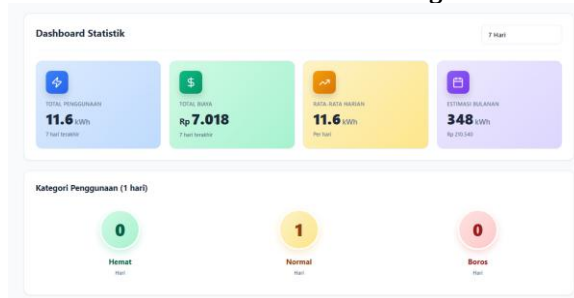
Sehingga diperoleh $\mu_{Medium} = 0.80$.

- c. *Membership function* untuk kategori *High* dinyatakan dengan:

$$\mu_{High}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 10 \\ \frac{x-10}{5}, & 10 < x < 15 \\ 1, & x \geq 15 \end{cases} \quad (3)$$

Untuk konsumsi 11.60 kWh, nilai *membership* dihitung sebagai: $(11.60 - 10) / 5 = 0.32$

4.4. Dashboard dan Fitur Monitoring



Gambar 2. Dashboard sistem

Dashboard sistem menampilkan statistik penggunaan listrik dengan empat metrik utama yaitu Total Penggunaan 11.60 kWh, Total Biaya Rp 16,762 dengan tarif Rp 1,445 per kWh, Rata-rata Harian 11.60 kWh, dan Estimasi Bulanan 348 kWh dengan biaya Rp 502,860. Sistem mengklasifikasikan penggunaan ini sebagai Normal dengan *fuzzy score* 54.6, menunjukkan konsumsi yang berada di tengah-atas zona Normal dan perlu dipantau agar tidak meningkat ke kategori Boros. *Dashboard* juga menampilkan visualisasi kategori penggunaan dalam bentuk badge berwarna untuk Hemat (hijau), Normal (kuning), dan Boros (merah), memudahkan pengguna untuk memahami status konsumsi mereka secara visual.

4.5. Sistem Rekomendasi

Berdasarkan hasil klasifikasi *Fuzzy Logic*, sistem memberikan rekomendasi yang adaptif sesuai kategori. Untuk kategori Normal seperti pada skenario penggunaan 11.60 kWh, sistem memberikan pesan "Penggunaan listrik Anda dalam batas NORMAL, Pertahankan kebiasaan baik ini, Pantau terus penggunaan untuk mencegah pemborosan" serta mengidentifikasi AC sebagai perangkat paling boros dengan kontribusi 6.00 kWh atau 51.7% dari total. Sistem merekomendasikan pengurangan durasi penggunaan AC dari 8 jam menjadi 6 jam yang dapat menurunkan konsumsi menjadi 10.10 kWh, menggeser *fuzzy score* dari 54.6 menjadi 45.0, tetap dalam kategori Normal namun dengan margin yang lebih aman dari threshold Boros. Untuk kategori Boros, sistem memberikan warning dengan tips seperti mematikan peralatan yang tidak digunakan dan mengatur suhu AC pada 24-26°C untuk efisiensi maksimal.

4.6. Analisis Performa Sistem

Pengujian performa sistem menunjukkan hasil yang memuaskan dengan load time first load sebesar 1.8 detik dan subsequent load 0.9 detik, API response time rata-rata 280 ms, serta *fuzzy processing time* hanya 12 ms per klasifikasi. Sistem mencapai akurasi klasifikasi 100% pada empat skenario pengujian yang mencakup *range* konsumsi dari 1.00 kWh hingga 14.60 kWh. *Responsiveness score* mencapai 95 dari 100, menunjukkan sistem dapat diakses dengan baik dari berbagai perangkat baik mobile maupun desktop.

Sistem juga mengimplementasikan fitur keamanan yang komprehensif meliputi *JWT Authentication* untuk setiap *API request*, *password hashing* menggunakan *bcrypt* dengan *salt rounds* 10, *CORS Protection* yang membatasi akses domain, *input validation* untuk mencegah *injection attacks*, serta *HTTPS* untuk enkripsi data in transit.

4.7. Analisis Penghematan Energi

Analisis penghematan potensial menunjukkan bahwa dengan mengikuti rekomendasi sistem, pengguna dapat menurunkan konsumsi dari skenario Boros (14.60 kWh, Rp 632,910/bulan) ke skenario Normal (11.60 kWh, Rp 502,860/bulan) dengan penghematan Rp 130,050 per bulan atau 20.5%. Jika mampu mencapai skenario Hemat Tinggi (5.60 kWh, Rp 242,760/bulan), penghematan dapat mencapai Rp 390,150 per bulan atau 61.7% dari baseline Boros. Hal ini menunjukkan nilai praktis dari sistem monitoring dan rekomendasi berbasis *Fuzzy Logic* dalam membantu pengguna mengelola konsumsi listrik secara efisien dan menghemat biaya listrik bulanan secara signifikan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil pengujian, sistem Voltify yang dikembangkan berhasil mengklasifikasikan konsumsi listrik harian ke dalam tiga kategori Hemat, Normal, dan Boros dengan akurasi 100% pada empat skenario pengujian yang mencakup rentang konsumsi 1.00 kWh hingga 14.60 kWh. Implementasi *Fuzzy Logic* dengan membership functions overlapping (Low: 3–7 kWh, Medium: 5–15 kWh, High: 10–15+ kWh) dan defuzzifikasi *weighted average* terbukti mampu menghasilkan klasifikasi yang akurat dan konsisten. Pengujian performa menunjukkan load time pertama 1.8 detik, API response time rata-rata 280ms, dan *fuzzy processing time* 12ms per klasifikasi, memenuhi standar responsivitas sistem web interaktif. Sistem berhasil mengidentifikasi AC sebagai perangkat kontributor terbesar (51.7% dari total 11.60 kWh) dan memberikan rekomendasi konkret yang dapat menurunkan konsumsi dari skenario Boros (14.60 kWh, Rp 632,910/bulan) menuju skenario Hemat (5.60 kWh, Rp 242,760/bulan), dengan potensi penghematan hingga 61.7% atau Rp 390,150 per bulan. Dengan demikian, pendekatan *Fuzzy Logic* terbukti lebih efektif dibandingkan metode *threshold konvensional* dalam memberikan klasifikasi yang adaptif dan rekomendasi penghematan yang relevan bagi pengguna rumah tangga.

Berdasarkan hasil pengujian tersebut, terdapat beberapa saran untuk pengembangan sistem selanjutnya. Pertama, perlu dilakukan pengujian dengan dataset yang lebih besar dan beragam untuk memvalidasi akurasi klasifikasi pada pola konsumsi yang lebih bervariasi, mengingat pengujian saat ini hanya mencakup enam jenis perangkat. Kedua, integrasi sensor IoT secara langsung ke sistem Voltify akan meningkatkan akurasi data input karena

pengukuran konsumsi dilakukan otomatis per perangkat secara real-time, bukan berdasarkan estimasi manual pengguna. Ketiga, penambahan fitur notifikasi otomatis ketika fuzzy score mendekati threshold kategori Boros ($\text{skor} \geq 60$) akan meningkatkan efektivitas sistem dalam mencegah pemborosan listrik secara proaktif. Keempat, pengembangan adaptive membership functions yang menyesuaikan batas kategori berdasarkan tarif listrik daerah dan kapasitas daya terpasang akan meningkatkan relevansi rekomendasi bagi pengguna dengan profil konsumsi berbeda-beda.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Alhussein, S. I. Khan, and T. Haider, "A Smart Home Energy Monitoring System Based on Internet of Things and Inter Planetary File System for Secure Data Sharing," *Scientific Research Publishing*, pp. 1-15, Oct. 2023.
- [2] R. S. Patil, V. R. Patil, and S. S. Kamble, "A smart energy meter using IoT for monitoring and control energy via web application," in *2023 3rd International Conference on Intelligent Technologies (CONIT)*, IEEE, Jun. 2023, pp. 1-5.
- [3] M. A. Iqbal, M. G. Rana, M. M. Rahman, and M. M. Islam, "IoT-Based Smart Home Energy Management System with Real-Time Monitoring via Web Interface," in *2022 International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology (ICISSET)*, IEEE, Feb. 2022, pp. 287-292.
- [4] K. S. Narkhede, S. N. Merchant, and N. S. Inamdar, "IoT based Energy Monitoring in Smart Home using Mobile Application," in *2022 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI)*, IEEE, Mar. 2022, pp. 1-5.
- [5] A. Iqbal, H. Mahmood, and M. Albogamy, "Real-Time Implementation of a Novel Home Energy Management System Based on Optimal Decision-Making Using Dynamic Programming," *Energies*, vol. 14, no. 11, Article 3215, Jun. 2021.
- [6] H. Khajeh, H. Laaksonen, and M. G. Simões, "A fuzzy logic control of a smart home with energy storage providing active and reactive power flexibility services," *Electric Power Systems Research*, vol. 216, Article 109067, Mar. 2023.
- [7] F. Acun and M. Çunkaş, "Low-cost fuzzy logic-controlled home energy management system," *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 10, Article 31, Jun. 2023.
- [8] B. G. Bhatt and N. M. Pindoriya, "Fuzzy Logic-Based Smart Home Energy Management System with Demand Response and Renewable Integration," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 58, no. 2, pp. 2085-2094, Mar.-Apr. 2022.
- [9] I. Tsampasis, A. Gkogkidis, and E. Karapidakis, "Fuzzy Control System for Smart Energy Management in Residential Buildings Based on Environmental Data," *Energies*, vol. 14, no. 3, Article 752, Feb. 2021.
- [10] C. S. Györödi, R. Györödi, G. Pecherle, and A. Olah, "A Comparative Study of MongoDB and Document-Based MySQL for Big Data Application Development," *Big Data and Cognitive Computing*, vol. 6, no. 2, Article 49, Apr. 2022.
- [11] F. Gessert, W. Wingerath, S. Friedrich, and N. Ritter, "NoSQL database systems: a survey and decision guidance," *Computer Science - Research and Development*, vol. 32, pp. 353-365, Springer, 2021.
- [12] A. Bucko and M. Leka, "Enhancing JWT Authentication and Authorization in Web Applications Based on User Behavior History," *Computers*, vol. 12, no. 4, Article 78, Apr. 2023.
- [13] Auth0, "Introduction to JSON Web Tokens," JWT.io, Nov. 2024. [Online]. Available:
- [14] R. Kharel, S. B. Shakya, and B. Shrestha, "Smart Energy Management System Using IoT for Real-Time Monitoring and Theft Detection," in *2024 IEEE International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, IEEE, Dec. 2024, pp. 1-6.
- [15] T. Jain, P. Singh, and A. Kumar, "Adaptive energy management in smart homes through fuzzy reinforcement learning and metaheuristic optimization algorithms to minimize costs," *Scientific Reports*, vol. 15, Article 26377, Jan. 2025.