

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Penelitian Terdahulu

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu

Peneliti/ Tahun	Judul Penelitian	Metode	Hasil Penelitian	Relevansi	Kekurangan yang dijawab pada penelitian saat ini	Indeks
Siregar dan Ikhsan (2025)	Sistem Monitoring dan Proteksi Beban Listrik Tiga Fasa Mengguna kan Fuzzy Sugeno	IoT dan Fuzzy Sugeno	Sistem mampu memberika n keputusan proteksi secara otomatis berdasarka n kondisi beban	Menjadi dasar penerapan metode Fuzzy Sugeno pada deteksi overload	Fokus pada sistem 3 fasa, belum ada filtering SMA dan deteksi power fluctuation	S3
Rachman et al. (2025)	Fuzzy Logic and IoT Implement ation for Optimizin g and Monitorin g AC and Lighting	IoT dan Fuzzy Logic	Sistem monitoring dan pengendali an beban berjalan dengan baik dan responsif	Mendukung penerapan logika fuzzy pada sistem pengambil an keputusan	Hanya berfokus pada optimasi beban tertentu (AC/Lampu), belum mendeteksi gangguan spesifik (<i>overload/power fluctuation</i>) serta tanpa filtering data	S3

Somantri et al. (2025)	Optimization of IoT-based monitoring system for automatic power factor correction using PZEM-004T sensor	ESP32, IoT, dan PZEM-004T	Sensor PZEM-004T mampu melakukan pengukuran tegangan, arus, dan daya dengan akurasi tinggi	Mendukung pemilihan sensor PZEM-004T pada penelitian	Hanya berfokus pada akurasi sensor, belum memiliki sistem pengambilan keputusan cerdas (fuzzy) dan Proteksi	S1
Surya et al. (2023)	Sistem monitoring beban listrik dan perbaikan faktor daya menggunakan PZEM004T dan dashboard Adafruit berbasis IoT	PZEM-004T, IoT, Dashboard Monitoring	Sistem monitoring mampu menampilkan parameter listrik dengan akurasi dan kestabilan yang baik	Menjadi dasar penggunaan parameter arus, tegangan, daya aktif, dan faktor daya	Fokus pada perbaikan faktor daya, belum mengimplementasikan klasifikasi gangguan <i>overload</i> dan fluktuasi daya berbasis kecerdasan buatan	S4
Dewantara (2023)	Sistem Deteksi Dini Gangguan pada PLTMH Menggunakan Threshold dan	Threshold dan Fuzzy Logic	Sistem mampu mendeteksi kondisi anomali lebih awal dibanding metode konvensional	Relevan pada penerapan metode threshold dan fuzzy untuk deteksi dini gangguan	Diimplementasikan pada PLTMH (skala mikrohidro), bukan untuk instalasi rumah tangga, serta belum menggunakan	S5

	Fuzzy Logic				filtering data (SMA)	
Tama dan Winari (2022)	Sistem Monitoring Arus dan Pengendalian Overcurrent Berbasis IoT	Sensor arus dan kontrol breaker	Sistem mampu mendeteksi arus berlebih dan melakukan proteksi otomatis	Mendukung konsep deteksi dini overload	Menggunakan metode kontrol <i>breaker</i> konvensional (belum fuzzy), belum membaca parameter daya lengkap (PZEM), dan belum mendeteksi <i>power fluctuation</i>	S4
Sultan Azka El Husein Lubis et al. (2026)	Implementasi Konsumsi Energi Listrik Perabotan Rumah Tangga Berbasis Internet of Things Menggunakan ESP32, Sensor PZEM-004T dan Fuzzy Mamdani	ESP32, PZEM-004T, Fuzzy Mamdani	Monitoring konsumsi listrik real-time dengan error rendah	Sama-sama menggunakan ESP32 dan PZEM-004T	Belum mendeteksi overload dan fluktuasi daya	S4

Fadhlun Nazry Luthfy et al. (2026)	Implementasi Internet of Things untuk Monitoring dan Kontrol Energi Listrik Rumah Tangga Menggunakan Metode Fuzzy Tsukamoto	ESP32, PZEM-004T, Fuzzy Tsukamoto	Sistem monitoring dan kontrol energi berjalan dengan baik	Sama-sama menggunakan fuzzy dan IoT	Tidak terdapat filtering data dan deteksi dua gangguan	S4
Fathu Fathan Mubina et al. (	Pemantauan dan Pengendalian Pemakaian Energi Listrik Berbasis IoT	ESP32, PZEM-004T, Blynk	Monitoring listrik dapat dilakukan secara realtime	Sama-sama menggunakan ESP32 dan PZEM	Tidak ada klasifikasi kondisi sistem	S4
Novantri et al. (2022)	Rancang Bangun Monitoring Kadar Gas Metana pada Pengolahan Sampah Organik Berbasis IoT	ESP32, IoT	Sistem mampu memantau kadar gas metana secara realtime dengan data yang dikirim ke platform IoT	Mendukung penggunaan ESP32 sebagai mikrokontroler berbasis IoT	Tidak diterapkan pada sistem kelistrikan serta tidak memiliki mekanisme pengambilan keputusan (fuzzy/threshold)	S2

	Menggunakan Mikrokontroller ESP32					
Budianto et al. (2025)	Perancangan Sistem Monitoring Kualitas Udara dalam Ruang Berbasis Internet of Things	IoT, Sensor kualitas udara	Sistem mampu memantau parameter kualitas udara dalam ruangan secara realtime	Mendukung konsep sistem monitoring berbasis IoT	Tidak diterapkan pada sistem tenaga listrik serta tidak memiliki analisis tren maupun decisionmaking system	S2
Kamila et al. (2024)	Sistem Pemantauan dan Kendali Konsumsi Listrik Rumah Tangga dengan Logika Fuzzy Berbasis IoT.	IoT, Fuzzy Logic	Sistem mampu melakukan monitoring dan pengendalian konsumsi energi listrik secara adaptif	Mendukung penerapan fuzzy logic pada sistem energi listrik	Tidak menggunakan analisis tren dan (SMA) dan belum difokuskan pada deteksi gangguan (overload/fluktuasi daya)	S3
Khairun Nisa et al. (2025)	Rancang Bangun Manajemen Energi dan Sistem Keamanan Kost Berbasis	IoT, Smart energy management	Sistem mampu mengelola penggunaan energi dan meningkatkan keamanan	Mendukung konsep manajemen energi berbasis IoT	Tidak terdapat klasifikasi gangguan listrik dan tidak menggunakan metode kecerdasan	S3

	Internet of Things		listrik pada lingkungan kost		seperti fuzzy Sugeno	
Zuraidah Tharo et al. (2018)	Pengaruh Pemakaian Beban Tidak Seimbang Terhadap Umur Peralatan Listrik	Analisis eksperimen beban listrik	Beban tidak seimbang dapat mempercepat penurunan umur peralatan listrik	Mendukung pemahaman dampak kondisi abnormal pada sistem listrik	Tidak berbasis IoT dan tidak memiliki sistem monitoring maupun deteksi otomatis	S4
Eko Widiarto et al. (2022)	Pengaruh Fluktuasi Tegangan terhadap Intensitas Cahaya pada Lampu LED dari Berbagai Merek	Studi eksperimen tegangan	Fluktuasi tegangan mempengaruhi intensitas cahaya dan performa lampu LED	Mendukung konsep dampak fluktuasi tegangan pada peralatan listrik	Belum sistem monitoring real-time dan tidak ada deteksi gangguan	S5
Gunawan Sihombing et al. (2025)	Analisis Pengaruh Fluktuasi Sumber Daya Listrik terhadap Keakuratan Pengukuran Daya dengan Teknik	Analisis sistem tenaga listrik	Fluktuasi tegangan mempengaruhi akurasi pengukuran daya listrik	Mendukung konsep fluktuasi daya sebagai gangguan sistem	Tidak menggunakan IoT dan tidak ada sistem deteksi atau klasifikasi gangguan	S5

	Pembobotan di Jaringan Distribusi					
Imam Suri Tauladan et al. (2024)	Penerapan Sensor PZEM-004T Untuk Monitoring Tegangan Fluktuasi 1 Fasa dengan Menggunakan Metode Fast Fourier Transform (FFT)	Pengukuran dengan PZEM-004T, analisis frekuensi menggunakan FFT, pengolahan pada mikrokontroler/PC	Mampu mendeteksi komponen frekuensi fluktuasi dan harmonik; identifikasi gangguan frekuensi	Sebagai dasar pemantauan tegangan pada sistem satu fasa.	Belum menerapkan metode deteksi adaptif seperti SMA dan fuzzy untuk pengambilan keputusan.	S4
Tama Marito Arironan et al. (2026)	Prototype smart iot safety and energy monitoring system berbasis esp32 untuk monitoring dan proteksi instalasi listrik secara realtime	Mengembangkan sistem monitoring dan proteksi listrik berbasis ESP32 secara real-time.	Sistem dapat memantau dan melakukan proteksi terhadap kondisi listrik abnormal.	Sebagai acuan implementasi IoT dan proteksi realtime.	Belum fokus pada deteksi overload dan fluktuasi daya secara spesifik.	

Agus Kiswanton et al. (2025)	Sistem monitoring dan proteksi motor mini conveyor terhadap anomali arus dan tegangan berbasis iot	Menerapkan monitoring arus dan tegangan untuk mendeteksi anomali pada motor conveyor	Sistem mampu mendeteksi gangguan dan memberikan proteksi otomatis.	Relevan untuk konsep deteksi anomali listrik dan proteksi beban	Masih terbatas pada objek motor, belum pada sistem listrik satu fasa umum	S5
Agus Kiswanton et al. (2025)	Monitoring realtime arus dan fuse pada sistem 220 v	Sistem memantau arus dan kondisi fuse secara real-time berbasis IoT.	Sistem dapat mendeteksi gangguan pada fuse dan menampilkan kondisi listrik secara langsung.	Penelitian ini relevan karena samasama berkaitan dengan pemantauan gangguan pada sistem listrik 220 V.	Kelemahannya adalah metode yang digunakan belum menunjukkan pengolahan sinyal yang lebih halus untuk membedakan gangguan sesaat dan gangguan sebenarnya, sehingga berpotensi menghasilkan false alarm.	S5
Muhammad Takdir Muslihi (2025)	Pengembangan dan Evaluasi Sistem Monitoring	Penelitian ini membahas sistem monitoring	Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem dapat	Relevan karena menggunakan sensor PZEM-004T dan	Penelitian tersebut masih berorientasi pada pemantauan konsumsi daya,	S4

	Konsumsi Daya Listrik Berbasis IoT dengan Sensor PZEM-004T dan ESP8266	ng konsumsi daya berbasis IoT dengan memanfaatkan sensor PZEM-004T dan ESP8266 sebagai media pengiriman data.	memantau konsumsi daya listrik secara daring dengan tingkat akurasi yang memadai setelah dilakukan pengujian dan evaluasi.	modul komunikasi nirkabel yang juga berpotensi digunakan dalam penelitian ini.	belum terdeteksi gangguan overload maupun fluktuasi daya berbasis klasifikasi keputusan.	
Tri Ardiyanto et al. (2024)	Rancang Bangun Sistem Monitoring Deteksi Dini Kebakaran Ruang Server Berbasis Iot	Penelitian ini mengemban sistem deteksi dini kebakaran pada ruang server menggunakan sensor dan platform IoT untuk memantau kondisi lingkungan	Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan peringatan dini terhadap potensi kebakaran sehingga meningkatkan aspek keselamatan	Penelitian ini relevan dari sisi pendekatan deteksi dini berbasis pemantauan real-time.	Namun, objek penelitian berbeda karena berfokus pada kebakaran, bukan pada gangguan listrik seperti overload dan power fluctuation.	S5

		an secara real-time				
Erick Radwitya et al. (2026)	Perancangan alat monitoring tegangan dan arus listrik berbasis mikrokontroler arduino untuk rumah	Penelitian ini merancang alat monitoring tegangan dan arus listrik berbasis Arduino untuk kebutuhan pemantauan instalasi rumah tangga.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa alat mampu menampilkan data tegangan dan arus secara sederhana sebagai media pemantauan pengguna.	Penelitian ini relevan karena menunjukkan penerapan mikrokontroler Arduino dalam sistem monitoring listrik rumah.	Keterbatasannya terletak pada belum adanya mekanisme analisis gangguan yang lebih cerdas, seperti pemrosesan data berbasis SMA dan Fuzzy Sugeno.	S5
Dani Usman et al. (2025)	Implementasi Sistem Monitoring Tegangan, Arus, Daya Dan Energi Untuk Miniatur Rumah Berbasis IoT	Mengembangkan sistem monitoring multiparameter pada miniatur rumah.	Sistem dapat memantau parameter listrik secara terintegrasi.	Relevan sebagai referensi monitoring multiparameter.	Masih bersifat simulatif dan belum diterapkan pada sistem nyata.	S5

Supri Ananda et al. (2026)	Implementasi Sistem Deteksi Kegagalan Daya Secara Real-Time Berbasis Internet of Things Menggunakan ESP8266 sebagai Web Server.	Menggunakan ESP8266 sebagai web server untuk deteksi kegagalan daya.	Sistem mampu menampilkan kondisi kegagalan daya secara real-time.	Relevan untuk implementasi antarmuka monitoring berbasis web.	Belum menjelaskan metode klasifikasi gangguan yang lebih adaptif.	S5
Muhammad Hasanudin et al. (2025)	Pengembangan Sistem Pemantauan Beban Listrik Menggunakan Sensor Berbasis Arduino untuk Industri Skala Kecil.	Sistem monitoring beban listrik berbasis Arduino untuk industri kecil.	Sistem mampu memantau beban listrik secara berkelanjutan.	Relevan sebagai acuan pemantauan beban dan overload.	Belum menerapkan keputusan proteksi berbasis fuzzy.	S5
Hidayat et al. (2026)	IoT-Based Electrical Power	ESP32, PZEM-004T, IoT	Sistem mampu melakukan	Relevan dalam mengguna	Tidak terdapat deteksi dini, tidak menggunakan	S3

Consumption Monitoring System in Households Using ESP32 and PZEM-004T	monitoring konsumsi daya listrik secara realtime	kan ESP32 dan PZEM-004T pada sistem listrik satu fasa	fuzzy logic, dan tidak ada analisis tren data
---	--	---	---

Berdasarkan Tabel 2.1 Penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa pengembangan sistem monitoring kelistrikan berbasis IoT telah mengalami perkembangan signifikan dengan penggunaan sensor PZEM-004T dan mikrokontroler ESP32 sebagai standar implementasi. Penelitian sebelumnya telah menerapkan logika fuzzy (Sugeno, Mamdani, Tsukamoto) untuk pengambilan keputusan dan proteksi beban, namun sebagian besar masih berfokus pada optimasi beban atau respons protektif tanpa kemampuan deteksi dini kondisi pra-gangguan. Selain itu, penelitian yang ada umumnya hanya mendeteksi satu jenis gangguan (*overload* saja) atau hanya melakukan monitoring real-time tanpa klasifikasi kondisi sistem, serta belum ada yang mengimplementasikan analisis tren berbasis *Simple Moving Average* (SMA) untuk reduksi noise dan identifikasi kecenderungan perubahan parameter listrik dari waktu ke waktu.

Penelitian ini menempati posisi *filling the gap* dalam peta penelitian monitoring kelistrikan dengan mengusulkan metode hibrida yang menggabungkan *threshold*, analisis tren berbasis SMA, dan Fuzzy Sugeno untuk deteksi dini terhadap dua gangguan simultan (*overload* dan *power fluctuation*) pada sistem tenaga listrik satu fasa. Kontribusi penelitian ini meliputi: (1) implementasi metode hibrida *Threshold + SMA + Fuzzy Sugeno* yang meningkatkan akurasi deteksi dini dan mengurangi frekuensi alarm palsu, (2) penggunaan dua input fuzzy yang efisien (*Deviasi Daya* dan *Current Ratio*) untuk efisiensi komputasi di ESP32, (3) klasifikasi empat kondisi sistem (*Normal*, *Waspada*, *Fluktuasi Daya*, *Overload*) yang memungkinkan peringatan proaktif sebelum terjadi gangguan serius, dan (4) pengembangan sistem monitoring berbasis *Blynk* untuk real-time monitoring pada lingkungan rumah tangga maupun usaha kecil. Dengan demikian, penelitian ini memberikan solusi komprehensif yang menjawab keterbatasan

penelitian terdahulu dalam aspek deteksi dini, analisis tren, dan deteksi multiparan gangguan secara adaptif.

2.2 Sistem Tenaga Listrik Satu Fasa dan Karakteristik, Beban

2.2.1 Sistem Distribusi Satu Fasa

Sistem distribusi listrik satu fasa merupakan konfigurasi jaringan listrik yang terdiri atas satu penghantar fase dan satu penghantar netral, yang secara umum digunakan untuk instalasi rumah tangga dan industri ringan. Sistem ini menyuplai tegangan nominal sekitar 220 – 230 V dengan frekuensi 50 Hz, sesuai standar nasional Indonesia. Meskipun konstruksinya relatif sederhana dibandingkan sistem tiga fasa, sistem satu fasa tetap memerlukan perancangan yang mempertimbangkan aspek teknis seperti penurunan tegangan (*voltage drop*) dan rugi daya (*power losses*), terutama pada situasi dimana beban tidak terdistribusi secara merata [11].

Dalam banyak aplikasi, distribusi tenaga satu fasa menerapkan konfigurasi radial, dimana sejumlah titik beban disuplai dari satu sumber utama. Model ini cenderung lebih ekonomis dari sisi investasi namun memiliki keterbatasan dalam hal stabilitas tegangan dan ketahanan terhadap kondisi beban tinggi atau tidak seimbang[12].

Perubahan beban pada sistem satu fasa dapat mempengaruhi nilai arus, tegangan, dan daya aktif sehingga berpotensi menurunkan kualitas daya listrik. Karakteristik tersebut menjadikan sistem satu fasa rentan mengalami fluktuasi daya dan overload, sehingga diperlukan pemantauan parameter arus dan daya aktif secara real-time sebagai dasar deteksi dini gangguan pada penelitian ini.

2.2.2 Karakteristik Beban

Pada jaringan satu fasa, beban listrik dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kategori utama beban resistif, induktif, dan non-linier. Beban resistif seperti pemanas atau lampu memiliki arus yang sebanding dengan tegangan dan faktor daya mendekati satu. Beban induktif seperti motor listrik menghasilkan arus *inrush* saat start dan menyebabkan pergeseran fasa (*lagging*) arus terhadap tegangan. Sementara itu, beban non-linier seperti *adaptor switching* dan peralatan elektronik modern dapat membangkitkan harmonisa dan distorsi gelombang arus maupun tegangan [11]. Perbedaan karakteristik beban tersebut menyebabkan variasi pada parameter arus,

tegangan, daya aktif, dan faktor daya sehingga mempengaruhi kualitas daya listrik pada sistem satu fasa.

Variasi parameter akibat perubahan karakteristik beban dapat memicu kondisi *power fluctuation* maupun *overload*, sehingga diperlukan pemantauan secara *realtime* untuk mendeteksi kondisi abnormal pada sistem yang diteliti.

2.2.3 Implikasi Karakteristik Beban terhadap Sistem Distribusi

Karakteristik beban yang dinamis dan beragam pada sistem satu fasa memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kinerja teknis dan keandalan sistem distribusi listrik. Ketidakseimbangan distribusi beban dapat menyebabkan peningkatan arus yang mengalir pada penghantar, bertambahnya rugi daya, serta pemanasan konduktor yang berpotensi menimbulkan kerusakan pada peralatan dan infrastruktur distribusi [13]. Kondisi tersebut menegaskan pentingnya pemantauan sebaran beban dan besaran kelistrikan utama seperti arus, tegangan, daya aktif, dan faktor daya untuk mencegah degradasi performa sistem dan meminimalkan risiko kegagalan operasional.

Selain itu, perubahan beban yang cepat atau bersifat fluktuatif dapat menimbulkan penurunan maupun kenaikan tegangan sementara (*voltage sag/swell*) serta variasi daya aktif yang signifikan, yang secara langsung menurunkan kualitas daya dan meningkatkan risiko terjadinya gangguan, termasuk kondisi *overload*. Oleh karena itu, pemahaman karakteristik beban yang dinamis menjadi dasar kritis dalam penelitian ini, di mana informasi perubahan arus dan daya aktif, selanjutnya dapat diolah menggunakan metode *Threshold*, *Simple Moving Average*, dan *Fuzzy Sugeno* untuk memastikan efisiensi operasional dan keandalan pasokan daya.

2.3 Parameter Kinerja Sistem Listrik

Parameter kinerja sistem listrik merupakan indikator yang digunakan untuk menilai kualitas dan keandalan pasokan daya listrik dalam suatu sistem distribusi. Evaluasi parameter ini sangat penting untuk mendeteksi gangguan seperti *overload* dan *power fluctuation*, serta untuk memastikan bahwa peralatan listrik beroperasi dalam kondisi aman dan efisien. Dalam konteks penelitian ini, fokus utama diberikan pada parameter arus beban, tegangan fasa, daya aktif, dan faktor daya sebagai besaran yang langsung mencerminkan kondisi pembebanan dan kualitas daya pada sistem satu fasa,

sementara frekuensi, harmonisa, dan fluktuasi tegangan dipertimbangkan sebagai faktor pendukung dalam menilai kinerja keseluruhan sistem[14].

2.3.1 Tegangan (Voltage)

Tegangan merupakan besaran potensial listrik yang disuplai ke beban. Pada sistem satu fasa, tegangan nominal umumnya berkisar antara 220–230 V dengan frekuensi 50 Hz. Penyimpangan tegangan, baik dalam bentuk penurunan (*voltage sag*) maupun kenaikan (*voltage swell*), berpotensi menurunkan kinerja peralatan listrik, memicu aktivasi proteksi otomatis, dan mengganggu kontinuitas operasional sistem distribusi listrik. Oleh karena itu, pemantauan tegangan secara real-time menjadi krusial untuk mendeteksi perubahan signifikan dan mencegah kerusakan pada peralatan maupun sistem distribusi, di mana pada penelitian ini nilai tegangan sebagai salah satu pemicu perubahan daya aktif yang dapat menyebabkan gangguan *power fluctuation* [15].

2.3.2 Arus (Current)

Arus listrik mencerminkan jumlah muatan listrik yang mengalir melalui konduktor per satuan waktu dan menjadi indikator utama tingkat pembebanan pada suatu instalasi. Lonjakan arus dapat terjadi ketika beban mencapai puncak atau saat start motor berkapasitas besar, dan jika tidak dikendalikan, kondisi tersebut dapat menyebabkan pemanasan penghantar serta kerusakan pada peralatan listrik. Oleh karena itu, pemantauan parameter arus merupakan langkah kritis untuk mendeteksi potensi *overload* dan memastikan kapasitas penghantar tidak terlampaui, sehingga menjaga keamanan dan keandalan sistem distribusi listrik. Dalam penelitian ini, nilai arus sebagai parameter gangguan *overload* atau beban lebih, ditetapkan batasan ambang arus yakni menggunakan metode *threshold* sebagai klasifikasi awal sebelum dilakukan keputusan kondisi sistem lebih lanjut melalui logika fuzzy [16].

2.3.3 Daya Aktif (Active Power)

Daya aktif merupakan besaran listrik yang menunjukkan energi yang benar-benar dikonsumsi oleh beban untuk melakukan kerja nyata. Fluktuasi pada daya aktif mengindikasikan adanya perubahan mendadak pada beban, yang berpotensi mengganggu stabilitas tegangan dan arus pada sistem distribusi listrik.

Oleh karena itu, pemantauan daya aktif secara kontinu menjadi langkah penting dalam mendeteksi dini kondisi *power fluctuation*, sekaligus menjaga efisiensi operasional dan keandalan sistem listrik. Dalam penelitian ini variasi daya aktif dianalisis menggunakan Simple Moving Average untuk menghasilkan deviasi daya yang menjadi parameter ambang batas (*Threshold*) untuk membedakan perubahan daya yang wajar akibat variasi beban normal dari fluktuasi daya yang bersifat anomali [17].

2.3.4 Faktor Daya (Power Factor)

Faktor daya merupakan indikator penting yang menunjukkan efisiensi pemanfaatan daya listrik oleh suatu sistem. Beban yang bersifat induktif atau nonlinier dapat menyebabkan penurunan faktor daya, sehingga meningkatkan arus total yang mengalir dan menimbulkan kerugian energi pada sistem distribusi listrik. Pemantauan faktor daya secara kontinu sangat penting untuk mendeteksi ketidakseimbangan beban dan potensi overload, serta membantu menjaga efisiensi operasional dan keandalan sistem distribusi listrik. Dalam penelitian ini, nilai faktor daya dikombinasikan dengan informasi arus, tegangan, dan daya aktif untuk mengidentifikasi pola beban yang tidak efisien dan menguatkan analisis fuzzy terhadap kondisi *overload* dan *power fluctuation* [18].

2.3.5 Harmonisa dan Fluktuasi Tegangan

Harmonisa merupakan distorsi gelombang sinus yang dihasilkan oleh beban non-linier seperti inverter, komputer, atau lampu LED. Sementara itu, fluktuasi tegangan adalah perubahan cepat pada tegangan yang dapat menyebabkan flicker atau redup-terangnya lampu. Pemantauan kedua parameter ini secara kontinu sangat penting untuk menjaga kualitas daya dan mencegah kerusakan pada peralatan elektronik yang sensitif terhadap distorsi dan fluktuasi, serta memberikan konteks tambahan dalam menganalisis hasil pengukuran arus, tegangan, daya aktif, dan faktor daya pada sistem deteksi dini gangguan berbasis *threshold*, *Simple Moving Average*, dan Fuzzy Sugeno [19].

2.4 Deviasi Daya

Deviasi daya merupakan selisih antara daya aktual yang terukur dengan daya acuan pada kondisi normal, yang digunakan untuk menunjukkan adanya penyimpangan daya aktif akibat perubahan tegangan, arus, maupun kondisi beban. Deviasi daya dilakukan dengan membandingkan nilai daya

hasil pengukuran terhadap nilai referensi, baik dalam bentuk selisih absolut maupun persentase, sehingga tingkat perubahan kondisi sistem dapat diketahui secara kuantitatif. Dalam Penelitian, Deviasi daya diperoleh dari perhitungan selisih antara daya aktif dan daya hasil filter SMA, Sebagai paramater gangguan *power fluctuation* atau fluktuasi daya .

Rumus deviasi daya pada penelitian ini dituliskan sebagai:

$$D\% = \frac{|P_{aktual} - P_{SMA}|}{P_{SMA}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.1)$$

dengan:

- D = deviasi daya
- P_{aktual} = daya aktif hasil pengukuran
- P_{SMA} = daya hasil filter *Simple Moving Average*.

2.5 Jenis Gangguan pada Sistem Listrik 1 Fasa

Gangguan pada sistem listrik satu fasa merupakan kondisi abnormal yang dapat menurunkan kualitas daya, mengurangi efisiensi sistem, serta berpotensi merusak peralatan listrik. Gangguan ini dapat disebabkan oleh variasi beban, kegagalan peralatan, atau faktor eksternal seperti petir dan fluktuasi pada jaringan distribusi. Pemahaman yang mendalam mengenai jenis gangguan dan karakteristik waktu pra-gangguan sangat penting sebagai dasar perancangan sistem monitoring yang mampu melakukan deteksi dini dan respons proaktif, terutama ketika parameter utama seperti arus, tegangan, daya aktif, dan faktor daya dianalisis secara terintegrasi [20].

2.5.1 Overload (Beban Lebih)

Overload terjadi ketika arus listrik yang mengalir melebihi kapasitas nominal penghantar atau peralatan listrik dalam selang waktu tertentu,

sehingga menimbulkan pemanasan berlebih pada konduktor, penurunan tegangan lokal, serta aktivasi proteksi otomatis. Kondisi ini umumnya disebabkan oleh beban puncak yang berkepanjangan, penambahan beban di luar kapasitas perancangan, atau ketidakseimbangan distribusi beban yang menyebabkan arus pada satu jalur meningkat melampaui nilai yang diizinkan [21].

Secara pra-gangguan, kenaikan arus sering terjadi secara bertahap dalam rentang beberapa detik hingga menit sebelum mencapai ambang kritis, sehingga diperlukan pemantauan real-time terhadap arus, tegangan, dan daya aktif untuk mengenali tren kenaikan beban sebagai indikator awal. Dalam konteks penelitian ini, besaran arus beban I dan daya aktif P diperlakukan sebagai variabel utama untuk mendeteksi overload, di mana pola kenaikan I dan P dianalisis menggunakan *Simple Moving Average* dan dibandingkan dengan nilai ambang arus *overload* yang telah ditetapkan dalam metode *threshold* untuk mengidentifikasi kondisi Normal, Waspada, maupun *Overload*.

2.5.2 Power Fluctuation (Fluktuasi Daya)

Power Fluktuation (Fluktuasi Daya) merupakan perubahan nilai daya listrik yang terjadi secara kontinu maupun sesaat akibat perubahan karakteristik beban, variasi tegangan, perubahan arus, maupun perubahan faktor daya pada sistem tenaga listrik. Kondisi ini umumnya muncul ketika terjadi penyambungan dan pelepasan beban secara berulang, perubahan tingkat konsumsi energi listrik, serta pengoperasian peralatan dengan kebutuhan daya yang berubah-ubah. Fluktuasi daya yang terjadi secara berlebihan dapat memengaruhi kestabilan operasi sistem tenaga listrik dan menurunkan efisiensi penggunaan energi listrik [22].

Secara teoritis, daya aktif pada sistem satu fasa dipengaruhi oleh tegangan, arus, dan faktor daya sebagaimana dinyatakan pada Persamaan:

$$P = V \times I \times pf \dots \dots \dots (2.2)$$

Dengan P adalah daya aktif (W), V adalah tegangan (V), I adalah arus (A), dan pf adalah faktor daya. Berdasarkan persamaan tersebut, perubahan salah satu parameter akan menyebabkan perubahan daya aktif yang diserap oleh beban. Oleh karena itu, daya aktif dapat digunakan sebagai indikator

untuk menggambarkan kondisi operasi sistem listrik dan perubahan karakteristik pembebanan dari waktu ke waktu.

Dalam penelitian ini, *power fluctuation* diamati berdasarkan perubahan nilai daya aktif yang diperoleh dari hasil pengukuran sensor PZEM-004T. Parameter arus, tegangan, daya aktif, dan faktor daya dipantau secara *real-time*, kemudian nilai daya aktif diproses atau difilter menggunakan metode *Simple Moving Average* (SMA) untuk mengidentifikasi kecenderungan perubahan daya dan mereduksi pengaruh noise pengukuran.

2.5.3 Voltage Sag dan Swell

Voltage sag merupakan penurunan tegangan RMS sementara hingga sekitar 10–90% dari nilai nominal selama 0,5–60 detik, yang biasanya diakibatkan oleh arus inrush motor, gangguan hubung singkat di sistem, atau penyambungan beban besar secara mendadak. Sebaliknya, *voltage swell* merupakan kenaikan tegangan RMS sementara hingga sekitar 110–180% dari nilai nominal akibat pelepasan beban besar atau operasi switching kapasitor bank. Fenomena sag dan swell ini dapat menyebabkan gangguan operasi pada peralatan sensitif, penghentian proses industri, serta penurunan umur peralatan. Waktu terjadinya sag/swell umumnya berada pada rentang 0,5–5 detik sebelum tegangan menyentuh atau melewati ambang kritis, sehingga pemantauan tegangan secara *real-time* menjadi esensial untuk memastikan sistem mampu melakukan tindakan mitigasi sebelum gangguan berkembang. Pada penelitian ini, sag dan swell merupakan variasi tegangan yang dapat memicu perubahan daya atau fluktuasi daya [23].

2.5.4 Pemadaman Sementara (Interruption)

Interruption terjadi ketika tegangan turun menjadi mendekati nol selama periode tertentu akibat kegagalan sistem distribusi, operasi pemutus arus, atau gangguan besar pada jaringan. Dampak pemadaman meliputi hilangnya fungsi peralatan listrik, kehilangan data, dan potensi kerugian ekonomi terutama pada lingkungan industri dan komersial. Waktu pra-gangguan umumnya berkisar dari detik hingga beberapa menit, yang memungkinkan sistem monitoring mencatat pola penurunan tegangan, durasi, dan frekuensi kejadian sebagai dasar analisis reliabilitas jaringan. Meskipun pemadaman penuh bukan fokus utama penelitian ini, informasi terkait pola tegangan dan daya sebelum terjadinya *interruption* tetap

bermanfaat sebagai referensi dalam evaluasi keandalan sistem secara keseluruhan [24].

2.5.5 Harmonik (Harmonics)

Harmonik merupakan distorsi bentuk gelombang tegangan atau arus dari bentuk sinus murni akibat keberadaan beban non-linier seperti inverter, komputer, catu daya switching, atau lampu LED. Distorsi harmonik dapat menyebabkan pemanasan berlebih pada trafo dan konduktor, meningkatkan rugi-rugi daya, serta mengganggu kinerja peralatan yang sensitif terhadap kualitas gelombang. Waktu pragangguan untuk harmonisa biasanya beberapa detik hingga menit, tergantung karakteristik dan pola operasi beban non-linier. Pada Penelitian ini harmonik bukan bagian dari gangguan yang dideteksi oleh sistem melainkan salah satu bentuk variasi tegangan [25].

2.6 Early Warning System (Sistem Peringatan Dini)

Early Warning System (EWS) merupakan sistem yang dirancang untuk mendeteksi indikasi awal terjadinya gangguan melalui pemantauan parameter operasi secara berkelanjutan. Dalam konsep *condition monitoring*, proses deteksi dini dilakukan dengan membandingkan nilai parameter hasil pengukuran terhadap nilai acuan (*baseline*) dan nilai ambang (*threshold*) yang telah ditentukan. Oleh karena itu dalam penelitian ini Batas ambang atau batas toleransi berpacu pada SPLN dan kapasitas MCB pada sistem yang telah ditentukan [26].

2.6.1 Konsep Threshold Pada Early Warning System

Threshold merupakan nilai ambang yang digunakan sebagai dasar evaluasi kondisi sistem. Dalam konsep *Early Warning System*, *threshold* terdiri atas tiga komponen utama, yaitu:

- **Baseline**, yaitu kondisi acuan yang merepresentasikan operasi normal sistem.
- **Warning Threshold**, yaitu batas peringatan yang menunjukkan adanya penyimpangan awal sehingga diperlukan peningkatan pemantauan.
- **Alarm (Critical) Threshold**, yaitu batas kritis yang menunjukkan bahwa parameter telah mencapai kondisi yang memerlukan tindakan korektif.

Melalui konsep tersebut, sistem tidak hanya mampu mendeteksi kondisi gangguan, tetapi juga memberikan peringatan sebelum gangguan mencapai tingkat kritis. Pada penelitian ini *baseline* berada pada tahap status sistem normal, *Warning Threshold* berada pada status sistem waspada dan *Alarm (Critical)* berada pada status sistem gangguan yang terjadi *Power fluctuation* atau *Overload*.

2.6.2 Klasifikasi Kondisi Sistem

Berdasarkan konsep *Early Warning System*, kondisi sistem diklasifikasikan menjadi tiga tingkat, yaitu:

a. Normal (*Baseline*)

Menunjukkan bahwa parameter masih berada pada rentang operasi yang aman (*baseline*) sehingga sistem bekerja sesuai kondisi yang diharapkan.

b. Waspada (*Warning*)

Menunjukkan bahwa parameter mulai mengalami penyimpangan dari kondisi normal dan mendekati batas kritis. Pada kondisi ini diperlukan peningkatan pemantauan sebagai upaya pencegahan sebelum terjadi gangguan.

c. Kritis (*Critical*)

Menunjukkan bahwa parameter telah mencapai atau melampaui *alarm threshold*, sehingga berpotensi menyebabkan gangguan terhadap kinerja sistem dan memerlukan tindakan korektif.

Dalam penelitian ini, konsep klasifikasi tersebut diterapkan pada dua parameter, yaitu deviasi daya untuk mendeteksi *power fluctuation* dan arus untuk mendeteksi kondisi *overload*.

2.7 Threshold (Ambang Batas)

Konsep threshold atau ambang batas merupakan pendekatan analitis yang digunakan untuk menetapkan nilai batas tertentu sebagai acuan pemisah antara kondisi operasi normal dan kondisi yang dikategorikan sebagai anomali pada suatu sistem pengukuran [27]. Dibandingkan metode berbasis kecerdasan buatan seperti *Artificial Neural Network (ANN)* m, metode *threshold* memiliki struktur yang lebih sederhana, kebutuhan komputasi yang lebih rendah, serta mampu memberikan keputusan awal secara cepat tanpa memerlukan proses pelatihan maupun basis aturan yang kompleks. Namun, keputusan yang dihasilkan bersifat tegas (crisp) sehingga kurang adaptif terhadap perubahan beban yang dinamis dan rentan menghasilkan alarm palsu

akibat fluktuasi sesaat pada parameter pengukuran. Berbeda dengan metode statistik seperti *Simple Moving Average* (SMA) yang mampu mereduksi noise serta metode Fuzzy Sugeno yang dapat menghasilkan keputusan secara lebih fleksibel, metode *threshold* lebih sesuai digunakan sebagai tahap identifikasi awal terhadap kondisi abnormal. Dalam Penelitian ini batas ambang ditentukan sesuai dengan jenis parameter yang digunakan untuk mendeteksi gangguan, pada klasifikasi tingkatan diperhitungkan menggunakan persamaan rumus safety margin.

$$SM = \frac{X_{maks} - X_{baseline}}{X_{maks} - X_{aktual}} 100\% \dots \dots \dots (2.3)$$

Keterangan:

- SM = *safety margin* arus (%).
- X_{maks} = nilai maksimum yang diizinkan.
- $X_{baseline}$ = nilai acuan pada kondisi normal (baseline).
- X_{aktual} = nilai parameter hasil pengukuran saat ini.

2.7.1 Threshold Overload

Threshold overload merupakan batas ambang kapasitas MCB pada sistem yang telah ditentukan yaitu 4 A. Dalam Penelitian ini penentuan klasifikasi kondisi sistem berdasarkan Teori Klasifikasi Status Layanan Berbasis Safety Margin dari penelitian Li, Peng, dan Hu tahun 2023 [28].

2.7.2 Threshold Power Fluctuation

Threshold power fluctuation merupakan batas ambang perubahan daya dari variasi tegangan yang diatur SPLN 1:1995 dan SPLN T6.001:2013 batas variasi tegangan kurang dari 10% . Pada Penelitian ini penentuan batas ambang *power fluctuation* menggunakan persamaan rumus daya aktif satu fasa. Pada objek beban resistif lalu diklasifikasi pada Early warning system dengan Teori Klasifikasi Status Layanan Berbasis Safety Margin dari penelitian Li, Peng, dan Hu tahun 2023 [29].

2.8 Simple Moving Average

Simple Moving Average (SMA) merupakan salah satu metode perataan data deret waktu yang dilakukan dengan menghitung rata-rata aritmetika dari sejumlah data pada interval pengamatan tertentu. Dalam sistem tenaga listrik, metode ini banyak digunakan untuk mereduksi fluktuasi jangka pendek pada parameter kelistrikan sehingga pola perubahan beban dan kecenderungan konsumsi daya dapat diamati dengan lebih jelas. Penelitian mengenai prediksi konsumsi energi listrik menunjukkan bahwa metode moving average mampu memberikan tingkat akurasi yang baik dengan kompleksitas perhitungan yang relatif rendah, sehingga sesuai diterapkan pada sistem monitoring berbasis mikrokontroler dan *Internet of Things* (IoT) [30].

Secara matematis, nilai *Simple Moving Average* pada waktu ke- k dapat dinyatakan sebagai:

$$\bar{x}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_{k-i} \quad (2.4)$$

Dimana x_k merepresentasikan nilai pengukuran parameter pada saat ke- k , dan n merupakan panjang jendela pengamatan yang ditetapkan untuk setiap deret waktu parameter tersebut. Pemilihan nilai n memiliki implikasi langsung terhadap karakteristik sinyal hasil penghalusan: jendela yang lebih besar akan menghasilkan sinyal yang lebih halus namun dengan respons yang lebih lambat terhadap perubahan beban mendadak, sedangkan jendela yang lebih kecil menghasilkan respons lebih cepat tetapi dengan kemampuan peredaman fluktuasi yang lebih rendah. Dalam berbagai implementasi sistem monitoring dan kendali kelistrikan, SMA dimanfaatkan sebagai filter numerik yang ringan secara komputasi sehingga sesuai untuk diterapkan pada perangkat IoT berbasis mikrokontroler seperti ESP32 yang mengakuisisi data dari sensor energi PZEM-004T, sekaligus tetap mampu mempertahankan informasi tren yang relevan bagi analisis lebih lanjut [31].

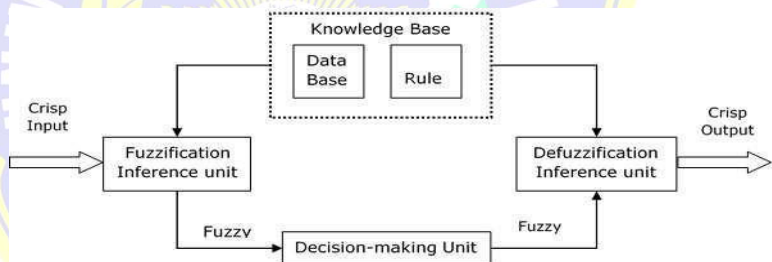
Dibandingkan *Weighted Moving Average* (WMA) dan *Exponential Moving Average* (EMA), metode SMA memiliki struktur perhitungan yang lebih sederhana dan kebutuhan komputasi yang lebih rendah karena setiap data memiliki bobot yang sama. Meskipun WMA dan EMA mampu memberikan respons yang lebih cepat terhadap perubahan data terbaru, keduanya memerlukan proses pembobotan yang lebih kompleks. Oleh karena itu, SMA lebih sesuai diterapkan pada sistem monitoring berbasis ESP32

yang memiliki keterbatasan sumber daya komputasi serta membutuhkan proses pengolahan data secara real-time.

Dalam penelitian ini, SMA digunakan sebagai tahap filtering untuk mereduksi noise pada data daya aktif hasil pengukuran sensor PZEM-004T dan memperoleh kecenderungan perubahan parameter daya aktif. Filter SMA menggunakan Window 5 berdasarkan rentang waktu terjadinya (*inrush current*) [32].

2.9 Fuzzy Sugeno

Fuzzy Sugeno merupakan salah satu metode dalam logika fuzzy yang menghasilkan keluaran berupa nilai tegas atau *crisp* melalui konsekuen aturan berbentuk konstanta atau fungsi linier. Metode ini berbeda dengan Fuzzy Mamdani yang menghasilkan keluaran berbentuk himpunan fuzzy sehingga memerlukan tahap defuzzifikasi yang lebih kompleks. Karena proses komputasinya lebih sederhana, Fuzzy Sugeno banyak digunakan pada sistem berbasis mikrokontroler yang membutuhkan pengambilan keputusan cepat dan efisien.



Gambar 2. 1 Diagram Fuzzy inference system

Sumber : tutorialspoint.com

Dalam Fuzzy Sugeno, aturan IF–THEN digunakan untuk memetakan kombinasi beberapa variabel masukan menjadi suatu keluaran numerik. Model ini terdiri atas orde 0, yaitu konsekuen berupa konstanta, dan orde 1, yaitu konsekuen berupa fungsi linier dari variabel masukan. Nilai keluaran akhir diperoleh melalui rata-rata terbobot dari kontribusi setiap aturan yang aktif. Kombinasi kedua model ini memungkinkan sistem memberikan respon yang tegas ketika parameter melampaui batas sekaligus tetap sensitif pada

zona transisi pra-gangguan, serupa pendekatan Fuzzy Sugeno yang digunakan pada sistem monitoring dan proteksi beban tiga fasa berbasis IoT oleh Siregar dan Ikhsan [9].

Untuk merepresentasikan ketidakpastian dan derajat kebenaran pada variabel masukan, digunakan fungsi keanggotaan (*membership function*). Salah satu bentuk yang umum dipakai adalah fungsi segitiga (*triangular membership function*), yang secara matematis dapat dinyatakan sebagai:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \\ 0, & x \geq c \end{cases} \dots\dots\dots(2.5)$$

dengan:

- $\mu_A(x)$ = derajat keanggotaan nilai x terhadap himpunan fuzzy A ,
- a, b, c = parameter bentuk fungsi keanggotaan (titik awal, puncak, dan akhir).

Pada penelitian ini, Fuzzy Sugeno dipilih karena mampu menangani ketidakpastian data pengukuran dan memberikan keputusan yang adaptif terhadap perubahan parameter listrik.

2.9 Konsep Internet of Things (IoT) untuk Monitoring Listrik

Internet of Things (IoT) merupakan paradigma konektivitas di mana perangkat fisik seperti sensor, aktuator, dan mikrokontroler dapat saling berkomunikasi melalui jaringan internet untuk melakukan pengukuran dan kontrol secara otomatis. Dalam sistem monitoring listrik yang dikembangkan pada penelitian ini, IoT memungkinkan akuisisi data real-time dari titik pengukuran menggunakan modul PZEM-004T yang membaca tegangan, arus, daya aktif, energi, frekuensi, dan faktor daya pada sistem satu fasa. Data mentah dari PZEM-004T dikirim ke mikrokontroler ESP32, kemudian diolah dengan algoritma hybrid *Threshold*, *Simple Moving Average*, dan *Fuzzy Sugeno* untuk menghasilkan indeks risiko dan +status kondisi sistem, sebelum

akhirnya diteruskan melalui protokol nirkabel Wi-Fi menuju



platform IoT berbasis *cloud* dan dashboard *Blynk* agar dapat dianalisis dan dipantau oleh pengguna.

Pada sistem satu fasa, pemanfaatan IoT sangat efektif untuk mendeteksi fluktuasi daya, kondisi overload, dan anomali kualitas daya karena memungkinkan pemantauan parameter listrik secara kontinu dan terpusat. Studi karya Pradana et al. (2024) yang menggunakan NodeMCU dan sensor PZEM-004T menunjukkan bahwa data real-time dapat ditampilkan pada aplikasi *Blynk* untuk memonitor daya listrik rumah tangga sekaligus mengestimasi biaya konsumsi energi, sehingga pengguna dapat lebih proaktif mengelola beban [33]. Selanjutnya, penelitian oleh Hermanto dkk. (2022) menunjukkan bahwa penerapan IoT pada pembangkit listrik tenaga surya dan angin memungkinkan pengukuran tegangan, arus, dan daya secara terus-menerus menggunakan arsitektur IoT, sehingga operasional pembangkit menjadi lebih transparan dan responsif terhadap perubahan beban [34].

Di sisi kontrol, Gunawan (Pontianak) mengembangkan sistem berbasis ESP32 dan PZEM-004T yang tidak hanya memantau besaran listrik di pondok pesantren tetapi juga mengendalikan beban melalui relay secara otomatis ketika nilai konsumsi melewati batas tertentu. Sistem tersebut mengimplementasikan peringatan dini (notifikasi) saat terjadi kelebihan beban, sehingga penggunaan energi menjadi lebih efisien dan aman, dan hal ini sejalan dengan konsep penelitian ini yang menargetkan proteksi dan deteksi dini gangguan pada instalasi satu fasa skala kecil. Contoh-contoh tersebut menguatkan bahwa kombinasi ESP32, PZEM-004T, dan IoT merupakan konfigurasi yang tepat untuk monitoring dan pengendalian beban listrik secara real-time [35].

Dengan demikian, penerapan IoT pada penelitian ini memberikan manfaat penting berupa pemantauan parameter listrik secara terus-menerus. Dashboard IoT dirancang untuk menampilkan grafik tegangan, arus, dan daya aktif, serta status sistem sehingga berfungsi sebagai media *early warning system*.

2.10 Komponen Sistem

2.10.1 Komponen Perangkat Keras (Hardware)

a) Mikrokontroler ESP32 Dev Kit V1

Mikrokontroler ESP32 Dev Kit V1 merupakan System-on-Chip (SoC) generasi terbaru yang dikembangkan oleh Espressif Systems untuk

mendukung aplikasi *Internet of Things* (IoT) yang memerlukan konektivitas nirkabel terintegrasi, kemampuan komputasi yang memadai, serta konsumsi daya yang relatif rendah. Perangkat ini dilengkapi prosesor dual-core Tensilica Xtensa LX6 dengan frekuensi kerja hingga 240 MHz dan modul komunikasi Wi-Fi 802.11 b/g/n serta Bluetooth/Bluetooth Low Energy (BLE) dalam satu chip, sehingga sangat sesuai digunakan sebagai pusat pemrosesan pada sistem monitoring parameter listrik satu fasa berbasis IoT yang menuntut operasi real-time dan komunikasi data yang kontinu [36].



Gambar 2. 2 Modul Esp 32 Dev Kit V1

Sumber : www.technolabelectronics.com

Dari sisi fungsional, ESP32 menyediakan beragam antarmuka komunikasi seperti UART, SPI, I²C, I²S, PWM, serta Analog-to-Digital Converter (ADC) 12-bit yang memungkinkan integrasi langsung dengan berbagai jenis sensor dan modul pengukuran energi. Pada penelitian ini, antarmuka UART dimanfaatkan untuk berkomunikasi dengan modul PZEM-004T guna memperoleh data tegangan, arus, daya aktif, energi, frekuensi, dan faktor daya, sedangkan kemampuan pemrosesan internal ESP32 Dev Kit V1 digunakan untuk menjalankan algoritma hybrid yang menggabungkan metode threshold, Simple Moving Average, dan Fuzzy Sugeno sebelum hasil perhitungan dikirimkan melalui koneksi Wi-Fi menuju server atau dashboard IoT. Dengan demikian, ESP32 tidak hanya berperan sebagai pengumpul data, tetapi juga sebagai unit pemroses dan penghubung utama yang mengintegrasikan akuisisi data, analisis pra-gangguan, dan penyajian informasi deteksi dini *overload* serta *power fluctuation* pada sistem tenaga listrik satu fasa yang menjadi fokus skripsi ini.

b) Sensor PZEM-004t

Modul PZEM-004T merupakan sensor energi AC yang dirancang khusus untuk mengukur beberapa parameter kelistrikan sekaligus, seperti tegangan, arus, daya aktif, energi, frekuensi, dan faktor daya pada sistem satu fasa secara terintegrasi. Modul ini dikembangkan untuk aplikasi monitoring dan manajemen energi berbasis mikrokontroler dan IoT, sehingga keluaran datanya dapat langsung diolah maupun dikirim ke sistem pemantauan jarak jauh. Dalam penelitian "*Optimization of IoTbased monitoring system for automatic power factor correction using PZEM-004T sensor*" oleh Maman Somantri dkk., PZEM-004T digunakan sebagai sensor utama dalam sistem IoT berbasis ESP32 untuk mengukur parameter-parameter tersebut secara real-time, dan implementasinya berhasil meningkatkan faktor daya rata-rata sebesar 48,77% serta menurunkan konsumsi arus hingga 39,90%, yang menunjukkan bahwa PZEM-004T memiliki akurasi dan stabilitas yang memadai untuk aplikasi monitoring dan manajemen energi [37].



Gambar 2. 3 Modul PZEM-004T

Sumber : www.electrobbs.com

Menurut datasheet resmi PZEM-004T versi V3.0, modul ini dirancang untuk mengukur tegangan AC pada rentang sekitar 80–260 V, arus hingga 100 A untuk varian berbasis Current Transformer (CT), serta daya aktif dan energi hingga 9.999,99 kWh dengan frekuensi kerja 45–65 Hz dan pengukuran faktor daya dari 0,00 hingga 1,00 dengan akurasi sekitar $\pm 0,5\%$ untuk sebagian besar parameter. PZEM-004T juga dilengkapi antarmuka komunikasi serial berbasis Modbus-RTU melalui UART/RS485, sehingga dapat diintegrasikan dengan mikrokontroler ESP32 yang digunakan dalam penelitian ini untuk mentransfer data pengukuran ke algoritma. Dengan rentang ukur yang sesuai dengan standar tegangan satu fasa di Indonesia dan akurasi yang cukup tinggi, modul ini menjadi komponen yang tepat untuk mendukung sistem monitoring dan deteksi dini gangguan *overload* serta power *fluctuation* yang dirancang pada skripsi ini.[38].

c) **Current Transformer (CT Sensor)**

CT (*Current Transformer*) merupakan suatu jenis transformator pengukuran yang digunakan untuk mengukur arus AC besar dengan mentransformasikan arus pada sisi primer menjadi arus sekunder yang lebih kecil dan proporsional, sehingga dapat dibaca dengan aman oleh rangkaian instrumen atau modul sensor. Dengan cara ini, CT memungkinkan sistem pengukuran memperoleh informasi besaran arus tanpa harus menghubungkan perangkat elektronik langsung ke penghantar berarus besar, sehingga meningkatkan aspek keselamatan dan keandalan pengukuran [39].



Gambar 2. 4 Modul CT

Sumber : www.sclsystem.com

Dalam penelitian ini, CT digunakan sebagai elemen pengukuran arus pada modul PZEM-004T varian CT, di mana arus beban satu fasa yang mengalir pada instalasi utama dikopel melalui CT dan dikonversi menjadi arus sekunder yang sesuai dengan rentang input PZEM-004T dan sistem elektronik berbasis ESP32. Konfigurasi tersebut memastikan bahwa nilai arus yang digunakan dalam perhitungan daya aktif, analisis *Simple Moving Average*, dan penentuan status risiko oleh Fuzzy Sugeno merepresentasikan kondisi aktual beban, sehingga deteksi dini terhadap gejala *overload* dan *power fluctuation* dapat dilakukan secara lebih akurat pada instalasi listrik satu fasa yang menjadi objek penelitian.

2.10.2 Komponen Perangkat Lunak (Software)

a) **Arduino IDE**

Arduino Integrated Development Environment (IDE) merupakan perangkat lunak open-source yang digunakan untuk menulis, mengompilasi, dan mengunggah program ke berbagai papan mikrokontroler, termasuk keluarga Arduino dan papan berbasis ESP32, dengan sintaks utama berbasis bahasa C/C++. Arduino IDE menyediakan antarmuka yang relatif sederhana, dukungan berbagai sistem operasi, serta integrasi langsung dengan toolchain yang dibutuhkan sehingga memudahkan proses pengembangan dan pengujian kode dalam konteks penelitian dan pendidikan teknik [40].

Dalam penelitian ini, Arduino IDE dimanfaatkan sebagai lingkungan utama untuk pengembangan firmware pada mikrokontroler ESP32 yang mengelola proses akuisisi data dari PZEM-004T, penerapan algoritma metode, serta pengiriman data ke platform IoT untuk monitoring real-time. Ketersediaan pustaka (*library*) yang luas untuk ESP32, PZEM-004T, komunikasi Wi-Fi, dan protokol HTTP mempercepat proses implementasi sistem, sedangkan ekosistem komunitas dan dokumentasi yang matang menjadikan Arduino IDE salah satu alat standar dalam penelitian instrumentasi, otomasi, dan aplikasi STEM modern hingga beberapa tahun terakhir.

b) **Blynk**

Blynk merupakan platform *Internet of Things* (IoT) berbasis cloud yang memungkinkan pemantauan dan pengendalian perangkat mikrokontroler, seperti ESP32, secara real-time melalui aplikasi mobile maupun antarmuka web. Platform ini banyak digunakan dalam penelitian sistem kendali dan monitoring karena menyediakan dashboard visual yang

fleksibel, dukungan konektivitas internet yang terintegrasi, serta fitur notifikasi otomatis untuk kondisi tertentu sehingga memudahkan implementasi sistem IoT pada bidang kelistrikan dan energi.

Berdasarkan Penelitian yang dipublikasikan dalam *AIP Conference Proceedings* tahun 2023 menunjukkan bahwa *Blynk Cloud* efektif digunakan pada sistem otomasi rumah pintar karena konektivitas yang stabil, tampilan dashboard yang intuitif, dan respon cepat terhadap perubahan kondisi sensor, sehingga memperkuat kelayakan penggunaan Blynk sebagai platform monitoring real-time pada sistem kelistrikan dan energi seperti yang dikembangkan dalam skripsi. Oleh karena itu pada penelitian ini Blynk sebagai interface monitoring parameter listrik dan status sistem [41].

2.11 Landasan Skenario Pengujian Sistem

2.11.2 Pengujian Pengukuran Sensor

Pengujian sensor dilakukan untuk memastikan bahwa nilai tegangan, arus, dan daya yang dibaca oleh sistem monitoring memiliki akurasi yang memadai terhadap alat ukur acuan, sehingga layak digunakan dalam aplikasi pemantauan fluktuasi daya aktif satu fasa. Proses pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap nilai yang diperoleh dari alat ukur standar (misalnya multimeter atau power meter kalibrasi) pada beberapa titik pengukuran, kemudian menghitung persentase error untuk setiap pengamatan.

Secara umum, persentase error dapat dinyatakan sebagai:

$$\%Error = \frac{|X_{\text{sensor}} - X_{\text{acuan}}|}{X_{\text{acuan}}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.6)$$

dengan:

- X_{sensor} = nilai parameter (tegangan, arus, atau daya) yang dibaca sensor,
- X_{acuan} = nilai parameter yang diukur menggunakan alat ukur standar.

Pada penelitian sistem monitoring dan kontrol daya listrik berbasis Internet of Things, yang mengintegrasikan mikrokontroler (misalnya ESP32) dengan sensor PZEM-004T untuk pengukuran tegangan, arus, dan daya,

dilaporkan bahwa hasil pengujian sensor tegangan menunjukkan galat rata-



rata sekitar 1–2% dan dinyatakan masih dalam batas toleransi untuk tujuan monitoring. Nilai galat tersebut dianggap memadai karena sistem ditujukan untuk pemantauan konsumsi daya dan kondisi beban secara real-time, bukan untuk keperluan metrologi presisi tinggi.

Dengan mengacu pada hasil tersebut, dalam penelitian ini batas toleransi error pembacaan sensor ditetapkan sebesar 5% untuk parameter tegangan, arus, dan daya aktif. Selama nilai persentase error hasil pengujian berada di bawah batas tersebut, sensor dinyatakan memenuhi syarat akurasi untuk digunakan dalam sistem monitoring fluktuasi daya aktif. Penetapan batas toleransi ini sejalan dengan praktik pada penelitian sejenis berbasis IoT, di mana galat sensor pada kisaran 1–2% dinilai sangat baik dan galat hingga 5% masih dapat diterima untuk aplikasi pemantauan energi listrik tegangan rendah [42].

2.11.1 Landasan Pengujian Kondisi Normal

Kondisi operasi normal pada sistem listrik satu fasa ditunjukkan oleh parameter kelistrikan yang masih berada dalam batas operasi yang diperbolehkan. Berdasarkan SPLN 1:1995, tegangan nominal 220 V memiliki toleransi sebesar -10% hingga +5%, sehingga rentang tegangan operasi normal berada pada 198–231 V. Selain itu, nilai arus dan daya aktif yang terukur masih berada pada rentang nominal sesuai karakteristik pembebanan dan kapasitas sistem yang digunakan [1].

Kesesuaian parameter kelistrikan dengan batas operasi yang ditetapkan menunjukkan bahwa sistem beroperasi dalam kondisi stabil serta memiliki tingkat keandalan yang memadai. Kondisi operasi normal digunakan sebagai kondisi acuan (baseline) untuk mengevaluasi perubahan parameter kelistrikan serta menilai kemampuan sistem dalam mendeteksi kondisi *power fluctuation* dan *overload*.

2.11.2 Landasan Pengujian Overload (Beban Lebih)

Kondisi *Overload* merupakan kondisi ketika arus yang mengalir melebihi kapasitas hantar arus penghantar atau kemampuan pengaman yang digunakan. Kondisi tersebut umumnya disebabkan oleh peningkatan pembebanan yang melampaui kapasitas sistem sehingga dapat meningkatkan temperatur penghantar, memperbesar rugi-rugi daya, serta mempercepat degradasi peralatan listrik [43].

Peningkatan arus akibat pembebanan berlebih menyebabkan kenaikan temperatur konduktor dan penurunan keandalan sistem, sehingga diperlukan mekanisme deteksi dini untuk mencegah terjadinya kerusakan yang lebih serius. Berdasarkan karakteristik tersebut, pengujian kondisi overload diperlukan untuk mengevaluasi kemampuan metode hybrid dalam mengidentifikasi peningkatan arus dan perubahan daya yang mengarah pada kondisi beban berlebih. Pada Penelitian ini penambahan daya beban dilakukan secara bertahap menggunakan pengatur tegangan modul Dimmer AC.

2.11.3 Landasan Pengujian *Power Fluctuation* (Fluktuasi Daya)

Fluktuasi daya dalam sistem tenaga listrik ditandai oleh perubahan daya aktif yang dipengaruhi oleh variasi tegangan, arus, dan faktor daya. Fenomena ini dapat mengindikasikan ketidakstabilan beban yang berpotensi menurunkan kualitas daya sistem [44].

Berdasarkan standar PLN dan literatur IEEE terkait kualitas daya, fluktuasi tegangan umumnya berada pada kisaran sekitar 0,9–1,1 pu atau sekitar -10% hingga +10% dari tegangan nominal, sedangkan fluktuasi yang lebih besar menunjukkan adanya gangguan serius pada sistem. Dalam Penelitian ini pengujian *power fluctuation* menggunakan Dimmer AC (Pengatur tegangan), Perubahan daya dari variasi tegangan yang diatur menggunakan modul dimmer AC.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)