

Perancangan Sistem *Smart Grid* Dinamis Berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk Optimalisasi Distribusi Beban Listrik

Chiesa Virgiawan Pasya¹
Aan Burhanuddin²
Agus Mukhtar³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Mesin, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang, Jl. Sidodari Timur No.24, Semarang

²Korespondensi penulis: aanburhanudin@upgris.ac.id

Article Info: Received: September 19, 2025; Accepted: November 06, 2025; Available online: November 12, 2025
DOI: 10.30588/jeemm.v9i2.2420

Abstract: The increasing demand for electrical energy necessitates the transformation of conventional power systems into smarter and more efficient infrastructures. This study aims to design and implement a dynamic smart grid system based on the Internet of Things (IoT) to optimize real-time load distribution. The research methodology involves the integration of a system comprising a solar panel, battery, ESP32 microcontroller, and several sensors (PZEM-004t, ACS712, and voltage sensors) for monitoring electrical parameters. Sensor data are wirelessly transmitted to an IoT dashboard, which serves as the interface for monitoring and control. The PZEM-004t sensor demonstrated high accuracy in voltage measurement, with a deviation of just 1V compared to a conventional voltmeter, while the voltage sensor exhibited slightly lower values at measurements above 25V. Daily consumption data from the dashboard indicated an increased utilization of solar energy, with the discrepancy between Indonesia Power (PLN) and Solar Panels (PLTS) power usage ranging from 5,800 Wh to 5,300 Wh during testing. The findings confirm that the proposed IoT-based smart grid system effectively optimizes load distribution, enhances energy efficiency, and supports the reliable integration of renewable energy sources into the power grid.

Keywords: Smart grid, Internet of Things (IoT), Load Distribution, Renewable Energy, Solar Panels (PLTS), Dynamic Load Management, PZEM-004t Sensor, ACS712 Sensor, Energy Efficiency

Abstrak: Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat menuntut transformasi sistem kelistrikan konvensional menjadi lebih cerdas dan efisien. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem *smart grid* dinamis berbasis *Internet of Things* (IoT) guna mengoptimalkan distribusi beban listrik secara waktu nyata. Metode penelitian meliputi perancangan sistem integrasi yang terdiri dari panel surya, baterai, mikrokontroler ESP32, dan sejumlah sensor (PZEM-004t, ACS712, dan sensor tegangan) untuk memantau parameter kelistrikan. Data dari sensor dikirimkan secara nirkabel ke sebuah *dashboard* IoT yang berfungsi sebagai antarmuka pemantauan dan kontrol. Sensor PZEM-004t menunjukkan akurasi tinggi dalam pengukuran tegangan, dengan selisih hanya 1V dibandingkan Voltmeter. Sensor tegangan mempunyai nilai lebih rendah pada pengukuran di atas 25V. Data konsumsi harian dari *dashboard* menunjukkan peningkatan pemanfaatan energi surya, selisih penggunaan listrik antara PLN dan PLTS selama pengujian antara 5.800 Wh sampai dengan 5.300 Wh. Simpulan dari penelitian ini adalah sistem *smart grid* berbasis IoT yang diusulkan terbukti efektif dalam mengoptimalkan distribusi beban, meningkatkan efisiensi energi, dan memfasilitasi integrasi sumber energi terbarukan yang lebih andal ke dalam sistem ketenagalistrikan.

Kata Kunci: Smart grid, Internet of Things (IoT), Energi Terbarukan, Panel Surya (PLTS), Manajemen Beban Dinamis, Sensor PZEM-004t, Sensor ACS712, Efisiensi Energi.

I. Pendahuluan

Kebutuhan akan energi listrik terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi, industrialisasi, dan perkembangan teknologi di berbagai sektor kehidupan (Haryant & Khristiana, 2024; Rajagukguk et

al., 2015). Sistem tenaga listrik konvensional yang selama ini menjadi tulang punggung pasokan energi di banyak negara menghadapi berbagai tantangan yang semakin kompleks.

Grid listrik tradisional dirancang untuk aliran energi satu arah dari pembangkit ke konsumen, tanpa kemampuan untuk beradaptasi dengan perubahan pola konsumsi yang dinamis atau mengintegrasikan sumber energi terbarukan yang bersifat intermiten (Gabbar, 2017). Akibatnya, sering terjadi ketidakseimbangan antara pasokan dan permintaan yang menyebabkan masalah seperti pemadaman listrik, kualitas daya yang buruk, dan inefisiensi dalam distribusi energi (Gorman, 2022).

Salah satu tantangan utama dalam sistem tenaga listrik saat ini adalah distribusi beban yang tidak merata. Pada jam-jam tertentu, terjadi lonjakan konsumsi listrik yang signifikan (*peak load*) sementara di waktu lain terjadi penurunan drastis (*off-peak load*) (Birk Jones et al., 2022).

Fluktuasi beban ini menyebabkan stres pada infrastruktur jaringan, meningkatkan risiko kegagalan peralatan, dan memaksa penyedia layanan listrik untuk mengoperasikan pembangkit cadangan yang biayanya tinggi hanya untuk memenuhi permintaan puncak sementara (Gorman, 2022). Selain itu, ketidakmampuan sistem untuk merespons perubahan beban secara waktu nyata mengakibatkan pemborosan energi dan meningkatkan emisi karbon akibat pengoperasian pembangkit yang tidak efisien (Bhatia et al., 2024; Fernandez et al., 2024).

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) membuka peluang baru untuk mengatasi berbagai tantangan dalam sistem tenaga listrik. IoT memungkinkan interkoneksi antar perangkat, sensor, dan sistem yang dapat mengumpulkan, mentransmisikan, dan menganalisis data secara waktu nyata. Dalam konteks *smart grid*, teknologi IoT dapat memberikan visibilitas penuh terhadap kondisi jaringan, pola konsumsi, dan kinerja sistem secara keseluruhan (Wibowo, 2023). Dengan informasi ini, pengelola sistem dapat mengambil keputusan yang lebih baik dalam mengalokasikan sumber daya, mengoptimalkan distribusi beban, dan meningkatkan efisiensi operasional.

Di Indonesia, tantangan dalam distribusi beban listrik semakin kompleks mengingat karakteristik geografis kepulauan yang tersebar dan pertumbuhan ekonomi yang tidak merata antar wilayah (Sani Alhusain Tantangan, 2020).

Beberapa daerah mengalami kelebihan pasokan sementara daerah lain masih kekurangan akses listrik yang andal. Implementasi *smart grid* berbasis IoT diharapkan dapat menjadi solusi untuk menciptakan sistem tenaga listrik yang lebih fleksibel, andal, dan efisien, serta mampu mengakomodasi integrasi sumber energi terbarukan yang semakin penting dalam upaya mencapai target energi bersih dan berkelanjutan (Alnavis et al., 2024).

Perkembangan penelitian dan implementasi *smart grid* berbasis IoT telah mengalami kemajuan signifikan dalam beberapa tahun terakhir. *Smart grid* merupakan evolusi dari grid listrik konvensional yang mengintegrasikan teknologi informasi dan komunikasi untuk meningkatkan efisiensi, keandalan, dan keberlanjutan sistem tenaga listrik (Prawiyogi & Anwar, 2023).

Menurut penelitian terkini, *smart grid* memungkinkan komunikasi dua arah antara penyedia dan konsumen listrik, sehingga menciptakan ekosistem energi yang lebih interaktif dan responsif. Salah satu komponen kunci dalam *smart grid* adalah kemampuan untuk memantau dan mengontrol distribusi beban secara waktu nyata (El Maghraoui et al., 2024).

Penelitian tentang perancangan *smart grid* dengan distribusi beban listrik telah menunjukkan bahwa implementasi sistem cerdas dapat mengurangi ketidakseimbangan beban hingga 30% dan meningkatkan efisiensi energi secara keseluruhan. Sistem ini memanfaatkan jaringan sensor canggih yang ditempatkan di berbagai titik pada jaringan distribusi untuk mengumpulkan data tentang tegangan, arus, frekuensi, dan faktor daya secara kontinu (Ruvio et al., 2024).

Teknologi IoT memainkan peran sentral dalam transformasi *smart grid* modern (Wibowo, 2023). Perangkat IoT seperti *smart meter*, sensor, dan aktuator memungkinkan pengumpulan data granular tentang konsumsi energi pada level individu, sementara platform analitik data memproses informasi ini untuk mengidentifikasi pola, anomali, dan peluang optimasi (Lubis, 2024). Menurut studi tentang peran IoT dalam teknologi *smart grid*, implementasi IoT dapat meningkatkan visibilitas jaringan hingga 95%

dan mengurangi waktu respons terhadap gangguan dari jam menjadi menit (Alfadani et al., 2025; Khairina et al., 2025).

Penelitian tentang perancangan *smart grid* dengan distribusi beban listrik menunjukkan bahwa implementasi sistem ini dapat mengurangi kehilangan transmisi hingga 15% dan meningkatkan stabilitas jaringan secara signifikan (Maruf et al., 2020).

Integrasi sumber energi terbarukan merupakan aspek penting dalam pengembangan *smart grid* modern. Sumber energi seperti surya dan angin memiliki karakteristik intermiten yang menantang untuk diintegrasikan ke dalam jaringan konvensional. Namun, dengan kemampuan prediksi dan manajemen beban yang canggih, *smart grid* berbasis IoT dapat mengoptimalkan pemanfaatan energi terbarukan sambil menjaga stabilitas sistem.

Penelitian tentang strategi integrasi energi terbarukan berbasis *smart grid* menunjukkan bahwa pendekatan ini dapat meningkatkan penetrasi energi terbarukan hingga 40% tanpa mengorbankan keandalan sistem (Noor & Rahman, 2023). Meskipun telah ada banyak kemajuan dalam penelitian dan implementasi *smart grid* berbasis IoT, masih terdapat beberapa tantangan yang perlu diatasi. Penelitian lanjutan diperlukan untuk mengembangkan solusi yang mengatasi tantangan ini sambil memaksimalkan manfaat *smart grid* berbasis IoT untuk distribusi beban listrik yang optimal.

Berdasarkan latar belakang masalah dan tinjauan state of the art yang telah dipaparkan, penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem *smart grid* dinamis berbasis *Internet of Things* (IoT) yang mampu mengoptimalkan distribusi beban listrik secara waktu nyata. Tujuan ini dicapai melalui beberapa sasaran spesifik yang mencakup pengembangan arsitektur sistem yang terintegrasi, implementasi algoritma manajemen beban yang cerdas, serta validasi kinerja sistem melalui simulasi dan pengujian.

II. Bahan dan Metode

2.1 Bahan Penelitian

Penelitian ini menggunakan beberapa komponen utama untuk merancang sistem *smart grid* dinamis berbasis *Internet of Things* (IoT), yang bertujuan untuk mengoptimalkan distribusi beban listrik. Komponen-komponen tersebut terdiri dari:

A. Panel Surya

Sel surya beroperasi berdasarkan prinsip persambungan semikonduktor tipe-p dan tipe-n (p-n junction). Ketika foton dari sinar matahari mengenai lapisan penyerap (absorber), foton dengan energi yang setara atau melebihi *band-gap* semikonduktor akan membebaskan elektron dari ikatan atom, membentuk pasangan elektron dan *hole*. Elektron (pembawa negatif) bergerak menuju sisi n, sementara *hole* (pembawa positif) bergerak ke sisi p, menciptakan beda potensial di kedua sisi persambungan. Perbedaan potensial ini menghasilkan arus listrik yang dapat dialirkan ke rangkaian luar. Energi foton yang melebihi *band-gap* akan diubah menjadi panas, yang dapat menurunkan efisiensi sel surya (Sidoekso et al., 2010).

B. Baterai

Baterai berfungsi menyimpan energi dari modul surya untuk digunakan saat tidak ada sinar matahari. Kapasitas baterai, yang diukur dalam Ah (Ampere hours), dihitung dengan membagi total konsumsi harian dengan tegangan baterai. Beberapa jenis baterai, seperti lead acid, alkalin, NiFe, NiCad, dan Li-ion, memiliki kelebihan dan kekurangan teknis serta ekonomis. Kapasitas baterai yang dibutuhkan bergantung pada pola operasi PLTS dan seberapa banyak energi yang dikeluarkan per siklus pengisian (Effendi et al., 2022).

C. Relay

Relai meruokan sebuah komponen elektronika yang berfungsi sebagai saklar atau switch elektrik yang dapat dioperasikan dengan cara memberikan logika High/Low pada program (Yahya et al., 2021).

D. Sensor PZEM-004t

Sensor PZEM-004t digunakan untuk mengukur tegangan, arus, daya aktif, dan konsumsi daya (Wh), serta menampilkan konsumsi energi listrik secara waktu nyata. Modul ini terdiri dari dua kabel: satu untuk terminal masukan tegangan dan arus, serta kabel komunikasi serial. PZEM-004t mendukung komunikasi data serial antar perangkat keras melalui port USB atau RS-232, dengan papan pin TTL untuk kebutuhan komunikasi (Amru et al., 2025).

E. Sensor ACS712

CS712 adalah IC sensor arus yang menggantikan transformator arus besar dengan ukuran yang lebih kecil. Sensor ini menggunakan efek Hall untuk mendeteksi medan magnetik sekitar arus dan mengonversinya menjadi tegangan linier yang sebanding dengan perubahan arus. Output sensor ini berupa sinyal tegangan DC yang dibaca oleh mikrokontroler (Suteja & Antara, 2021).

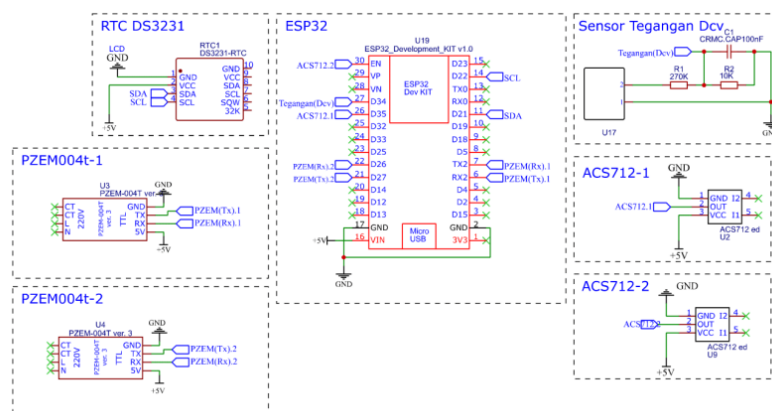
F. Sensor Tegangan

Sensor tegangan mengukur tegangan menggunakan prinsip rangkaian pembagi tegangan, di mana tegangan sumber dibagi oleh resistor untuk menurunkan tegangan menjadi 0 hingga 3,3 Volt DC, sehingga dapat dibaca oleh mikrokontroler. Fungsi utama pembagi tegangan adalah mengubah tegangan besar menjadi tegangan lebih kecil yang diperlukan oleh komponen lain dalam rangkaian elektronik (Prihasworo et al., 2020).

2.2 Metode Penelitian

Perancangan sistem *smart grid* dengan distribusi beban listrik berbasis IoT dimulai dengan perencanaan untuk memastikan bahwa seluruh tahapan pengembangan dapat berjalan secara teratur dan sistematis. Proses dimulai dengan pemilihan dan instalasi perangkat keras yang mencakup sensor-sensor untuk mengukur berbagai parameter penting, seperti tegangan, arus, dan daya. Sensor ini kemudian terhubung dengan mikrokontroler yang berfungsi untuk mengumpulkan dan mengolah data secara waktu nyata. Data yang telah diproses ini kemudian dikirimkan melalui jaringan IoT ke sistem pusat untuk dianalisis dan dipantau.

Pada tahap berikutnya, perangkat lunak dikembangkan untuk memproses data yang dikumpulkan dan untuk mengatur distribusi beban listrik dengan cara yang efisien. Dengan bantuan algoritma tertentu, sistem ini dapat menyesuaikan aliran daya secara otomatis berdasarkan kondisi yang ada, seperti tingkat permintaan energi dan status jaringan. Semua perangkat ini bekerja secara terkoordinasi, memungkinkan sistem *smart grid* untuk mengelola beban listrik dengan lebih baik dan lebih efisien, mengurangi gangguan, dan meningkatkan kualitas pelayanan energi kepada konsumen. Dengan demikian, penerapan teknologi IoT dalam *smart grid* tidak hanya meningkatkan efisiensi, tetapi juga menawarkan pemantauan dan kontrol yang lebih fleksibel serta responsif terhadap perubahan kondisi jaringan.



Gambar 1. Rangkaian Elektronik (Viery, 2022)

Gambar 1 merupakan sebuah sistem pemantauan konsumsi daya yang melibatkan beberapa komponen utama, di mana ESP32 berfungsi sebagai mikrokontroler utama yang mengolah data dari berbagai sensor yang terhubung. Sistem ini dimulai dengan penggunaan RTC DS3231, yang berfungsi mengatur waktu nyata dan mengirimkan informasi waktu ke ESP32 melalui pin SDA dan SCL. Data waktu ini kemudian dapat digunakan dalam aplikasi untuk pencatatan atau pengaturan waktu dalam sistem. ESP32, dengan kemampuannya dalam memproses data, terhubung dengan sensor-sensor lainnya, yaitu PZEM004t, ACS712, dan sensor tegangan DC.

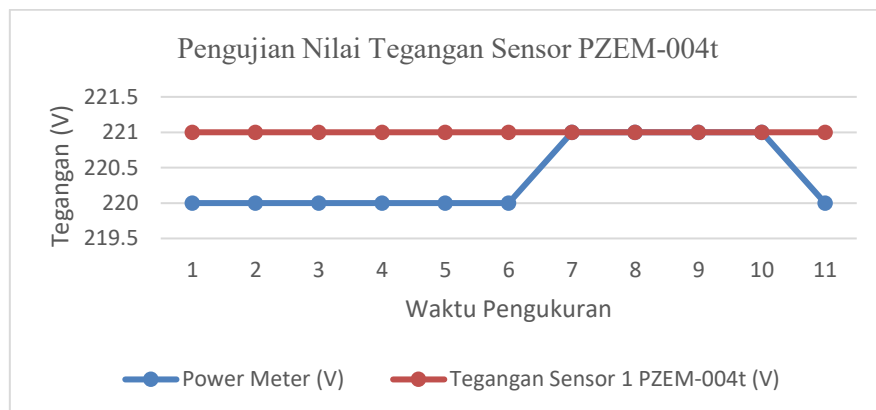
PZEM004t-1 dan PZEM004t-2 digunakan untuk mengukur tegangan, arus, daya aktif, dan konsumsi daya (Wh) dalam sistem. Sensor-sensor ini menghubungkan output TX dan RX untuk komunikasi data serial dengan ESP32, memungkinkan pembacaan konsumsi energi listrik secara waktu nyata. Selain itu, ACS712-1 dan ACS712-2 memanfaatkan prinsip efek Hall untuk mengukur arus, memberikan output analog yang sebanding dengan besarnya arus yang mengalir dalam sistem. Dua sensor ACS712 ini digunakan untuk memantau arus di jalur yang berbeda, memberikan informasi penting untuk pengelolaan konsumsi energi. Terakhir, sensor tegangan DC digunakan untuk mengukur tegangan dalam rangkaian, menggunakan resistor pembagi tegangan agar dapat dibaca dengan tepat oleh ESP32.

Secara keseluruhan, sistem ini memungkinkan pemantauan dan pengukuran konsumsi daya, arus, dan tegangan secara waktu nyata, dengan ESP32 yang berperan sebagai pengendali utama yang mengolah data dari berbagai sensor. Dengan demikian, sistem ini memberikan solusi untuk pemantauan konsumsi energi secara efisien dan dapat diandalkan.

III. Hasil dan Pembahasan

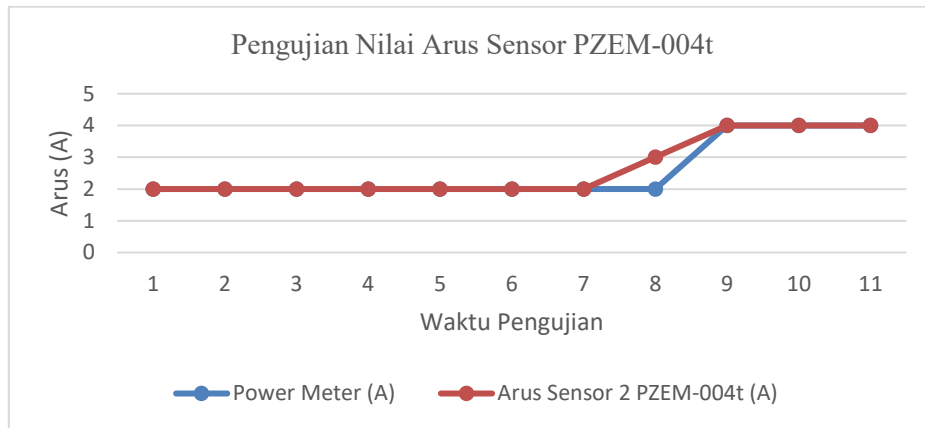
3.1 Pengujian Sensor PZEM-004t

Pengujian dilakukan pada dua sensor PZEM-004t untuk mengukur sensitivitas dan memastikan tingkat ketelitian pembacaan nilai tegangan, arus, dan frekuensi yang dihasilkan oleh sensor tersebut dibandingkan dengan alat ukur lainnya. Sensor PZEM-004t ini dirancang untuk membaca parameter listrik bolak-balik (AC) secara akurat.



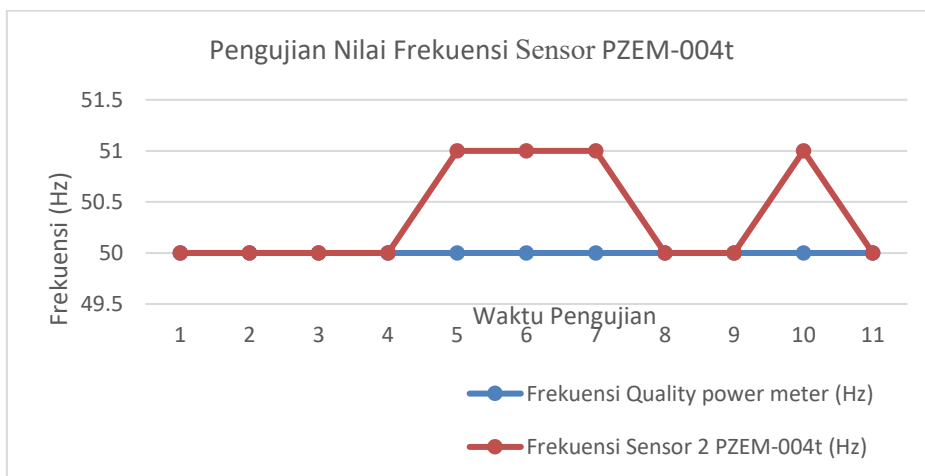
Gambar 2 Grafik Pengujian Nilai Tegangan Sensor PZEM-004t

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan pada Gambar 2, terlihat bahwa tegangan yang diukur dengan menggunakan Volt Meter dan Sensor 1 PZEM-004t memiliki nilai yang sangat mendekati satu sama lain. Pada seluruh percobaan, tegangan yang tercatat pada Volt Meter tetap berada pada nilai 220V hingga 221V, sementara tegangan yang tercatat pada Sensor 1 PZEM-004t stabil di angka 221V. Hal ini menunjukkan bahwa sensor PZEM-004t memiliki ketelitian yang sangat baik dalam mengukur tegangan listrik, dengan perbedaan nilai yang sangat kecil dibandingkan dengan alat ukur konvensional, yakni Volt Meter. Perbedaan kecil ini menunjukkan bahwa sensor PZEM-004t cukup sensitif dan dapat digunakan dengan akurat dalam pengukuran tegangan listrik bolak-balik (AC), serta memberikan hasil yang konsisten sepanjang percobaan.



Gambar 3 Grafik Pengujian Nilai Arus Sensor PZEM-004t

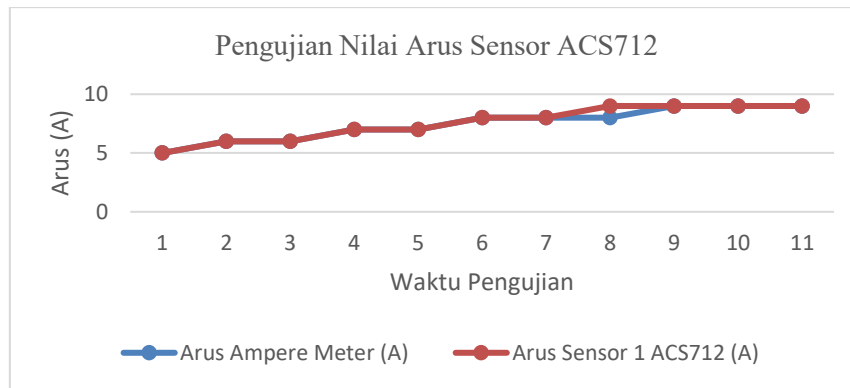
Gambar 3 merupakan hasil pengujian arus dengan menggunakan power meter dan Sensor 2 PZEM-004t, terlihat bahwa kedua alat menunjukkan nilai yang hampir identik pada setiap percobaan. Pada percobaan 0 hingga 6, baik power meter maupun sensor PZEM-004t mencatat arus sebesar 2 A. Selanjutnya, pada percobaan ke-7 terjadi sedikit perbedaan, di mana power meter masih mencatat 2 A, sementara PZEM-004t menunjukkan 3 A. Namun, mulai percobaan ke-8 hingga ke-10, kedua alat kembali konsisten dengan catatan arus sebesar 4 A. Hal ini membuktikan bahwa sensor PZEM-004t memiliki tingkat akurasi yang tinggi dan mampu mengikuti perubahan arus secara waktu nyata, meskipun terdapat sedikit deviasi pada titik tertentu. Secara keseluruhan, sensor ini dapat diandalkan untuk mengukur arus listrik bolak-balik (AC) dengan hasil yang mendekati alat ukur standar.



Gambar 4 Grafik Pengujian Nilai Frekuensi Sensor PZEM-004t

Gambar 4 adalah hasil pengujian kualitas arus yang dilakukan menggunakan power meter dan Sensor 2 PZEM-004t, terlihat bahwa kedua alat ukur menunjukkan hasil yang hampir identik dalam mengukur frekuensi. Power meter mencatatkan frekuensi yang stabil di angka 50 Hz sepanjang percobaan. Sementara itu, Sensor 2 PZEM-004t menunjukkan sedikit fluktuasi dengan nilai frekuensi yang sebagian besar tercatat di 50 Hz, namun ada beberapa titik di mana nilai frekuensinya mencapai 51 Hz, yaitu pada percobaan ke-4, 5, 6, dan 9. Perbedaan kecil ini menunjukkan bahwa meskipun Sensor 2 PZEM-004t dapat memberikan pengukuran yang cukup akurat, terdapat sedikit deviasi yang mungkin disebabkan oleh karakteristik sensor atau variasi dalam pembacaan alat. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa Sensor 2 PZEM-004t dapat diandalkan untuk mengukur frekuensi dengan toleransi yang sangat kecil dibandingkan dengan power meter yang lebih stabil.

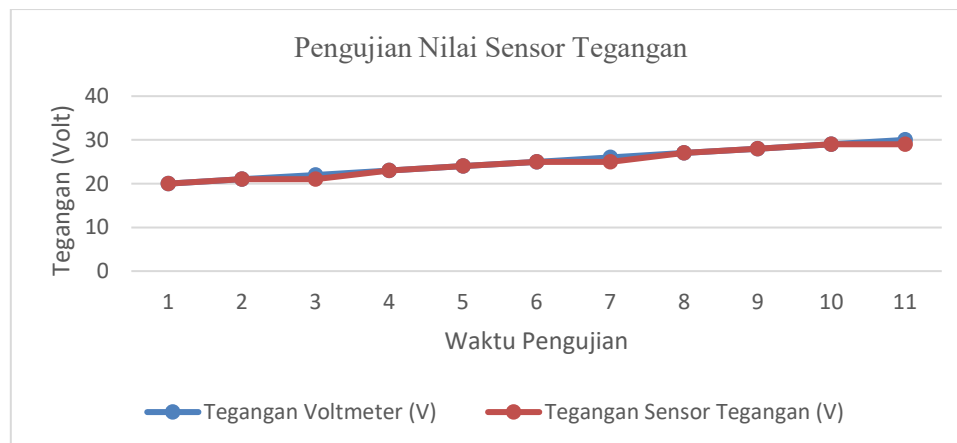
3.2 Pengujian Sensor ACS712



Gambar 5 Grafik Pengujian Nilai Arus Sensor ACS712

Gambar 5 merupakan hasil pengujian kualitas arus dengan menggunakan **Ampere Meter** dan **Sensor 1 ACS712**, terlihat bahwa kedua alat menunjukkan hasil yang konsisten dan hampir identik sepanjang percobaan. Pada percobaan pertama hingga keenam, baik Ampere Meter maupun Sensor 1 ACS712 mencatatkan arus dengan nilai yang sama, yaitu 5 A pada percobaan pertama, 6 A pada percobaan kedua dan ketiga, serta 7 A pada percobaan keempat dan kelima. Pada percobaan ketujuh, nilai arus tercatat 8 A pada kedua alat ukur. Selanjutnya, pada percobaan kedelapan hingga kesepuluh, kedua alat mengukur arus sebesar 9 A.

Perbedaan antara hasil pengukuran Ampere Meter dan Sensor 1 ACS712 sangat kecil, menunjukkan bahwa sensor ACS712 memiliki tingkat akurasi yang tinggi dalam mengukur arus. Fluktuasi yang terjadi antara kedua alat sangat minimal, dan perbedaan hanya tercatat pada percobaan ke-7 yang disebabkan oleh variasi pengukuran yang sangat kecil. Secara keseluruhan, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa Sensor 1 ACS712 mampu mengukur arus dengan hasil yang sangat mirip dengan alat ukur konvensional seperti Ampere Meter, menjadikannya pilihan yang dapat diandalkan dalam aplikasi yang memerlukan pengukuran arus listrik secara waktu nyata.

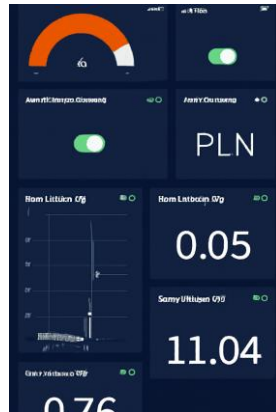


Gambar 6 Grafik Pengujian Nilai Sensor Tegangan

Gambar 6 adalah hasil pengujian tegangan menggunakan Voltmeter dan Sensor Tegangan, terlihat bahwa kedua alat pengukur memberikan hasil yang hampir identik sepanjang percobaan. Pada percobaan pertama hingga keenam, nilai tegangan yang tercatat pada Voltmeter dan Sensor Tegangan menunjukkan nilai yang sama, yakni 20 V hingga 25 V. Namun, pada percobaan ketujuh hingga kesepuluh, ada sedikit perbedaan di mana Sensor Tegangan mencatatkan tegangan sedikit lebih rendah dibandingkan dengan Voltmeter. Nilai yang tercatat pada Voltmeter mencapai 30 V pada percobaan terakhir, sementara Sensor Tegangan hanya mencatatkan 29 V.

Perbedaan kecil ini menunjukkan bahwa Sensor Tegangan memiliki sedikit deviasi dalam pembacaan tegangan, meskipun perbedaannya sangat kecil dan mungkin disebabkan oleh sensitivitas sensor atau faktor pengukuran lainnya. Secara keseluruhan, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa Sensor Tegangan memiliki tingkat akurasi yang cukup tinggi, namun perbedaan kecil di akhir pengukuran menunjukkan adanya variasi yang harus diperhatikan jika sensor digunakan dalam aplikasi yang memerlukan pengukuran sangat presisi.

3.3 Pengujian IoT

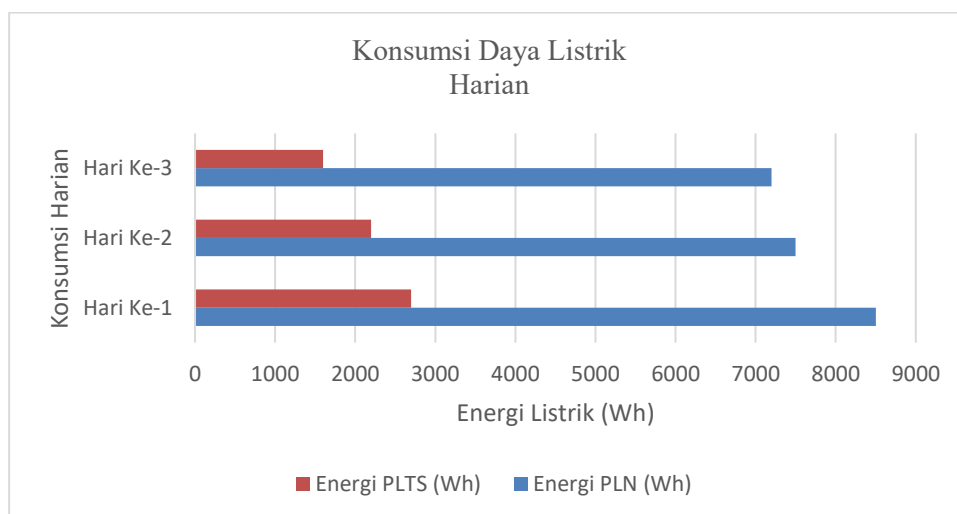


Gambar 7 Aplikasi IoT

Berdasarkan hasil pengujian tingkat optimalisasi penggunaan panel surya dan penggunaan listrik PLN yang ditampilkan pada *dashboard*, terlihat adanya dinamika dalam penggunaan sumber daya. Pada grafik yang menunjukkan Arus Beban (A), terdapat lonjakan mendadak pada waktu tertentu, yang menunjukkan penggunaan energi yang lebih besar, terutama ketika beralih dari sumber listrik PLN ke panel surya. Dalam periode ini, Arus Beban tercatat 0,76 A, sedangkan untuk Daya Beban (W) tercatat sebesar 171,21 W, yang menunjukkan bahwa beban pada sistem meningkat secara signifikan.

Selain itu dalam Gambar 7 terlihat bahwa Arus Lampu (A) tetap rendah pada kisaran 0,05 A, sementara Daya Lampu (W) stabil di angka 11,04 W, yang menunjukkan bahwa konsumsi energi oleh lampu sangat minim. Ini menunjukkan bahwa meskipun sistem menggunakan daya dari PLN, beban konsumsi energi pada peralatan tertentu, seperti lampu, masih dalam batas yang efisien.

Pergeseran antara Switch PLN/PLTS yang aktif menunjukkan bahwa sistem secara otomatis beralih ke sumber energi surya saat memungkinkan, dan kembali ke PLN saat tidak ada cukup cahaya matahari. Tegangan Baterai (V) menunjukkan nilai 49 V, yang menunjukkan bahwa penyimpanan energi di baterai berada dalam kondisi cukup untuk mendukung operasional sistem.



Gambar 8 Grafik Konsumsi Daya Listrik Harian

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan dalam grafik konsumsi daya listrik pada Gambar 8, terdapat perbandingan yang jelas antara penggunaan energi dari PLN (ditandai dengan warna kuning) dan PLTS (ditandai dengan warna merah) pada tiga hari pengujian. Pada Hari Ke-1, penggunaan energi dari PLN sangat dominan, dengan nilai konsumsi mencapai hampir 8.500 Wh, sementara penggunaan energi dari PLTS relatif rendah, hanya sedikit di bawah 2.700 Wh. Hal ini menunjukkan bahwa pada hari pertama, sumber energi utama yang digunakan adalah PLN, yang kemungkinan disebabkan oleh cuaca yang kurang mendukung untuk penggunaan panel surya.

Pada Hari Ke-2, terlihat peningkatan penggunaan energi dari PLTS yang lebih signifikan, meskipun PLN masih mendominasi, dengan konsumsi energi sekitar 7.500 Wh dibandingkan dengan sekitar 2.200 Wh dari PLTS. Ini menunjukkan bahwa sistem mulai lebih bergantung pada panel surya ketika kondisi cuaca lebih mendukung produksi energi dari PLTS.

Pada Hari Ke-3, meskipun konsumsi energi dari PLN tetap dominan, perbedaan antara PLN dan PLTS semakin kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan panel surya semakin optimal, meskipun PLN tetap menjadi sumber energi utama. Namun, data ini juga menunjukkan adanya potensi besar untuk lebih mengandalkan energi terbarukan (PLTS) apabila kondisi lingkungan mendukung, yang bisa mengurangi ketergantungan pada listrik PLN.

IV. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian, sistem *smart grid* berbasis IoT menunjukkan kinerja optimal dalam mengelola distribusi beban listrik. Sensor PZEM-004t menunjukkan akurasi tinggi dalam pengukuran tegangan, dengan selisih hanya 1V dibandingkan Voltmeter, serta memberikan hasil pengukuran arus dan frekuensi yang mendekati Power Meter meskipun terdapat sedikit deviasi pada beberapa percobaan. Sensor ACS712 juga terbukti mampu mengikuti perubahan arus secara waktu nyata dengan hasil yang konsisten terhadap Ampere Meter. Demikian pula, sensor tegangan menunjukkan performa yang hampir identik dengan Voltmeter, meskipun sedikit lebih rendah pada pengukuran di atas 25V. Pengujian pada penggunaan energi menunjukkan bahwa listrik dari PLN tetap menjadi sumber energi utama, namun peran PLTS semakin meningkat. Pada Hari Ke-1, konsumsi energi PLN mencapai hampir 8.500 Wh, jauh lebih tinggi dibandingkan PLTS yang hanya sekitar 2.700 Wh, hal ini akibat cuaca kurang mendukung. Hari Ke-2 menunjukkan peningkatan pemanfaatan PLTS, meskipun PLN masih dominan dengan 7.500 Wh berbanding 2.200 Wh. Pada Hari Ke-3, selisih konsumsi energi antara PLN dan PLTS semakin kecil, menandakan PLTS mulai berfungsi lebih optimal. Secara keseluruhan, data ini menunjukkan potensi besar untuk meningkatkan penggunaan energi terbarukan melalui PLTS, terutama di kondisi lingkungan yang mendukung.

Daftar Pustaka

- Alfadani, M., Muhammad, A. M., Kurnia, W. A., & Satria, A. (2025). Peran IoT dalam meningkatkan kualitas hidup masyarakat melalui implementasi Smart City. *Jurnal Ilmu Teknik*, 2(4), 254–263. <https://doi.org/10.62017/tektunik>
- Alnavis, N. B., Wirawan, R. R., Solihah, K. I., & Nugroho, V. H. (2024). Energi listrik berkelanjutan: Potensi dan tantangan penyediaan energi listrik di Indonesia. *Journal of Innovation Materials, Energy, and Sustainable Engineering*, 1(2). <https://doi.org/10.61511/jimese.v1i2.2024.544>
- Amru, A., Farah Huzaimi, D., Chandro Simanulang, J., Kamil, I., Respati Prajna Vashti, dan, Listrik, T., Elektro, T., & Negeri Jakarta Jl GA Siwabessy, P. D. (2025). Pemanfaatan Power Meter PZEM-004T Berbasis IoT Untuk Pemantauan Daya Listrik Secara Waktu nyata. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro* (Vol. 11).

- Bhatia, M., Meenakshi, N., Kaur, P., & Dhir, A. (2024). Digital technologies and carbon neutrality goals: An in-depth investigation of drivers, barriers, and risk mitigation strategies. *Journal of Cleaner Production*, 451, 141946. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141946>
- Birk Jones, C., Vining, W., Lave, M., Haines, T., Neuman, C., Bennett, J., & Scoffield, D. R. (2022). Impact of Electric Vehicle customer response to Time-of-Use rates on distribution power grids. *Energy Reports*, 8, 8225–8235. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.06.048>
- Effendi, A., Kusuma, F., Nur Putra, A. M., Amalia, S., Yuana Dewi, A., Studi Teknik Elektro, P., Teknik Institut Teknologi Padang Program Studi Teknologi Rekayasa Intsalasi Listrik, F., Vokasi Institut Teknologi Padang, F., Dpr, J., Aia Pacah Kec Kuranji Koto Tengah Kota Padang, K., Gajah Mada, J., & Nanggalo, K. (2022). *Study Pengisian Energi Ke Baterai Terhadap Output Energi Panel Surya Dengan Menggunakan Solar Tracker 4 Axis*. https://doi.org/10.30596/rele.v1i1.____
- El Maghraoui, A., El Hadraoui, H., Ledmaoui, Y., El Bazi, N., Guennouni, N., & Chebak, A. (2024). Revolutionizing *smart grid*-ready management systems: A holistic framework for optimal grid reliability. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 39, 101452. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.segan.2024.101452>
- Fernandez, M. I., Go, Y. I., Wong, D. M. L., & Früh, W.-G. (2024). Review of challenges and key enablers in energy systems towards net zero target: Renewables, storage, buildings, & grid technologies. *Heliyon*, 10(23). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40691>
- Gabbar, H. A. (2017). Chapter 2 - Smart energy grid infrastructures and interconnected micro energy grids. In H. A. Gabbar (Ed.), *Smart Energy Grid Engineering* (pp. 23–45). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805343-0.00002-4>
- Gorman, W. (2022). The quest to quantify the value of lost load: A critical review of the economics of power outages. *The Electricity Journal*, 35(8), 107187. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tej.2022.107187>
- Haryant, S. S., & Khristiana, Y. (2024). Kausalitas Pertumbuhan Penduduk dan Konsumsi Energi Listrik Terhadap Pertumbuhan Ekonomi Di Indonesia. *Excellent: Jurnal Manajemen, Bisnis Dan Pendidikan*, 11, 182–192.
- Khairina, J., Nasir, M., & Rahmawati, R. (2025). Implementasi *Internet of Things* pada Jaringan Fisik Siber untuk Optimalisasi Pengelolaan Perusahaan Air Minum (PAM) melalui Pemanfaatan Energi Terbarukan dan Integrasi *Smart grid*. *Proceeding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe*.
- Lubis, Y. A. (2024). PENERAPAN SISTEM IOT BERBASIS MACHINE LEARNING UNTUK OPTIMALISASI JARINGAN ENERGI CERDAS (*SMART GRID*) DI PERKOTAAN. *Kohesi: Jurnal Muldisiplin Saintek*, 6.
- Maruf, M. H., Haq, M. A. ul, Dey, S. K., Al Mansur, A., & Shihavuddin, A. S. M. (2020). Adaptation for sustainable implementation of *Smart grid* in developing countries like Bangladesh. *Energy Reports*, 6, 2520–2530. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.09.010>

- Noor, F. M., & Rahman, A. F. (2023). Studi Penerapan Integrasi Sumber Energi Baru Terbarukan dengan *Smart grid* dan Sistem Pengendalian SCADA. *Prosiding The 14th Industrial Research Workshop and National Seminar*, 526–533.
- Prawiyogi, A., & Anwar, A. (2023). Perkembangan *Internet of Things* (IoT) pada Sektor Energi : Sistematis Literatur Review. *Jurnal MENTARI: Manajemen, Pendidikan Dan Teknologi Informasi*, 1, 187–197. <https://doi.org/10.34306/mentari.v1i2.254>
- Prihasworo, L., Woro Fittrin, D., Yusmaniar Oktawati, U., & Nur Isnianto dan Yulianus Wahyu Setyono, H. (2020). Rancang Bangun Smart DC Current and Voltage Monitoring Dengan Thingspeak Pada Simulator PLN Laboratorium Teknik Tenaga Listrik UGM. *Jurnal Listrik, Instrumentasi Dan Elektronika Terapan*, 1(2), 39–49.
- Rajagukguk, A. S. F., Pakiding, M., & Rumbayan, M. (2015). Kajian Perencanaan Kebutuhan dan Pemenuhan Energi Listrik di Kota Manado. *E-Journal Teknik Elektro Dan Komputer*.
- Ruvio, A., Lamedica, R., Geri, A., Maccioni, M., Carere, F., Alati, F. R., Carones, N., & Buffarini, G. (2024). Integrated procedure to design optimal hybrid renewable power plant for railways' traction power substation. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 39, 101446. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.segan.2024.101446>
- Sani Alhusain Tantangan, A. (2020). *Challenges, Constraints and Efforts for Development of Electricity Infrastructure in Riau Province and South Sulawesi Province*. <http://makassar>.
- Sidopekso, S., Anita Eka Febtiwiyanti Jurusan Fisika, dan, & Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, F. (2010). *Studi Peningkatan Output Modul Surya Dengan Menggunakan Reflektor* (Vol. 12, Issue 3).
- Suteja, W., & Antara, A. (2021). Analisis Sensor Arus Invasive ACS712 dan Sensor Arus Non Invasive SCT013 Berbasis Arduino. *PROtek : Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 8, 13–21. <https://doi.org/10.33387/protk.v8i1.2116>
- Vieary, R. P. (2022). *PERANCANGAN SMART GRID DENGAN DISTRIBUSI*. Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
- Wibowo, A. (2023). *Internet of Things (IoT) Internet of Things (IoT) Internet of Things (IoT) dalam dalam dalam* (J. T. Santoso, Ed.; 1st ed.). Yayasan Prima Agus Teknik.
- Yahya, A. N., Nurcahyo, S., & Siswoko, S. (2021). Selektor Otomatis pada Proses Switching CB100 Navigasi Offline Bolak–Balik Berdasarkan Barcode Assy. *Jurnal Elektronika Dan Otomasi Industri*, 8(1), 10. <https://doi.org/10.33795/elk.v8i1.221>