

Integrasi IoT pada Evaluasi Efisiensi Panel Surya *Off-Grid* pada Beban Resistif dan Induktif

Aripin Triyanto¹, Akbar Maulana¹, Joko Tri Susilo¹, Yoyok Dwi Setyo Pambudi¹

¹ Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Pamulang, Tangerang Selatan, Banten 15417, Indonesia

[Diserahkan: 26 Maret 2025, Direvisi: 24 Oktober 2025, Diterima: 28 November 2025]

Penulis Korespondensi: Aripin Triyanto (dosen01315@unpam.ac.id)

INTISARI — Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang banyak dimanfaatkan, terutama dalam sistem *off-grid*. Namun, efisiensi konversinya dipengaruhi oleh jenis beban yang digunakan. Beban resistif dan induktif memiliki karakteristik konsumsi daya yang berbeda, sehingga memengaruhi kinerja panel surya. Oleh karena itu, diperlukan analisis mengenai dampak kedua jenis beban terhadap efisiensi panel surya, dengan pemantauan berbasis *internet of things* (IoT) untuk pengumpulan data secara *real-time*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan beban resistif (lampu pijar) dan induktif (kipas) terhadap efisiensi sistem panel surya *off-grid* 50 Wp serta mengevaluasi efektivitas IoT dalam pemantauan kinerja sistem. Metode yang digunakan meliputi pengujian dengan menghubungkan panel surya ke kedua jenis beban tersebut. Parameter yang diamati mencakup tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan oleh panel surya serta daya yang dikonsumsi oleh masing-masing beban. Data dikumpulkan menggunakan sensor dan dikirim ke platform IoT untuk dianalisis secara jarak jauh. Hasil penelitian menunjukkan bahwa beban resistif menghasilkan efisiensi lebih tinggi, berkisar antara 44,47% hingga 49,54%, dibandingkan dengan beban induktif yang hanya mencapai 39,61% hingga 48,12%. Efisiensi yang lebih rendah pada beban induktif disebabkan oleh komponen reaktif yang menurunkan faktor daya dan kinerja sistem. Maka, dapat disimpulkan bahwa jenis beban berpengaruh signifikan terhadap efisiensi panel surya *off-grid* dan implementasi IoT terbukti efektif dalam pemantauan kinerja sistem secara *real-time*.

KATA KUNCI — Panel Surya, Beban Resistif, Beban Induktif, *Off-Grid*, IoT.

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi dunia saat ini masih didominasi oleh sumber energi fosil, seperti minyak bumi, gas alam, dan batu bara, dengan kontribusi lebih dari 80% [1], [2]. Ketergantungan terhadap energi fosil menimbulkan berbagai permasalahan, seperti keterbatasan pasokan, peningkatan emisi karbon, serta kenaikan tarif listrik akibat tingginya permintaan [3], [4]. Perkembangan industri yang makin pesat turut meningkatkan konsumsi energi listrik, sehingga diperlukan solusi energi alternatif yang ramah lingkungan dan berkelanjutan guna mengurangi ketergantungan terhadap energi konvensional [5]. Di Indonesia, energi listrik diperoleh dari dua sumber utama, yaitu energi konvensional dan energi baru terbarukan (EBT) [6]. Energi konvensional memiliki keterbatasan pasokan dan dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan jika digunakan dalam jangka panjang [7]. Oleh sebab itu, pemanfaatan energi alternatif berbasis EBT menjadi salah satu solusi strategis untuk memenuhi kebutuhan energi secara berkelanjutan [8]. Salah satu sumber EBT yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan adalah energi surya, yang dikonversi menjadi energi listrik menggunakan panel surya [9]. Panel surya merupakan komponen utama dalam pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) yang berfungsi untuk mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik [10]. Efisiensi panel surya dalam menghasilkan daya listrik sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya adalah jenis beban yang digunakan [11]. Kinerja panel surya tidak hanya dipengaruhi oleh jenis beban, tetapi juga faktor lingkungan. Variasi cuaca, seperti mendung atau hujan serta perbedaan lokasi geografis, dapat menurunkan intensitas iradiasi matahari, sehingga tegangan dan arus keluaran menjadi fluktuatif. Faktor ini penting dipertimbangkan karena berpengaruh langsung

terhadap efisiensi sistem *off-grid* yang sepenuhnya bergantung pada energi surya [12].

Beban listrik terbagi menjadi dua kategori utama, yaitu beban resistif dan beban induktif. Beban resistif, seperti lampu pijar, memiliki karakteristik linier tanpa daya reaktif, sehingga lebih optimal dalam pemanfaatan daya listrik dari panel surya. Sebaliknya, beban induktif, seperti kipas dan motor listrik, memiliki komponen reaktif yang menyebabkan faktor daya menurun, sehingga berpotensi mengurangi efisiensi sistem secara keseluruhan [13], [14]. Oleh karena itu, diperlukan kajian lebih lanjut mengenai pengaruh jenis beban terhadap efisiensi sistem panel surya *off-grid* [15]. Selain jenis beban, pemantauan kinerja panel surya juga menjadi aspek penting dalam optimasi penggunaannya. Sistem pemantauan panel surya yang ada saat ini masih bersifat konvensional, yaitu data keluaran panel surya hanya disimpan dalam format teks tanpa dukungan penyimpanan jangka panjang atau akses jarak jauh. Sistem ini juga memiliki keterbatasan dalam pengendalian beban secara otomatis, sehingga kurang efisien dalam pengoperasiannya. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan sistem pemantauan panel surya berbasis *internet of things* (IoT), yang memungkinkan pemantauan dan pengendalian sistem secara *real-time* melalui aplikasi berbasis internet [16].

Terdapat beberapa penelitian yang telah dilakukan yang secara khusus membahas mengenai panel surya *off-grid* dan integrasi IoT. Sebuah penelitian mengembangkan sistem pemantauan panel surya menggunakan mikrokontroler, tetapi tidak mendukung pemantauan *real-time* melalui internet [17]. Penelitian lainnya mengembangkan sistem pemantauan tegangan dan arus yang dihasilkan oleh panel surya berbasis web secara *online*, tetapi tidak memiliki fitur pengendalian beban jarak jauh [18]. Sementara itu, ada juga penelitian yang mengintegrasikan IoT ke dalam sistem pemantauan dan

pengendalian PLTS, tetapi fungsi pengendalian beban hanya dapat digunakan pada perangkat tertentu [19]. Terakhir, pengkajian mengenai pemantauan panel surya dilengkapi dengan NodeMCU telah dilakukan, dengan variasi data real berdasarkan nilai tegangan dan arus [20]–[21].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan beban resistif dan induktif terhadap efisiensi sistem panel surya *off-grid* berkapasitas 50 Wp. Penelitian ini menganalisis pengaruh beban resistif dan induktif terhadap efisiensi sistem panel surya secara *off-grid* serta mengembangkan sistem pemantauan dan kendali berbasis IoT untuk memantau nilai tegangan, arus, dan daya secara *real-time* dan mengendalikan beban secara jarak jauh melalui modul relai berbasis internet. Dengan adanya fitur pemantauan dan pengendalian beban secara jarak jauh, diharapkan sistem ini dapat meningkatkan efisiensi penggunaan daya listrik yang dihasilkan oleh panel surya. Penelitian ini menggunakan aplikasi Blynk untuk memantau sistem panel surya berbasis IoT secara *real-time*.

Studi ini bertujuan untuk memperkuat pemahaman mengenai hubungan karakteristik beban dan efisiensi sistem panel surya *off-grid* berbasis IoT serta berpotensi diterapkan di wilayah terpencil dengan akses internet terbatas. Fitur kendali beban jarak jauh berbasis relai dapat digunakan untuk mengatur distribusi daya sesuai kebutuhan, dengan fokus pada efek variasi beban resistif dan induktif terhadap efisiensi sistem panel surya *off-grid*, yang belum banyak dibahas dalam penelitian sebelumnya. Selain itu, terdapat tantangan pengembangan dan penerapan sistem pemantauan panel surya berbasis IoT pada kondisi nyata, khususnya di wilayah terpencil dengan akses internet yang terbatas, yang masih sangat terbuka untuk direalisasikan.

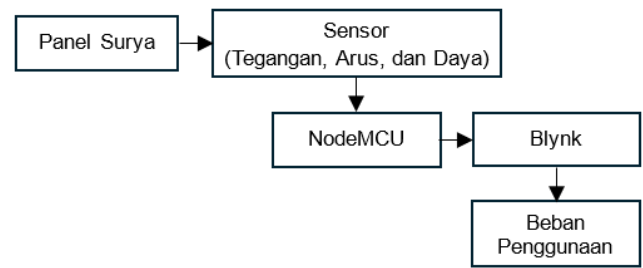
II. METODOLOGI

Metodologi penelitian ini berfokus pada pengembangan dan analisis sistem pemantauan panel surya *off-grid* berbasis IoT dengan mempertimbangkan pengaruh beban resistif dan induktif terhadap kinerja sistem. Fokus utama metodologi ini terbagi dalam beberapa aspek penting yang mencakup perancangan perangkat keras (*hardware*), pengembangan perangkat lunak (*software*), serta pengujian dan evaluasi sistem.

A. DESAIN PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh penggunaan beban resistif dan induktif terhadap kinerja panel surya *off-grid* berbasis IoT. Tahapan penelitian dimulai dengan studi literatur guna memahami konsep dasar terkait sistem pemantauan sistem energi. Setelah itu, dilakukan perancangan sistem secara keseluruhan, yang mencakup pemilihan komponen perangkat keras dan perangkat lunak yang akan digunakan. Selanjutnya, sistem perangkat keras dan perangkat lunak diintegrasikan dengan menanamkan program pada pengendali untuk memungkinkan pemantauan dan pengendalian data secara *real-time*. Setelah sistem selesai dirancang dan dirakit, dilakukan tahap pengujian guna memastikan setiap komponen berfungsi dengan baik. Jika ditemukan kekurangan atau kesalahan dalam sistem, dilakukan evaluasi dan perbaikan sebelum sistem diuji kembali hingga diperoleh hasil yang sesuai dengan tujuan penelitian. Gambar 1 menunjukkan diagram blok sistem pemantauan yang digunakan dalam penelitian ini.

Fungsi diagram blok sistem pemantauan adalah sebagai penjabar hubungan antarkomponen yang digunakan. Selain itu,



Gambar 1. Diagram blok sistem pemantauan.

koneksi antar panel surya dapat ditampilkan dengan lengkap sampai dengan penggunaan beban.

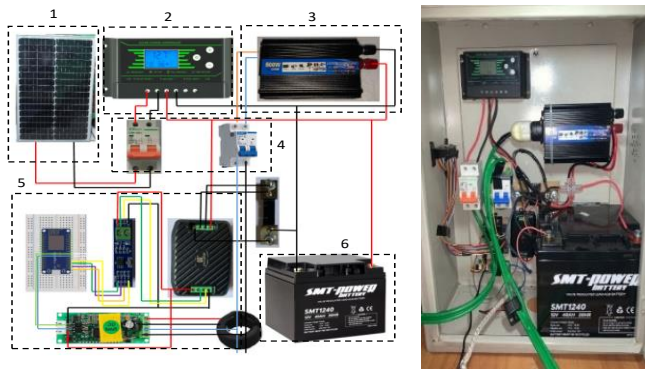
B. PROSEDUR PENELITIAN

Penelitian ini melibatkan perancangan sistem pemantauan panel surya berbasis IoT untuk mengamati kinerja panel surya saat digunakan dengan beban resistif dan induktif. Perancangan perangkat keras bertujuan untuk menentukan komponen utama yang digunakan dalam sistem pemantauan. Sistem ini terdiri atas NodeMCU ESP8266 sebagai mikrokontroler utama, sensor tegangan dan arus dc (PZEM-017), sensor tegangan dan arus ac (PZEM-004), serta relai sebagai pengendali beban. Pada sistem pemantauan panel surya ini, sensor PZEM-017 digunakan untuk mengukur tegangan dan arus dc yang dihasilkan oleh panel surya, sedangkan sensor PZEM-004 digunakan untuk mengukur tegangan, arus, dan daya yang dikonsumsi oleh beban ac. Data yang diperoleh dari sensor kemudian dikirim ke NodeMCU ESP8266 yang telah terhubung dengan modul Ethernet Shield. Setelah data diterima oleh mikrokontroler, informasi tersebut akan disimpan dalam basis data dan ditampilkan melalui aplikasi Blynk secara *real-time*.

C. SISTEM PEMANTAUAN PLTS

Terdapat beberapa bagian penting dalam sistem ini, termasuk sensor PZEM-017 untuk membaca tegangan dc serta sensor PZEM-004 untuk membaca tegangan, arus, dan daya ac pada beban. Sistem ini dirancang agar dapat diinstal di lokasi panel surya dengan konektivitas internet yang mendukung komunikasi data secara *real-time*. Arduino IDE digunakan untuk mengembangkan perangkat lunak yang akan diunggah ke NodeMCU ESP8266. Sebelum memulai pemrograman, diperlukan instalasi *board* ESP8266 serta pustaka tambahan yang dibutuhkan, termasuk pustaka komunikasi dengan sensor dan aplikasi Blynk. Pada tahap ini, Template ID dan Device Name dari aplikasi Blynk harus dimasukkan ke dalam program agar perangkat dapat berkomunikasi dengan server IoT. Setelah program selesai ditulis, proses verifikasi dilakukan sebelum akhirnya diunggah ke perangkat ESP8266. Gambar 2 menunjukkan rangkaian perangkat keras pemantauan panel surya.

Sistem PLTS *off-grid*, sesuai penjelasan pada Gambar 2, diawali dari panel surya yang berfungsi mengubah energi matahari menjadi listrik dc, kemudian dikendalikan oleh *solar charge controller* untuk pengisian dan perlindungan baterai. Energi dari baterai dapat disalurkan langsung ke beban dc atau melalui inverter untuk menghasilkan listrik ac. Perlindungan sistem diberikan oleh sekering (*fuse*) terhadap arus berlebih. Di dalam sistem pemantauan terdapat NodeMCU ESP8266 sebagai pusat kendali dengan dukungan Wi-Fi. Data tegangan, arus, dan daya dibaca oleh sensor PZEM-017 lalu dikirim ke aplikasi Blynk secara *real-time*. Beban dapat dikendalikan melalui relai yang dioperasikan dari jarak jauh menggunakan



Gambar 2. Rangkaian pemantauan panel surya.



Gambar 3. Aplikasi Blynk IoT.

smartphone. Dengan demikian, sistem ini tidak hanya mampu menyuplai energi secara mandiri, tetapi juga memungkinkan pemantauan dan pengendalian beban berbasis IoT yang lebih efisien [22]. Gambar 3 memperlihatkan tampilan Blynk IoT.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini mengembangkan sistem PLTS *off-grid* dengan kapasitas 50 Wp yang terintegrasi dengan teknologi IoT untuk memantau kinerja panel surya terhadap dua jenis beban, yaitu beban resistif dan beban induktif. Sistem ini dirancang menggunakan mikrokontroler ESP8266, yang berfungsi sebagai pengolah data dari sensor tegangan dan arus untuk kemudian dikirimkan secara *real-time* ke platform pemantauan berbasis IoT, yaitu aplikasi Blynk. Tujuan utama sistem ini adalah untuk menganalisis pengaruh jenis beban terhadap distribusi daya yang dihasilkan oleh panel surya serta untuk mengetahui efisiensi energi yang diperoleh dari sistem PLTS. Dalam sistem ini, panel surya berfungsi sebagai sumber energi utama, yang mengubah energi matahari menjadi energi listrik dc. Energi yang dihasilkan kemudian disimpan dalam baterai sehingga dapat digunakan untuk menyuplai daya ke beban. Beban resistif, seperti lampu pijar, digunakan untuk mengukur efisiensi sistem tanpa adanya komponen reaktif, sedangkan beban induktif, seperti kipas listrik, digunakan untuk mengamati pengaruh faktor daya terhadap distribusi energi yang dihasilkan oleh panel surya.

Selain itu, sistem ini terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu panel surya, inverter, baterai, sensor tegangan dan arus, serta modul komunikasi IoT berbasis ESP8266. Panel surya menghasilkan daya listrik dc, yang kemudian disimpan dalam baterai sebelum didistribusikan ke beban melalui inverter yang mengubah daya dc ke ac untuk keperluan beban induktif. Data pemantauan dari sensor tegangan dan arus dikirimkan ke aplikasi Blynk menggunakan koneksi Wi-Fi, sehingga pengguna dapat mengakses informasi mengenai tegangan, arus, daya, serta status beban secara *real-time* melalui perangkat seluler atau komputer. Dengan adanya sistem pemantauan berbasis IoT ini, pengguna dapat memantau efisiensi panel surya secara akurat, mengidentifikasi pola konsumsi daya, serta mengendalikan distribusi daya dari jarak jauh. Implementasi teknologi IoT dalam penelitian ini memungkinkan sistem untuk menjadi lebih efisien, fleksibel, dan responsif dalam mengelola energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya.

A. HASIL PEMANTAUAN PLTS

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh beban resistif dan induktif terhadap kinerja panel surya yang dipantau secara *real-time* menggunakan teknologi IoT. Sistem pemantauan berbasis IoT memungkinkan pencatatan data tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan oleh panel surya serta

daya yang dikonsumsi oleh masing-masing jenis beban. Penelitian ini dilakukan pada lokasi dengan paparan sinar matahari optimal pada siang hari, dengan menggunakan panel surya berkapasitas 50 Wp yang terhubung ke sistem pemantauan. Pengujian dilakukan dengan dua jenis beban, yaitu beban resistif (lampu pijar 25 W) dan beban induktif (kipas angin 25 W). Data diambil setiap satu jam, dimulai dari pukul 09.00 WIB hingga 17.00 WIB guna mengamati perubahan nilai tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan oleh panel surya serta energi yang dikonsumsi oleh beban dalam kondisi cuaca yang cukup konsisten.

Beban resistif yang digunakan dalam penelitian ini adalah lampu pijar 25 W. Beban ini dipilih karena sifatnya yang tidak memiliki komponen reaktif, sehingga tidak menyebabkan distorsi daya atau penurunan faktor daya pada sistem kelistrikan. Dengan menggunakan sistem pemantauan berbasis IoT melalui aplikasi Blynk, data tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan panel surya dapat dipantau secara *real-time*. Dari hasil pemantauan, beban resistif menunjukkan stabilitas daya yang lebih tinggi dibandingkan dengan beban induktif. Efisiensi daya yang dikonversikan dari panel surya ke beban resistif cenderung lebih tinggi karena seluruh daya yang dihasilkan digunakan langsung oleh beban tanpa adanya komponen reaktif yang menyebabkan kerugian daya. Berdasarkan pengambilan data dari pagi hingga sore hari, nilai tegangan dan arus yang dihasilkan oleh panel surya mengalami fluktuasi kecil yang disebabkan oleh intensitas cahaya matahari yang berubah sepanjang hari. Sebagai contoh, pada pukul 12.00 WIB, saat intensitas cahaya matahari mencapai puncaknya, panel surya menghasilkan daya maksimal yang hampir sepenuhnya digunakan oleh beban resistif, menunjukkan efisiensi konversi energi yang tinggi. Namun, saat intensitas cahaya matahari menurun di pagi dan sore hari, daya yang dihasilkan oleh panel surya juga mengalami penurunan bertahap. Hasil pemantauan ini menunjukkan bahwa beban resistif lebih optimal dalam pemanfaatan daya dari panel surya karena tidak mengalami efek penurunan faktor daya seperti yang terjadi pada beban induktif. Berikut ini adalah hasil pemantauan beban resistif.

B. PERHITUNGAN PARAMETER

Perhitungan nilai tegangan, arus, dan daya, dapat dilakukan menggunakan (1).

$$P = V \times I \quad (1)$$

dengan P menyatakan daya dalam W, V menyatakan tegangan dalam V, dan I menyatakan arus dalam A.

Karena faktor daya ($\cos \phi$) bernilai 1, daya aktif yang dikonsumsi pada beban resistif murni setara dengan daya semu. Pada beban induktif, terdapat komponen daya reaktif, sehingga daya aktif dapat dinyatakan dengan (2).

$$P = V \times I \times \cos \phi \quad (2)$$

dengan $\cos \phi$ merupakan faktor daya yang bernilai kurang dari 1 ($\cos \phi < 1$) dan menunjukkan tingkat efisiensi penggunaan daya. Dengan demikian, kinerja panel surya *off-grid* dapat dipengaruhi oleh variasi beban resistif maupun induktif. Efisiensi panel surya dapat dihitung sebagaimana ditunjukkan pada (3).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (3)$$

dengan P_{out} adalah daya keluaran dan P_{in} adalah daya masukan.

Untuk menghitung efisiensi daya keluaran panel surya [23], digunakan (4).

$$\eta_{PV} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (4)$$

dengan P_{in} merupakan daya iradiasi matahari yang masuk, sedangkan P_{out} merupakan daya listrik yang dihasilkan oleh panel surya.

C. PENGARUH BEBAN RESISTIF

Tabel I menyajikan data yang mencakup parameter tegangan baterai, arus dan daya dari sensor PZEM-017, tegangan inverter, serta daya lampu. Data diambil pada rentang waktu 09.00–17.00 selama satu minggu. Data ini memberikan gambaran mengenai kinerja sistem kelistrikan, khususnya terkait pola konsumsi daya dan stabilitas tegangan dalam penggunaan sehari-hari. Berdasarkan hasil pengukuran, tegangan baterai berkisar antara 12,33 V hingga 12,84 V, dengan nilai tertinggi pada Selasa (12,84 V) dan terendah pada Minggu (12,33 V). Meskipun terdapat fluktuasi kecil, tegangan baterai relatif stabil, menunjukkan bahwa sistem penyimpanan daya bekerja dengan baik. Fluktuasi ini dapat disebabkan oleh tingkat pengisian ulang baterai serta beban yang digunakan dalam periode pengambilan data. Pada parameter arus dan daya PZEM-017, nilai arus berada di kisaran 0,31 A hingga 0,8 A, sedangkan daya berkisar antara 5,03 W hingga 8,27 W. Arus dan daya tertinggi tercatat pada Selasa (0,8 A dan 8,27 W), sementara nilai terendah terjadi pada Sabtu (0,31 A dan 5,03 W). Perubahan ini mengindikasikan bahwa konsumsi listrik lebih tinggi pada hari kerja dibandingkan akhir pekan, yang kemungkinan besar berkaitan dengan pola aktivitas pengguna atau beban tambahan yang digunakan pada hari-hari tersebut. Sementara itu, tegangan inverter menunjukkan rentang nilai antara 207,67 V hingga 216 V, dengan tegangan tertinggi terjadi pada Sabtu (216 V) dan terendah pada Jumat (207,67 V). Fluktuasi tegangan ini masih berada dalam batas aman, tetapi tetap perlu dipantau agar tidak mengganggu stabilitas sistem. Perubahan tegangan inverter bisa dipengaruhi oleh beban yang terhubung serta efisiensi sistem konversi daya. Adapun daya lampu yang digunakan berkisar antara 16,84 W hingga 18,9 W, dengan konsumsi tertinggi pada Selasa (18,9 W) dan terendah

TABEL I
HASIL PENGUKURAN TEGANGAN DAN ARUS MENGGUNAKAN BEBAN RESISTIF

Waktu Pengambilan Data (09.00-17.00)	Tegangan Baterai (VDC)	Arus PZEM - 017 (A)	Daya PZEM - 017 (W)	Tegangan Inverter (VAC)	Daya Lampu (W)
Senin	12,36	0,59	6,96	211,78	18,50
Selasa	12,84	0,80	8,27	214,00	18,90
Rabu	12,73	0,73	7,80	213,00	17,79
Kamis	12,42	0,73	7,80	210,44	17,79
Jum'at	12,52	0,78	8,18	207,67	18,38
Sabtu	12,34	0,31	5,03	216,00	17,64
Minggu	12,33	0,55	6,52	212,78	16,84

pada Minggu (16,84 W). Pola konsumsi daya ini menunjukkan bahwa pemakaian listrik lebih tinggi pada hari kerja dibandingkan akhir pekan, yang sejalan dengan tren arus dan daya pada sistem. Tampilan pemantauan kinerja PLTS selama satu minggu (Senin–Minggu) ditunjukkan pada Gambar 4.

Gambar 4 menunjukkan pemantauan IoT dari sistem PLTS berbasis Blynk mengenai parameter utama, yaitu tegangan baterai (12,14 V – 12,86 V), tegangan inverter (200 V – 212 V), daya beban (17,4 W – 26,1 W), arus keluaran (0,39 A – 1,02 A), dan daya panel surya (4,7 W – 26,1 W). Fluktuasi pada tegangan inverter dan arus keluaran menunjukkan adanya perubahan beban yang terhubung, sedangkan variasi daya yang dihasilkan panel surya kemungkinan besar dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari. Meskipun ada perubahan pada parameter sistem, secara keseluruhan, PLTS ini beroperasi dengan stabil, dan pemantauan berbasis IoT memberikan visibilitas *real-time* terhadap kinerja sistem, memungkinkan optimasi lebih lanjut untuk meningkatkan efisiensi energi.

Dalam penelitian ini, terdapat dua jenis beban yang digunakan. Salah satunya adalah beban induktif, yang berkontribusi terhadap fluktuasi nilai tegangan dan arus pada sistem PLTS. Penggunaan beban induktif dapat memengaruhi karakteristik kelistrikan, terutama dalam hal stabilitas tegangan inverter serta peningkatan konsumsi arus. Tabel II menyajikan hasil pengukuran saat sistem PLTS beroperasi dengan beban induktif. Tampak dari Tabel II bahwa terjadi variasi nilai tegangan baterai, arus, daya, serta tegangan keluaran inverter. Fluktuasi ini menunjukkan bahwa beban induktif dapat memberikan dampak terhadap efisiensi sistem dan perlu diperhitungkan dalam analisis kinerja keseluruhan PLTS. Dengan memahami pola perubahan ini, langkah optimasi dapat diterapkan untuk menjaga stabilitas dan efisiensi sistem dalam menyediakan daya bagi beban yang digunakan.

D. PENGARUH BEBAN INDUKTIF

Data penelitian yang diambil pada rentang pukul 09.00–17.00 menunjukkan parameter tegangan baterai, arus dan daya dari sensor PZEM-017, tegangan inverter, serta daya kipas selama satu minggu. Tegangan baterai berkisar antara 11,78 V hingga 12,56 V, dengan nilai tertinggi pada Rabu (12,56 V) dan terendah pada Minggu (11,78 V). Hal ini mengindikasikan tingkat pengisian daya yang bervariasi. Arus dan daya PZEM-017 menunjukkan peningkatan signifikan pada Rabu (0,58 A, 7,99 W) dan Jumat (0,63 A, 7,9 W), sedangkan konsumsi daya terendah terjadi pada Minggu (0,09 A, 1,02 W), yang menandakan pola penggunaan beban yang lebih tinggi di pertengahan minggu. Tegangan inverter relatif stabil dengan rentang 204 V hingga 211,22 V, yang menunjukkan efisiensi sistem masih dalam batas aman. Daya kipas berkisar antara



Gambar 4. Tampilan beban resistif dari aplikasi Blynk IoT.



Gambar 5. Tampilan beban induktif dari aplikasi Blynk IoT.

TABEL II
HASIL PENGUKURAN TEGANGAN DAN ARUS MENGGUNAKAN BEBAN INDUKTIF

Waktu Pengambilan Data (09.00-17.00)	Tegangan Baterai (VDC)	Arus PZEM - 017 (A)	Daya PZEM - 017 (W)	Tegangan Inverter (VAC)	Daya Kipas (W)
Senin	12,07	0,16	1,74	208,67	28,99
Selasa	12,02	0,18	2,30	204,00	28,50
Rabu	12,56	0,58	7,99	208,99	28,99
Kamis	12,12	0,26	3,23	208,78	28,69
Jum'at	12,21	0,63	7,90	205,33	28,56
Sabtu	12,04	0,40	4,72	206,11	29,16
Minggu	11,78	0,09	1,02	211,22	29,20

28,5 W hingga 29,2 W, dengan sedikit variasi antahari, menunjukkan bahwa kipas beroperasi dengan konsumsi daya yang cukup stabil. Secara keseluruhan, sistem berfungsi dengan baik, meskipun ada fluktuasi kecil yang dapat dikaitkan dengan pola penggunaan energi dan kinerja pengisian daya baterai. Gambar 5 menunjukkan hasil pemantauan penggunaan PLTS dengan pengaruh beban induktif.

E. PERBANDINGAN BEBAN INDUKTIF DAN RESISTIF TERHADAP TEGANGAN DAN ARUS

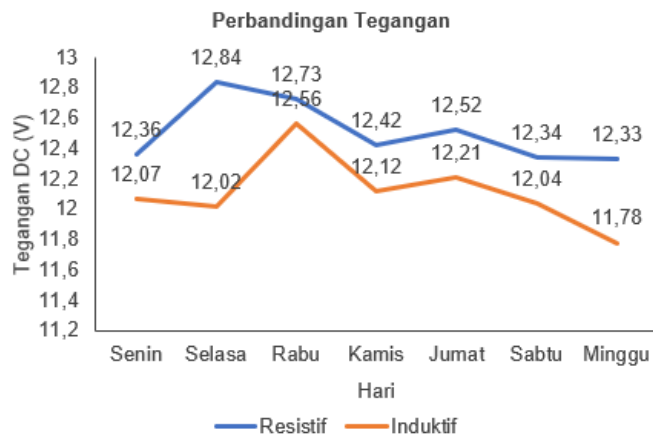
Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan selama satu minggu, kinerja panel surya terhadap beban resistif dan induktif menunjukkan perbedaan dalam efisiensi daya dan stabilitas tegangan. Pengukuran terhadap parameter tegangan dc dari baterai, arus yang mengalir ke beban, daya yang dihasilkan panel, serta daya yang dikonsumsi beban mengindikasikan bahwa beban resistif cenderung lebih stabil dalam konsumsi daya, sedangkan beban induktif menyebabkan fluktuasi arus dan tegangan yang lebih signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa beban induktif memiliki dampak terhadap efisiensi sistem, terutama dalam stabilitas inverter dan distribusi daya. Secara keseluruhan, panel surya mampu menyediakan daya bagi kedua jenis beban, meskipun dengan

perbedaan dalam karakteristik pemakaian energi, yaitu beban resistif lebih optimal dalam memanfaatkan energi yang dihasilkan dibandingkan dengan beban induktif. Gambar 6 menampilkan perbandingan tegangan pada PLTS terhadap beban resistif dan induktif pada panel surya. Sementara itu, pengaruh beban resistif dan induktif terhadap arus pada panel surya diperlihatkan pada Gambar 7.

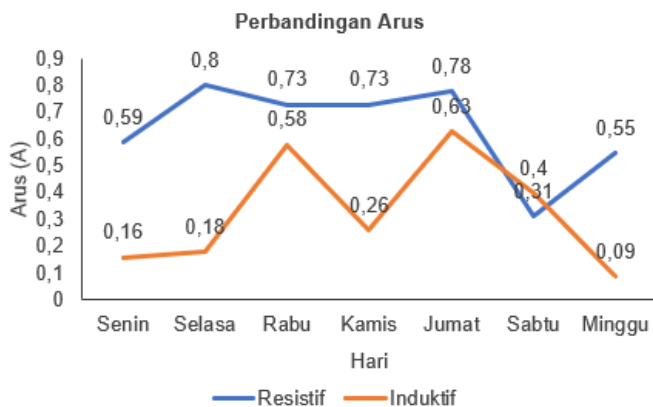
Hasil pengukuran pada Gambar 6 dan Gambar 7 menunjukkan bahwa beban resistif menghasilkan nilai arus yang relatif stabil dengan rentang 0,55 A – 0,80 A, sedangkan beban induktif cenderung berfluktuasi lebih besar dengan nilai 0,09 A – 0,63 A. Hal ini disebabkan oleh karakteristik penggunaan beban induktif yang memiliki komponen reaktif, sehingga arus dan tegangan tidak sefase dan faktor daya menurun. Kondisi tersebut membuat tegangan panel surya lebih cepat turun ketika dihubungkan dengan beban induktif. Sebaliknya, pada beban resistif yang bersifat linier, hampir seluruh daya listrik dapat dimanfaatkan secara efektif, sehingga kinerja panel surya lebih stabil dan efisien, meskipun terjadi variasi intensitas cahaya matahari atau perubahan kondisi lingkungan.

Berdasarkan hasil pengujian selama satu minggu, sistem PLTS *off-grid* berkapasitas 50 Wp yang terintegrasi dengan teknologi IoT menunjukkan kinerja yang berbeda terhadap dua jenis beban, yaitu beban resistif dan beban induktif. Data hasil pemantauan menunjukkan bahwa beban resistif menghasilkan nilai arus dan daya yang lebih stabil dibandingkan beban induktif. Rata-rata arus yang dihasilkan panel surya pada beban resistif sebesar 0,64 A, dengan rata-rata 7,22 W, sedangkan pada beban induktif arus rata-ratanya hanya 0,33 A dengan daya 4,13 W. Analisis statistik sederhana menggunakan simpangan baku menunjukkan bahwa beban resistif memiliki variasi arus yang lebih kecil sebesar 0,17 dibandingkan beban induktif sebesar 0,21. Nilai *effect size* sebesar 1,6 mengindikasikan bahwa perbedaan ini memiliki efek yang besar dan signifikan secara praktis terhadap efisiensi sistem.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa karakteristik reaktif pada beban induktif menyebabkan penurunan faktor daya,



Gambar 6. Perbandingan nilai tegangan dari pengaruh beban resistif dan induktif pada PLTS.



Gambar 7. Perbandingan nilai arus dari pengaruh beban resistif dan induktif pada PLTS.

sehingga energi listrik yang dihasilkan panel surya tidak dapat dimanfaatkan sepenuhnya. Pada beban resistif, hampir seluruh daya listrik dikonversi menjadi energi panas atau cahaya, sedangkan pada beban induktif sebagian energi diserap sebagai medan magnet, sehingga menyebabkan arus dan tegangan tidak sefase dan menurunkan efisiensi sistem. Berdasarkan pengukuran, rata-rata efisiensi sistem (η_{PV}) pada beban resistif mencapai 84,3%, sedangkan pada beban induktif hanya sekitar 67,8%. Temuan ini mengonfirmasi bahwa jenis beban memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja sistem PLTS *off-grid*, terutama dalam hal stabilitas tegangan dan efisiensi konversi energi.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, jenis beban yang digunakan berpengaruh signifikan terhadap efisiensi panel surya *off-grid* 50 Wp. Pengujian menunjukkan bahwa beban resistif (lampu pijar) memiliki efisiensi konversi daya yang lebih tinggi dibandingkan dengan beban induktif (kipas angin). Efisiensi sistem pada beban resistif berkisar antara 44,47% hingga 49,54%, sedangkan pada beban induktif hanya berkisar 39,61% hingga 48,12%. Efisiensi yang lebih rendah pada beban induktif disebabkan oleh adanya komponen reaktif yang menurunkan faktor daya serta meningkatkan fluktuasi arus dan tegangan, sehingga berdampak pada kinerja inverter dan sistem secara keseluruhan. Selain itu, implementasi pemantauan berbasis IoT terbukti efektif dalam mengumpulkan data secara *real-time*, memungkinkan analisis yang lebih akurat terhadap kinerja sistem tenaga surya. Dengan demikian, pemilihan jenis beban perlu diperhatikan dalam desain dan pengoperasian

sistem panel surya *off-grid* guna mengoptimalkan pemanfaatan energi yang dihasilkan.

KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Aripin Triyanto dan Joko Tri Susilo; implemmentasi perangkat lunak dan validasi, Aripin Triyanto dan Yoyok Dwi Setyo Pambudi; analisis formal dan investigasi, Akbar Maulana.

REFERENSI

- [1] R. Pahlevi, S. Thamrin, I. Ahmad, dan F.B. Nugroho, "Masa depan pemanfaatan batubara sebagai sumber energi di Indonesia," *J. Energi Baru Terbarukan*, vol. 5, no. 2, hal. 50–60, Jul. 2024, doi: 10.14710/jebt.2024.22973.
- [2] Zaenal Arifin dkk., "Pemantauan daya luaran panel surya secara jarak jauh melalui aplikasi berbasis website," *J. Ris. Rekayasa Elekt.*, vol. 5, no. 2, hal. 93–102, Des. 2023, doi: 10.30595/jrre.v5i2.19635.
- [3] "Peningkatan Pemanfaatan Energi Baru Terbarukan (EBT) untuk Mewujudkan Ketahanan Ekonomi Hijau di Indonesia," Lembaga Ketahanan Nasional Republik Indonesia, 2024.
- [4] D.S. Logayah, R.P. Rahmawati, D.Z. Hindami, dan B.R. Mustikasari, "Krisis energi Uni Eropa: Tantangan dan peluang dalam menghadapi pasokan energi yang terbatas," *Hasanuddin J. Int. Aff.*, vol. 3, no. 2, hal. 102–110, Agu. 2023, doi: 10.31947/hjirs.v3i2.27052.
- [5] Yudiartono, J. Windarta, dan Adiarso, "Analisis prakiraan kebutuhan energi nasional jangka panjang untuk mendukung program peta jalan transisi energi menuju karbon netral," *J. Energi Baru Terbarukan*, vol. 3, no. 3, hal. 201–217, Okt. 2022, doi: 10.14710/jebt.2022.14264.
- [6] D.A.K. Sari, F.D. Wijaya, dan H.R. Ali, "Optimasi sistem pembangkit listrik tenaga hybrid di Pulau Enggano," *J. Nas. Tek. Elekt. Teknol. Inf.*, vol. 11, no. 2, hal. 154–160, Mei 2022, doi: 10.22146/jnteti.v11i2.3849.
- [7] A.A. Solikh dan Bramastia, "Systematic literature review: Kajian potensi dan pemanfaatan sumber daya energi baru dan terbarukan di Indonesia," *J. Energi Baru Terbarukan*, vol. 5, no. 1, hal. 27–43, Mar. 2024, doi: 10.14710/jebt.2024.21742.
- [8] V. Dwisari, Sudarti, dan Yushardi, "Pemanfaatan energi matahari: Masa depan energi terbarukan," *OPTIKA, J. Pendidik. Fis.*, vol. 7, no. 2, hal. 376–384, Des. 2023, doi: 10.37478/optika.v7i2.3322.
- [9] A. Triyanto dkk., "Study of natural herbal dyes photodegradation effect to optical properties for dye-sensitized solar cells," *Sains Malaysiana*, vol. 53, no. 10, hal. 3479–3485, Okt. 2024, doi: 10.17576/jsm-2024-5310-20.
- [10] H.B. Nurjaman dan T. Purnama, "Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) sebagai solusi energi terbarukan rumah tangga," *J. Edukasi Elekt.*, vol. 6, no. 2, hal. 136–142, Nov 2022.
- [11] O.A. Rozak, A. Triyanto, dan H. Kusnadi, "Efficiency and performance ratio of photovoltaics on a 50 kWp Universitas Pamulang Viktor rooftop solar power plant," *Bull. Elect. Eng. Inform.*, vol. 13, no. 1, hal. 50–57, Feb. 2024, doi: 10.11591/eei.v13i1.5557.
- [12] Dahliyah, Samsurizal, dan N. Pasra, "Efisiensi panel surya kapasitas 100 Wp akibat pengaruh suhu dan kecepatan angin," *Sutet*, vol. 11, no. 2, hal. 71–80, Des. 2021, doi: 10.33322/sutet.v11i2.1551.
- [13] S.W. Putri, G. Marausna, dan E.E. Prasetyo, "Analisis pengaruh intensitas cahaya matahari terhadap daya keluaran pada panel surya," *Tek. STTKD, J. Tek. Elektron. Engine*, vol. 8, no. 1, hal. 29–37, Jul. 2022, doi: 10.56521/teknika.v8i1.442.
- [14] A. Triyanto dkk., "Analysis of voltage and current performance of 100 WP solar panel using Matlab Simulink R2021a," *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 34, no. 2, hal. 18–29, Apr. 2024, doi: 10.37934/araset.34.2.1829.
- [15] Syafii, Y. Mayura, dan Muhardika, "Strategi pembebanan PLTS off grid untuk peningkatan kontinuitas suplai energi listrik," *J. Rekayasa Elektrika*, vol. 15, no. 3, hal. 157–161, Des. 2019, doi: 10.17529/jre.v15i3.14793.
- [16] T. Sutikno, J. Alfahri, dan H.S. Purnama, "Monitoring tegangan dan arus pada panel surya menggunakan IoT," *Maj. Ilm. Teknol. Elekt.*, vol. 22, no. 1, hal. 153–158, Jan.–Jun. 2023, doi: 10.24843/mite.2023.v22i01.p20.
- [17] T.A. Trisnandini, N. Desryanto, dan I. Kgs, "Sistem monitoring efektivitas kinerja panel surya dengan penambahan reflektor berbasis mikrokontroler," *Jetri, J. Ilm. Tek. Elekt.*, vol. 20, no. 1, hal. 1–13, Agu. 2022, doi: 10.25105/jetri.v20i1.13797.
- [18] B. Suryanto dan Asnil, "Sistem monitoring panel surya berbasis website," *MSI Trans. Educ.*, vol. 2, no. 1, hal. 7–18, Jan. 2021, doi: 10.46574/mtded.v2i1.47.

- [19] M.R. Putri, F.X.A. Setyawan, dan Sumadi, "Sistem kontrol beban dan monitoring daya baterai pada panel surya 50Wp untuk aplikasi penerangan berbasis Internet of things," *J. Inform. Tek. Elekt. Terap.*, vol. 10, no. 3, hal. 167–172, Agu. 2022, doi: 10.23960/jitet.v10i3.2640.
- [20] D. Saputra dan V. Arinal, "Perancangan home automation dalam mengontrol lampu dan kipas menggunakan Blynk berbasis NodeMCU," *J. Sos. Teknol.*, vol. 1, no. 7, hal. 597–606, Jul. 2021, doi: 10.59188/jurnalsostech.v1i7.133.
- [21] D. Erwanto, D.A. Widhining K., dan T. Sugiarto, "Sistem pemantauan arus dan tegangan panel surya berbasis Internet of things," *Multitek Indones.*, vol. 14, no. 1, hal. 1–12, Jul. 2020, doi: 10.24269/mtkind.v14i1.2195.
- [22] T. Sutikno dkk., "Internet of things-based photovoltaics parameter monitoring system using NodeMCU ESP8266," *Int. J. Elect. Comput. Eng.*, vol. 11, no. 6, hal. 5578–5587, Des. 2021, doi: 10.11591/ijece.v11i6.pp5578-5587.
- [23] M. Rifaldi dkk., "Analisis efisiensi sistem pembangkit listrik tenaga surya sebagai sumber energi baru terbarukan," *J. Rekayasa Trop. Teknol. dan Inov.*, vol. 1, no. 1, hal. 16–24, Jul. 2023, doi: 10.30872/retrotekin.v1i1.919.