ANALISIS KINERJA BATERAI PLTS ON-GRID DALAM MERESPONS FLUKTUASI BEBAN LISTRIK RUMAH TANGGA

Faisal Irsan Pasaribu[1*], Noorly Evalina[1], Benny Oktrialdi [1], Indra Roza[2]

[1)] Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan, Indonesia

[2)] Teknik Elektro, Universitas Harapan Medan, Medan, Indonesia

Email: faisalirsan@umsu.ac.id, noorlyevalina@umsu.ac.id, bennyoktrialdi@umsu.ac.id, indraroza.ir@gmail.com

Info Artikel

Histori Artikel:
Diterima Okt 01, 2026
Direvisi Okt 15, 2026
Disetujui Okt 30, 2026

ABSTRACT

An on-grid solar photovoltaic (PV) system with battery storage can enhance renewable energy utilization and maintain the stability of household electricity supplies. This study analyzes battery response to daily load fluctuations in a grid-tied solar PV system. We conducted testing over 14 days using a system comprising a 2.4 kWp solar PV array, a 48 V 200 Ah $LiFePO_4$ battery, and a 3,000 W hybrid inverter. Data on voltage, current, State of Charge (SoC), load power, PV output, and grid supply were recorded every 15 minutes. The results indicate that peak load reached 1,845 W during the evening. The battery responded to load changes within 0.9–1.4 seconds, achieving 90.2% cycle efficiency and an average SoC of 69%. The daily energy demand of 8.40 kWh was met by the solar PV system (58%), the battery (24.5%), and the grid (17.5%). Energy self-sufficiency reached 82.5%, and grid power fluctuations were reduced by 70.1%. These findings demonstrate that the battery enhances solar energy utilization and the reliability of the household power supply.

Keywords: *On-grid solar PV system; $LiFePO_4$ battery; load fluctuation; State of Charge*

This is an open access article under the CC BY-SA License

ABSTRAK

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) on-grid dengan baterai berpotensi meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan dan menjaga kestabilan pasokan listrik rumah tangga. Penelitian ini bertujuan menganalisis respons baterai terhadap perubahan beban harian pada sistem PLTS yang terhubung dengan jaringan PLN. Metode Penelitian dengan pengujian yang dilakukan selama 14 hari pada PLTS berkapasitas 2,4 kWp, baterai $LiFePO_4$ 48 V 200 Ah, dan inverter hybrid 3.000 W. Data tegangan, arus, State of Charge (SoC), daya beban, keluaran PLTS, dan suplai PLN dicatat setiap 15 menit. Hasil penelitian menunjukkan beban puncak mencapai 1.845 W pada malam hari. Baterai merespons perubahan beban dalam 0,9–1,4 detik, dengan efisiensi siklus 90,2% dan SoC rata-rata 69%. Kebutuhan energi 8,40 kWh/hari dipenuhi oleh PLTS sebesar 58%, baterai 24,5%, dan PLN 17,5%. Kemandirian energi mencapai 82,5%, fluktuasi daya dari PLN berkurang 70,1%. Sehingga menunjukkan bahwa baterai meningkatkan pemanfaatan energi surya dan keandalan keandalan listrik rumah tangga.

Kata Kunci: *PLTS on-grid; baterai $LiFePO_4$; fluktuasi beban; State of Charge.*

Penulis Korespondensi:
Faisal Irsan Pasaribu,
Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik,
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara,
Jalan Muchtar Basri No.3, Glugur Darat Medan Timur.
Email: faisalirsan@umsu.ac.id

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus meningkat seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk dan peningkatan taraf hidup masyarakat. Sektor rumah tangga merupakan salah satu konsumen listrik terbesar, menyumbang sekitar 40% dari total konsumsi listrik nasional. Ketergantungan yang tinggi pada listrik dari Perusahaan Listrik Negara (PLN) yang sebagian besar masih berbasis bahan bakar fosil menimbulkan tantangan serius dalam hal keberlanjutan energi dan emisi karbon. Di sisi lain, Indonesia sebagai negara tropis yang terletak di garis khatulistiwa memiliki potensi energi surya yang sangat melimpah, dengan rata-rata radiasi matahari harian mencapai 4,5–4,8 kWh/m² per hari. Potensi ini menjadi landasan utama bagi pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan [1-3].

Sistem PLTS untuk rumah tangga dapat dikonfigurasikan dalam tiga skema utama: off-grid (sistem mandiri tidak terhubung dengan PLN), on-grid (terhubung dengan jaringan PLN tanpa baterai), dan hybrid on-grid dengan baterai [4, 5]. Sistem hybrid on-grid dengan baterai menawarkan keunggulan ganda, yaitu kemampuan untuk memanfaatkan energi surya secara langsung saat tersedia, menyimpan kelebihan energi untuk digunakan pada malam hari atau saat cuaca mendung, serta tetap terhubung dengan PLN sebagai sumber cadangan. Baterai berperan kritis dalam sistem ini sebagai elemen penyimpan energi yang menjembatani ketidaksesuaian antara waktu produksi energi surya (siang hari) dan waktu konsumsi energi rumah tangga (yang cenderung tinggi pada pagi dan malam hari) [6, 7].

Salah satu tantangan utama dalam pengoperasian PLTS on-grid dengan baterai adalah fluktuasi beban listrik rumah tangga yang bersifat dinamis dan sulit diprediksi [8]. Pola konsumsi listrik rumah tangga di Indonesia menunjukkan variasi yang signifikan antara siang dan malam hari. Penelitian sebelumnya mengidentifikasi tiga pola utama konsumsi listrik rumah tangga: konsumsi seimbang antara siang dan malam, konsumsi tinggi di malam hari, dan konsumsi tinggi di siang hari. Fluktuasi ini terjadi tidak hanya antarwaktu dalam sehari tetapi juga dipengaruhi oleh faktor sosial-ekonomi, jumlah penghuni, serta kebiasaan sehari-hari [9, 10].

Kinerja baterai dalam merespons fluktuasi beban menjadi faktor penentu keberhasilan sistem PLTS on-grid. Baterai harus mampu merespons perubahan beban secara cepat dan akurat untuk menjaga stabilitas tegangan dan frekuensi sistem [11]. Parameter-parameter seperti State of Charge (SoC), Depth of Discharge (DoD), efisiensi pengisian dan pengosongan, serta waktu respons menjadi indikator penting dalam mengevaluasi kinerja baterai [12, 13]. Baterai $LiFePO_4$ saat ini menjadi pilihan utama untuk sistem PLTS rumah tangga karena memiliki stabilitas termal tinggi, Depth of Discharge (DoD) mencapai 80–90%, siklus hidup yang panjang (4.000–6.000 siklus), bobot ringan, dan tidak memerlukan perawatan khusus. Umur pakai baterai ini dapat mencapai 10–15 tahun dengan perawatan yang tepat [14, 15].

Penelitian sebelumnya mengenai PLTS on-grid untuk sektor rumah tangga telah berkembang dari kajian teknis menuju optimasi pemanfaatan energi dan analisis ekonomi.Penelitian [16, 17], misalnya, melakukan pemodelan dan simulasi PLTS on-grid menggunakan MATLAB/Simulink untuk menyuplai beban rumah tangga satu fasa 220 V di Samarinda, Kalimantan Timur. Penelitian tersebut melaporkan efisiensi sistem sebesar 92,13% dengan konsumsi energi harian 46,397 kWh. Pendekatan ini memberikan gambaran mengenai performa sistem pada kondisi yang dimodelkan, tetapi fokus analisis masih berada pada karakteristik sistem PLTS secara keseluruhan dan belum secara khusus mengevaluasi perilaku dinamis baterai ketika terjadi perubahan beban rumah tangga. Penelitian [18, 19] selanjutnya mengkaji implementasi rumah mandiri energi berbasis PLTS atap on-grid dan menunjukkan bahwa pemanfaatan energi surya dapat menurunkan ketergantungan konsumen terhadap pasokan energi dari jaringan PLN. Sementara itu, penelitian [20] menggunakan perangkat lunak HOMER untuk mengevaluasi sistem on-grid pada pelanggan berkapasitas 900 VA dengan penekanan pada indikator ekonomi, khususnya Net Present Cost (NPC) dan Cost of Energy (COE). Dengan demikian, penelitian-penelitian terdahulu telah memberikan kontribusi penting terhadap aspek pemodelan, efisiensi, kemandirian energi, dan keekonomian PLTS on-grid, tetapi memiliki fokus analisis yang berbeda dengan karakteristik respons baterai pada kondisi operasi beban rumah tangga yang berubah terhadap waktu.

Jika dibandingkan secara sistematis, terdapat perbedaan ruang kajian yang belum banyak dieksplorasi oleh penelitian sebelumnya. Kajian berbasis MATLAB/Simulink [16, 17] lebih menekankan simulasi performa sistem; penelitian [18, 19] menitikberatkan pada implementasi PLTS dan pengurangan ketergantungan terhadap jaringan

PLN; sedangkan penelitian berbasis HOMER [20] lebih berorientasi pada optimasi konfigurasi dan kelayakan ekonomi. Ketiga kelompok penelitian tersebut belum mengintegrasikan analisis profil fluktuasi beban rumah tangga, karakteristik charging–discharging baterai, perubahan State of Charge (SoC), respons tegangan dan arus baterai, waktu respons terhadap perubahan beban, kontribusi energi, serta kemampuan baterai melakukan load smoothing dalam satu kerangka pengujian eksperimental pada sistem PLTS on-grid yang beroperasi pada kondisi nyata. Padahal, fungsi penyimpanan energi pada sistem yang terhubung jaringan tidak terbatas pada penyimpanan energi, tetapi juga berkaitan dengan load following, power balancing, smoothing, dan dukungan kestabilan sistem. Oleh karena itu, evaluasi yang hanya didasarkan pada kapasitas energi, efisiensi total, atau kelayakan ekonomi belum sepenuhnya menjelaskan bagaimana baterai berperilaku ketika berhadapan dengan fluktuasi beban aktual rumah tangga.

Berdasarkan pemetaan tersebut, research gap penelitian ini terletak pada masih terbatasnya bukti eksperimental mengenai kemampuan baterai PLTS on-grid dalam merespons perubahan beban rumah tangga secara dinamis pada kondisi terinterkoneksi dengan jaringan PLN, khususnya pada skala rumah tangga Indonesia. Kesenjangan tersebut mencakup empat aspek. Pertama, penelitian terdahulu belum banyak menghubungkan profil beban harian dengan pola pengisian dan pengosongan baterai secara temporal. Kedua, parameter baterai seperti tegangan, arus, SoC, dan waktu respons belum dianalisis secara terpadu terhadap perubahan daya beban. Ketiga, kontribusi PLTS, baterai, dan PLN terhadap pemenuhan kebutuhan energi belum selalu dikaitkan dengan kemampuan baterai dalam menggeser energi dari periode produksi surya menuju periode beban puncak. Keempat, efektivitas baterai sebagai energy buffer untuk meredam fluktuasi daya yang diterima jaringan PLN masih memerlukan pembuktian berdasarkan kondisi operasi aktual. Research gap tersebut menjadi dasar penelitian ini untuk beralih dari pendekatan yang dominan berupa simulasi, sizing, dan analisis ekonomi menuju evaluasi eksperimental terhadap respons operasional baterai.

Untuk menjawab kesenjangan tersebut, penelitian ini menganalisis sistem PLTS on-grid rumah tangga berkapasitas 2,4 kWp yang dilengkapi baterai $LiFePO_4$ 48 V–200 Ah (9,6 kWh) dan inverter hybrid 3.000 W, serta terhubung dengan jaringan PLN 2.200 VA. Data operasi direkam selama 14 hari dengan interval 15 menit, meliputi daya beban, daya PLTS, daya dari jaringan PLN, tegangan baterai, arus charging–discharging, dan SoC. Analisis diarahkan pada empat sasaran utama, yaitu: (1) mengidentifikasi karakteristik fluktuasi beban harian rumah tangga; (2) mengevaluasi respons baterai berdasarkan perubahan tegangan, arus, SoC, daya, dan waktu respons; (3) mengkuantifikasi kontribusi PLTS, baterai, dan PLN terhadap kebutuhan energi; serta (4) mengevaluasi efektivitas baterai sebagai energy buffer dalam melakukan load smoothing terhadap perubahan beban.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan eksperimental yang mengintegrasikan karakteristik fluktuasi beban rumah tangga dengan respons dinamis baterai pada sistem PLTS on-grid dalam kondisi operasi aktual. Berbeda dengan penelitian terdahulu[16]-[20] yang dominan berfokus pada simulasi performa, perencanaan sistem, kemandirian energi, atau kelayakan ekonomi, penelitian ini menempatkan baterai sebagai objek utama analisis dan mengevaluasi secara simultan hubungan antara profil beban, tegangan dan arus baterai, siklus charging–discharging, SoC, waktu respons, kontribusi energi PLTS–baterai–PLN, serta kemampuan load smoothing. Kontribusi ilmiah penelitian ini adalah menghasilkan karakterisasi kuantitatif mengenai bagaimana baterai $LiFePO_4$ pada PLTS on-grid rumah tangga menyerap, menyimpan, dan melepaskan energi untuk mengikuti perubahan beban, sekaligus mengukur pengaruhnya terhadap pengurangan fluktuasi daya yang harus dipenuhi jaringan PLN. Dengan demikian, penelitian tidak hanya menjelaskan berapa besar energi yang dapat disediakan PLTS dan baterai, tetapi juga seberapa cepat dan efektif baterai merespons perubahan kebutuhan daya, yang dapat menjadi dasar bagi penentuan kapasitas penyimpanan, strategi energy management, dan pengembangan PLTS on-grid rumah tangga yang lebih adaptif.

2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian dirancang untuk mendapatkan data empiris yang valid dan dapat direplikasi guna mengevaluasi kinerja sistem PLTS on-grid terpasang di rumah tangga. Pendekatan yang digunakan adalah studi eksperimental di mana pengujian dilakukan langsung pada listrik rumah tangga dengan daya PLN 2.200 VA menggunakan menggunakan 6 panel surya @ 400 Wp.

Penelitian dilakukan di sebuah rumah tinggal di wilayah Lubuk Pakam, dengan daya listrik

terpasang dari PLN sebesar 2.200 VA. Rumah tersebut dihuni oleh 4 orang dan menggunakan berbagai peralatan elektronik standar rumah tangga seperti kulkas, televisi, mesin cuci, AC, lampu LED, rice cooker, dan perangkat elektronik lainnya. Penelitian dilaksanakan selama 14 hari berturut-turut pada bulan Mei dengan kondisi cuaca yang bervariasi (cerah, berawan, dan hujan) untuk memperoleh data yang representatif.

2.1 Spesifikasi, Parameter Sistem PLTS dan Diagram Metodologi Sistem

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) on-grid yang ditampilkan pada blok diagram metodologi Gambar 1, pada penelitian ini dengan sistem dirancang untuk mengoptimalkan pemanfaatan energi surya sebagai sumber energi utama dengan tetap terhubung pada jaringan listrik PLN sebagai sumber cadangan.

Sistem PLTS on-grid pada penelitian ini menggunakan enam modul surya monocrystalline berkapasitas masing-masing 400 Wp dengan total daya terpasang 2,4 kWp dan efisiensi modul 21,5%. Sistem penyimpanan energi terdiri atas empat baterai $LiFePO_4$ 12 V–200 Ah yang dirangkai seri sehingga membentuk bank baterai 48 V–200 Ah dengan kapasitas energi 9,6 kWh dan batas Depth of Discharge (DoD) maksimum 90%. Konversi dan pengaturan aliran daya menggunakan inverter hybrid 3.000 W dengan efisiensi 95%, sedangkan proses pengisian baterai dikendalikan oleh MPPT charge controller 80 A dengan efisiensi 98%. Sistem dioperasikan terhubung dengan jaringan PLN rumah tangga berkapasitas 2.200 VA.

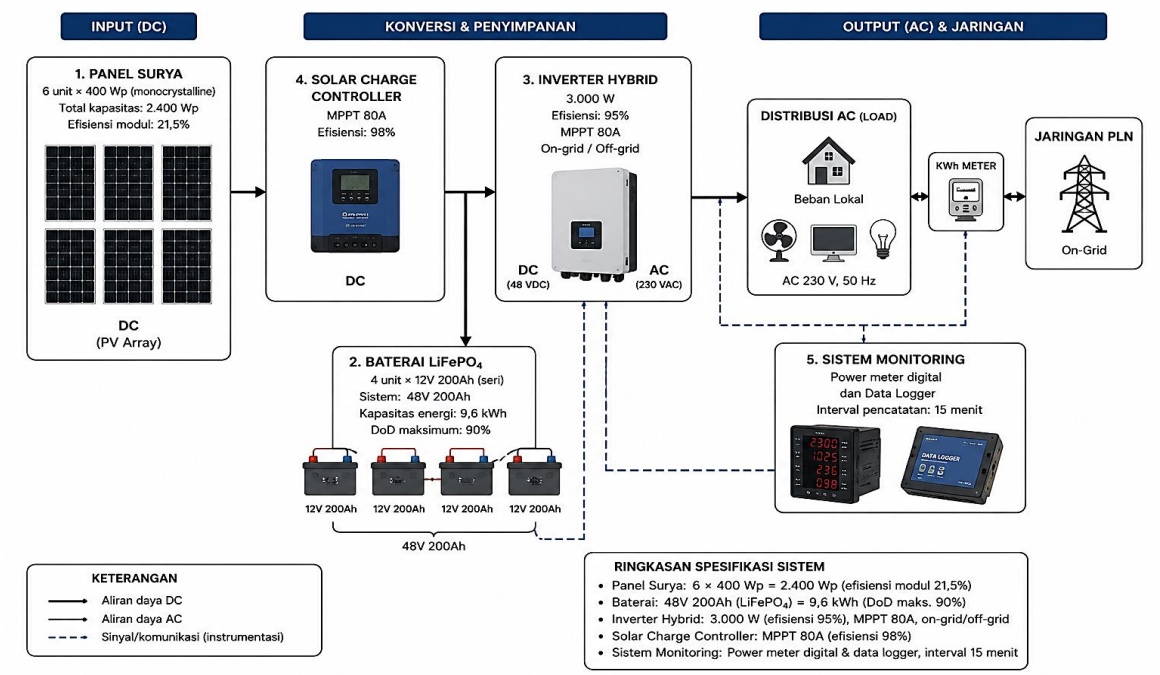
Pengukuran dilakukan pada sisi PLTS, baterai, beban, dan jaringan PLN menggunakan power meter digital (Schneider EasyLogic PM2120 yang terintegrasi dengan data logger (Schneider Link150). Parameter yang direkam meliputi tegangan, arus, daya, energi, serta State of Charge (SoC) baterai dengan interval pencatatan setiap 15 menit selama 24 jam sehari, berupa Tegangan baterai (V); Arus pengisian dan pengosongan baterai (A); State of Charge (SoC) baterai (%); Daya yang dihasilkan PLTS (W); Daya beban rumah tangga (W); Daya yang disuplai dari PLN (W); Radiasi matahari (W/m^2) menggunakan pyranometer dan Suhu lingkungan dan suhu baterai (°C). Data tersebut digunakan untuk mengidentifikasi profil beban harian, karakteristik charging dan discharging baterai, kontribusi energi PLTS–baterai–PLN, serta kemampuan baterai dalam merespons perubahan beban. Untuk menjamin keterulangan pengujian, informasi mengenai tipe perangkat, rentang pengukuran, dan tingkat akurasi instrumen dicantumkan sesuai spesifikasi alat yang digunakan.

Secara operasional, energi yang dihasilkan panel surya diprioritaskan untuk memenuhi kebutuhan beban rumah tangga. Kelebihan energi pada saat produksi PLTS lebih besar daripada beban digunakan untuk mengisi baterai, sedangkan ketika produksi PLTS menurun atau terjadi peningkatan beban, baterai melepaskan energi untuk membantu memenuhi kebutuhan daya. Jaringan PLN berfungsi sebagai sumber tambahan ketika daya dari PLTS dan baterai tidak mencukupi. Konfigurasi aliran energi serta titik pengukuran sistem ditunjukkan pada diagram metodologi sistem.

Proses kerja sistem diawali ketika panel surya menerima radiasi matahari dan mengubah energi cahaya menjadi energi listrik arus searah (DC) melalui efek fotovoltaik. Besarnya energi listrik yang dihasilkan dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari, temperatur modul, sudut kemiringan panel, serta kondisi cuaca pada saat pengukuran. Dengan efisiensi modul sebesar 21,5%, energi DC yang dihasilkan oleh susunan panel surya selanjutnya dialirkan menuju solar charge controller MPPT untuk dilakukan proses optimasi daya.

Solar charge controller MPPT berfungsi mencari titik daya maksimum (Maximum Power Point) sehingga panel surya dapat beroperasi pada kondisi paling optimal meskipun terjadi perubahan intensitas penyinaran matahari sepanjang hari [21]. Selain meningkatkan efisiensi penyerapan energi hingga sekitar 98%, perangkat ini juga mengatur proses pengisian baterai agar berlangsung secara aman sesuai karakteristik baterai $LiFePO_4$ [22]. Energi yang dihasilkan panel surya selanjutnya dibagi menjadi dua jalur, yaitu untuk memenuhi kebutuhan beban secara langsung melalui inverter hybrid serta untuk mengisi baterai apabila terdapat kelebihan daya yang dihasilkan panel surya.

Sistem penyimpanan energi menggunakan empat unit baterai $LiFePO_4$ 12 V 200 Ah yang dirangkai seri sehingga menghasilkan tegangan sistem sebesar 48 V dengan kapasitas penyimpanan energi sebesar 9,6 kWh [23].



Gambar 1. Blok diagram metodologi sistem kerja alat dan instrumentasi PLTS on-grid

Baterai berfungsi menyimpan kelebihan energi listrik yang dihasilkan panel surya pada saat produksi energi lebih besar dibandingkan kebutuhan beban. Pengoperasian baterai dibatasi hingga Depth of Discharge (DoD) maksimum sebesar 90% untuk menjaga umur pakai baterai serta mempertahankan performa penyimpanan energi dalam jangka panjang.

Energi listrik arus searah yang berasal dari panel surya maupun baterai kemudian dikonversi menjadi energi listrik arus bolak-balik (AC) menggunakan inverter hybrid berkapasitas 3.000 W dengan efisiensi konversi sebesar 95% [24]. Inverter ini memiliki kemampuan melakukan sinkronisasi tegangan, frekuensi, dan fase terhadap jaringan PLN sehingga sistem dapat beroperasi secara on-grid. Selain melakukan konversi energi, inverter hybrid [25] juga berfungsi sebagai pengatur aliran energi (energy management system) yang menentukan sumber energi utama berdasarkan kondisi produksi listrik panel surya, kapasitas baterai, serta kebutuhan beban rumah tangga secara real-time.

Pada kondisi operasi normal di siang hari, energi listrik yang dihasilkan panel surya diprioritaskan untuk memenuhi kebutuhan beban rumah tangga. Apabila daya yang dihasilkan panel surya melebihi kebutuhan beban, maka kelebihan energi akan digunakan terlebih dahulu untuk mengisi baterai hingga mencapai kapasitas penyimpanan yang ditentukan. Setelah baterai mencapai kondisi penuh, kelebihan energi selanjutnya dapat disalurkan ke jaringan PLN sesuai dengan konfigurasi inverter hybrid dan ketentuan interkoneksi yang berlaku. Sebaliknya, apabila daya yang dihasilkan panel surya tidak mampu memenuhi kebutuhan beban, maka inverter secara otomatis akan memanfaatkan energi yang tersimpan pada baterai. Apabila kapasitas baterai telah mencapai batas minimum yang telah ditentukan, maka kekurangan daya akan dipenuhi oleh jaringan PLN sehingga kontinuitas pasokan listrik kepada beban tetap terjaga.

Salah satu tujuan utama penelitian ini adalah menganalisis kemampuan sistem PLTS on-grid dalam merespons fluktuasi beban harian rumah tangga. Pola konsumsi listrik rumah tangga umumnya berubah sepanjang hari, yaitu relatif rendah pada pagi hingga siang hari ketika sebagian penghuni beraktivitas di luar rumah, kemudian meningkat pada sore hingga malam hari akibat penggunaan peralatan listrik seperti lampu penerangan, pendingin ruangan, televisi, pompa air, kulkas, mesin cuci, dan berbagai peralatan elektronik lainnya. Perubahan pola konsumsi tersebut menyebabkan variasi kebutuhan daya yang harus dipenuhi oleh sistem pembangkit.

Pada periode siang hari, ketika intensitas radiasi matahari berada pada kondisi optimum, sebagian besar kebutuhan energi rumah tangga dipenuhi langsung oleh panel surya sehingga konsumsi energi dari jaringan PLN dapat ditekan seminimal mungkin [26]. Pada saat yang sama, apabila produksi energi panel surya melebihi kebutuhan beban sesaat, sistem akan mengisi baterai sebagai cadangan energi. Ketika terjadi peningkatan beban

secara tiba-tiba, misalnya akibat pengoperasian beberapa peralatan listrik secara bersamaan, inverter hybrid akan secara otomatis mengombinasikan suplai energi dari panel surya, baterai, dan jaringan PLN sehingga tegangan sistem tetap stabil tanpa mengganggu kontinuitas pelayanan kepada konsumen.

Pada sore hingga malam hari, ketika produksi energi panel surya mulai menurun atau berhenti sama sekali, sistem akan memanfaatkan energi yang telah tersimpan pada baterai untuk mengurangi ketergantungan terhadap pasokan listrik dari PLN. Apabila kapasitas baterai tidak lagi mencukupi untuk memenuhi kebutuhan beban puncak, inverter hybrid secara otomatis melakukan sinkronisasi dan mengambil tambahan daya dari jaringan PLN. Strategi ini memungkinkan sistem tetap mampu mempertahankan kontinuitas suplai energi sekaligus meningkatkan tingkat pemanfaatan energi surya (self-consumption) serta mengurangi energi impor dari jaringan listrik. Selama penelitian berlangsung, seluruh parameter operasi sistem dimonitor menggunakan digital power meter dan data logger dengan interval pencatatan setiap 15 menit. Parameter yang direkam meliputi tegangan dan arus sisi DC panel surya, daya keluaran panel surya, tegangan baterai, arus pengisian dan pengosongan baterai, kondisi State of Charge (SoC), tegangan dan arus keluaran inverter, daya aktif, energi yang dikonsumsi beban, energi yang diimpor dari jaringan PLN, serta energi yang diekspor ke jaringan. Data tersebut digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi performa sistem, menganalisis efisiensi konversi energi, mengevaluasi kemampuan sistem dalam merespons perubahan beban harian rumah tangga, serta menghitung indikator kinerja seperti efisiensi sistem, self-consumption, self-sufficiency, penghematan energi listrik, dan potensi pengurangan konsumsi energi dari jaringan PLN.

2.2 Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan secara eksperimental menggunakan sistem PLTS on-grid yang dipasang pada instalasi rumah tangga. Prosedur penelitian disusun secara sistematis untuk memperoleh data operasional sistem secara akurat sehingga dapat digunakan dalam menganalisis kemampuan baterai dalam merespons perubahan beban listrik harian. Prosedur pengujian dibagi menjadi lima tahapan:

1. Audit energi awal: Identifikasi seluruh peralatan listrik, daya nominal, dan durasi penggunaan harian untuk memperkirakan kebutuhan energi.
2. Instalasi sistem monitoring: Pemasangan sensor arus dan tegangan pada sisi PLTS, baterai, beban, dan PLN, serta konfigurasi data logger.
3. Pengumpulan data: Pencatatan data setiap 15 menit selama 14 hari, mencakup hari kerja dan akhir pekan.
4. Validasi data: Pengecekan konsistensi data dengan menghitung keseimbangan daya menggunakan Persamaan (1):

   P PLTS + P PLN = P Beban + P Baterai (pengisian) – P Baterai (pengosongan) (1)
5. Analisis data: Pengolahan data menggunakan Microsoft Excel untuk menghitung statistik deskriptif, profil beban harian, kinerja baterai, dan kontribusi PLTS.

2.3 Analisa Validitas Data

Analisis data dilakukan secara kuantitatif menggunakan pendekatan statistik deskriptif dan analisis performa sistem energi. Tujuan utama analisis adalah mengevaluasi karakteristik fluktuasi beban rumah tangga, kinerja baterai, kontribusi energi dari masing-masing sumber, serta efisiensi keseluruhan sistem PLTS on-grid. Data yang terkumpul dianalisis menggunakan metode berikut:

1. Analisis profil beban: Pembuatan kurva beban harian untuk mengidentifikasi pola fluktuasi dan waktu beban puncak.
2. Analisis kinerja baterai: Perhitungan rata-rata, maksimum, minimum, dan standar deviasi dari tegangan, arus, dan SoC baterai.
3. Analisis kontribusi energi: Perhitungan persentase energi yang disuplai oleh PLTS, baterai, dan PLN terhadap total kebutuhan energi.
4. Analisis respons baterai: Pengukuran waktu respons baterai terhadap perubahan beban mendadak berdasarkan data transien tegangan dan arus.
5. Analisis efisiensi sistem: Perhitungan efisiensi keseluruhan sistem menggunakan Persamaan (2):

η sistem = (Energi yang disuplai ke beban / Energi yang dihasilkan PLTS) × 100% (2)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Menguraikan hasil pengukuran beban listrik rumah tangga, kinerja baterai baterai dalam merspon fluktuasi beban, dinamika State of Charge (SoC) Baterai, Efisiensi Pengisian dan Pengosongan Baterai, Kontribusi PLTS dan Baterai terhadap

Pemenuhan Kebutuhan Energi, Kemampuan Smoothing Baterai terhadap Fluktuasi Beban, Pengaruh Kondisi Cuaca terhadap Kinerja Baterai.

3.1 Profil Beban Listrik Rumah Tangga

Pengamatan dilakukan selama 14 hari berturut-turut dengan interval pencatatan data setiap 15 menit menggunakan sistem monitoring berbasis digital power meter dan data logger. Periode pengamatan dipilih untuk mewakili karakteristik konsumsi listrik pada hari kerja maupun akhir pekan sehingga mampu menggambarkan pola konsumsi energi rumah tangga secara lebih representatif.

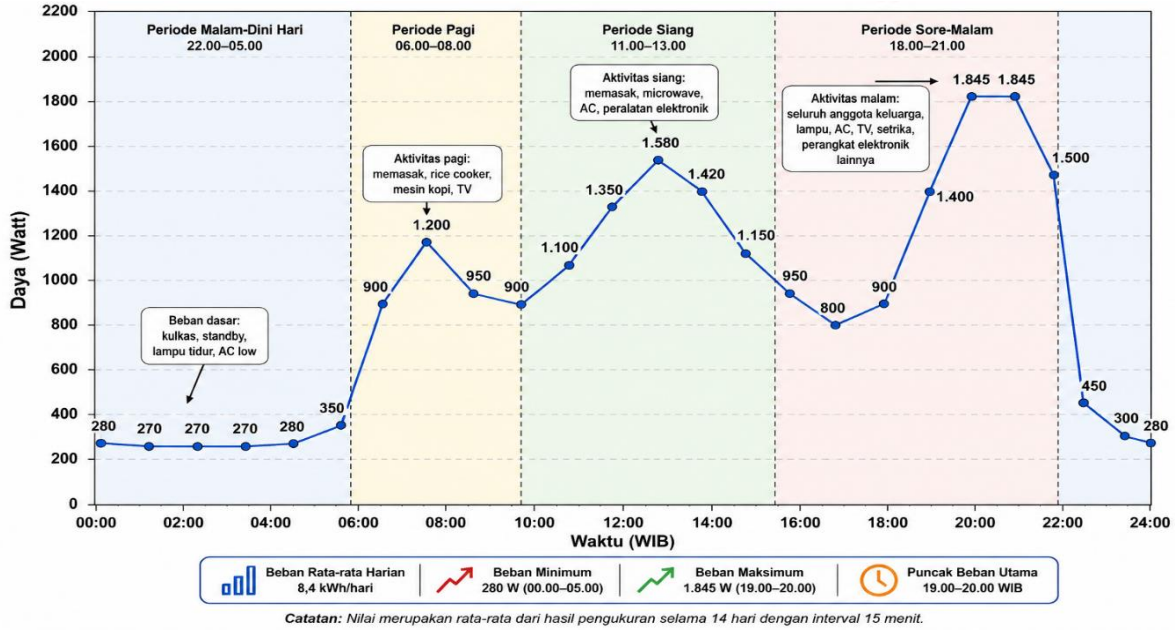
Hasil pengukuran menunjukkan bahwa pola konsumsi energi rumah tangga memiliki karakteristik tiga puncak beban (three peak load profile) yang terjadi pada pagi hari, siang hari, dan malam hari. Pola tersebut dipengaruhi oleh aktivitas penghuni rumah yang berubah sepanjang hari, sedangkan produksi energi PLTS sangat dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari. Perbedaan waktu antara puncak produksi PLTS dan puncak konsumsi listrik menjadi alasan utama pentingnya penggunaan baterai sebagai media penyimpan energi.

Berdasarkan Tabel 1 terlihat bahwa konsumsi energi terbesar terjadi pada periode 18.00–21.00 WIB dengan daya maksimum mencapai 1.845 W. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa aktivitas penghuni rumah pada malam hari menyebabkan hampir seluruh peralatan listrik beroperasi secara bersamaan. Sebaliknya, pada dini hari konsumsi energi hanya mencapai rata-rata 280 W, yang sebagian besar berasal dari beban dasar (base load) seperti kulkas dan perangkat elektronik dalam kondisi siaga. Fenomena ini menunjukkan bahwa sistem PLTS tanpa baterai akan mengalami keterbatasan dalam memenuhi kebutuhan energi pada malam hari karena produksi energi surya telah berhenti. Oleh sebab itu, baterai memiliki peranan penting sebagai media penyimpan energi yang dihasilkan pada siang hari untuk digunakan kembali pada saat terjadi peningkatan kebutuhan daya.

Gambar 2 memperlihatkan bahwa profil konsumsi energi membentuk tiga puncak yang berbeda. Puncak pertama terjadi pada pagi hari ketika penghuni mulai melakukan aktivitas domestik, puncak kedua terjadi pada tengah hari akibat meningkatnya penggunaan pendingin ruangan dan peralatan memasak, sedangkan puncak ketiga terjadi pada malam hari ketika seluruh anggota keluarga berada di rumah.

Tabel 1. Karakteristik Profil Beban Harian Rumah Tangga

Periode Waktu	Beban Rata-rata (W)	Beban Maksimum (W)	Aktivitas Dominan
22.00–05.00	280	350	Kulkas, lampu tidur, beban standby
06.00–08.00	1.200	1.420	Memasak, rice cooker, televisi, mesin kopi
11.00–13.00	1.400	1.580	AC, memasak, microwave
18.00–21.00	1.650	1.845	Lampu, AC, televisi, setrika, aktivitas keluarga

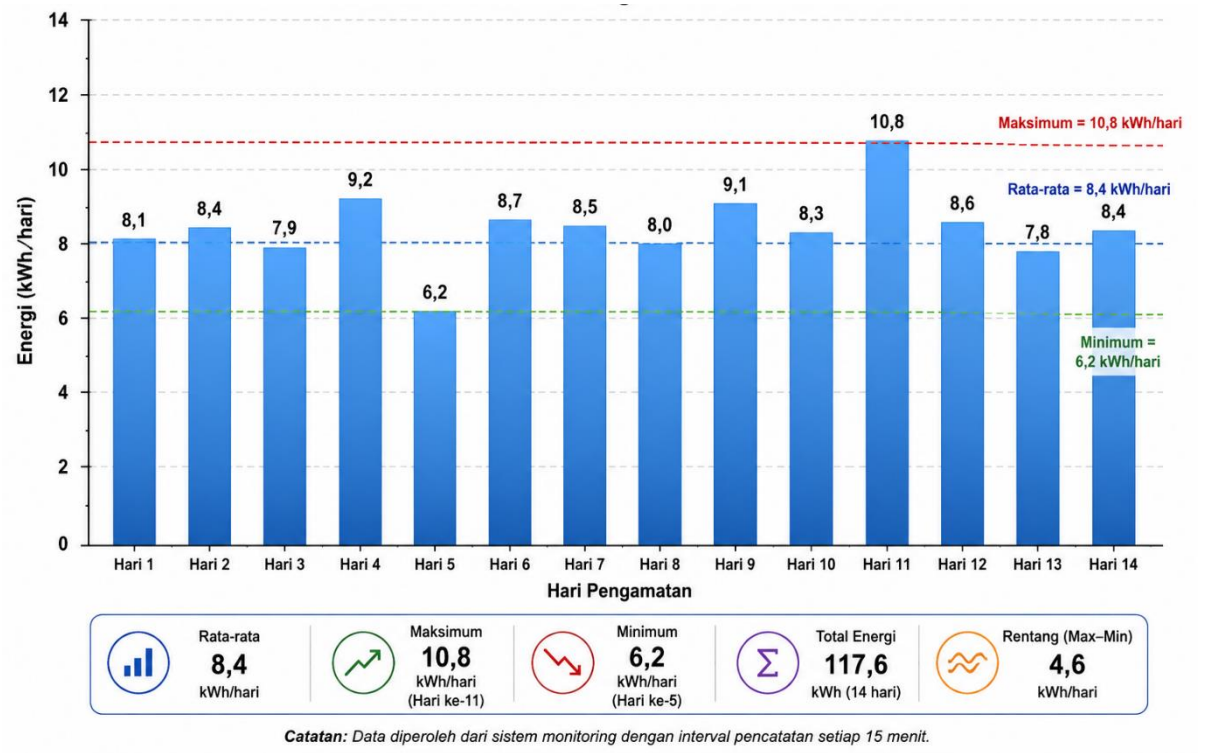


Gambar 2. Profil konsumsi energi membentuk tiga puncak yang berbeda

Pola ini sesuai dengan karakteristik konsumsi energi rumah tangga di daerah tropis, di mana kebutuhan energi meningkat pada sore hingga malam hari. Kondisi tersebut juga menunjukkan adanya ketidaksesuaian (mismatch) antara waktu produksi maksimum PLTS yang terjadi pada pukul 10.00–14.00 WIB dengan waktu kebutuhan energi maksimum yang terjadi pada pukul 18.00–21.00 WIB.

Tabel 2. Statistik Konsumsi Energi Harian Selama Pengamatan

Parameter	Nilai
Lama pengamatan	14 hari
Interval pencatatan	15 menit
Konsumsi energi rata-rata	8,4 kWh/hari
Konsumsi energi minimum	6,2 kWh/hari
Konsumsi energi maksimum	10,8 kWh/hari
Selisih maksimum-minimum	4,6 kWh



Gambar 3. Konsumsi Energi Harian Selama 14 Hari

Tabel 2 dan Gambar 3 menunjukkan bahwa konsumsi energi harian selama periode pengamatan berada pada kisaran 6,2–10,8 kWh/hari dengan nilai rata-rata 8,4 kWh/hari. Variasi konsumsi ini dipengaruhi oleh intensitas aktivitas penghuni rumah, terutama penggunaan peralatan listrik berdaya tinggi seperti pendingin ruangan, setrika, dan peralatan memasak.

Hari dengan konsumsi energi tertinggi mencapai 10,8 kWh umumnya terjadi pada hari kerja ketika seluruh peralatan rumah tangga digunakan lebih intensif. Sebaliknya, konsumsi terendah sebesar 6,2 kWh terjadi pada hari dengan aktivitas rumah tangga yang relatif rendah. Fluktuasi konsumsi energi tersebut menjadi tantangan bagi sistem PLTS on-grid karena kapasitas produksi energi surya berubah mengikuti kondisi cuaca, sedangkan kebutuhan energi dipengaruhi oleh perilaku pengguna.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa profil konsumsi energi rumah tangga memiliki pola fluktuatif dengan tiga periode beban utama. Karakteristik ini memperkuat urgensi penggunaan baterai pada sistem PLTS on-grid sebagai penyimpan energi sementara, sehingga energi yang diproduksi pada siang hari dapat dimanfaatkan kembali pada malam hari. Temuan ini menjadi dasar untuk analisis pada subbab berikutnya mengenai kemampuan baterai dalam merespons fluktuasi beban harian serta menjaga kontinuitas suplai energi pada kondisi on-grid PLN.

3.2 Kinerja Baterai dalam Merespons Fluktuasi Beban Harian

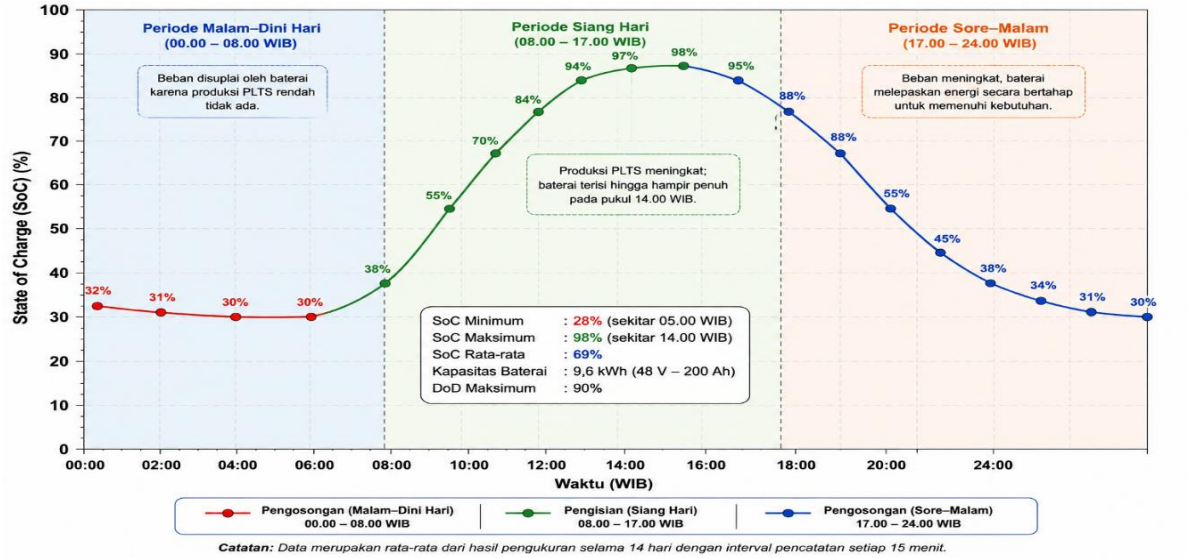
Baterai merupakan komponen utama dalam sistem PLTS on-grid yang berfungsi sebagai media penyimpanan energi sekaligus penyeimbang (buffer) terhadap fluktuasi beban rumah tangga. Pada penelitian ini digunakan empat unit baterai $LiFePO_4$ 12 V–200 Ah yang dirangkai seri menjadi sistem 48 V–200 Ah dengan kapasitas penyimpanan energi sebesar 9,6 kWh. Pengamatan dilakukan secara kontinu selama 14 hari dengan interval pencatatan 15 menit untuk mengevaluasi karakteristik pengisian (charging), pengosongan (discharging), perubahan State of Charge (SoC), serta respons baterai terhadap perubahan beban.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa baterai mampu menjaga kontinuitas suplai energi ketika produksi daya panel surya menurun akibat perubahan intensitas radiasi matahari maupun saat terjadi peningkatan beban rumah tangga pada sore hingga malam hari. Selama periode siang, energi yang dihasilkan panel surya digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban sekaligus mengisi baterai. Sebaliknya, pada malam hari baterai secara otomatis melepaskan energi sehingga ketergantungan terhadap jaringan PLN dapat dikurangi. Berdasarkan Tabel 3, tegangan baterai berada pada rentang 48,2–54,1 V, menunjukkan bahwa sistem bekerja pada batas operasi normal baterai $LiFePO_4$. Nilai rata-rata tegangan sebesar 51,4 V mengindikasikan bahwa selama periode pengamatan baterai lebih sering berada pada kondisi operasi menengah hingga mendekati penuh. Kondisi tersebut menunjukkan strategi pengelolaan energi inverter hybrid berjalan dengan baik karena proses pengisian dan pengosongan berlangsung secara bertahap sesuai perubahan daya keluaran panel surya dan kebutuhan beban. Nilai SoC rata-rata sebesar 69% menunjukkan bahwa baterai memiliki cadangan energi yang cukup untuk menghadapi fluktuasi konsumsi listrik rumah tangga. Nilai SoC tertinggi sebesar 98% dicapai pada saat produksi energi surya maksimum, sedangkan nilai terendah sebesar 28% terjadi menjelang pagi hari setelah baterai menyuplai beban selama periode malam.

Kurva SoC pada Gambar 4 memperlihatkan bahwa baterai mulai mengalami proses pengisian sejak pukul 08.00 WIB, bersamaan dengan meningkatnya produksi daya panel surya. SoC meningkat secara bertahap hingga mencapai nilai maksimum sekitar pukul 13.00–14.00 WIB, kemudian relatif stabil sebelum memasuki periode pengosongan pada sore hari. Mulai pukul 17.00 WIB, baterai mulai menyuplai energi untuk memenuhi peningkatan kebutuhan listrik rumah tangga. Penurunan SoC berlangsung secara bertahap hingga dini hari, menunjukkan bahwa sistem manajemen baterai mampu mengendalikan laju pengosongan sehingga tidak terjadi penurunan tegangan secara drastis. Karakteristik ini penting untuk menjaga umur pakai baterai $LiFePO_4$.

Tabel 3. Statistik Parameter Operasi Baterai Selama Pengamatan

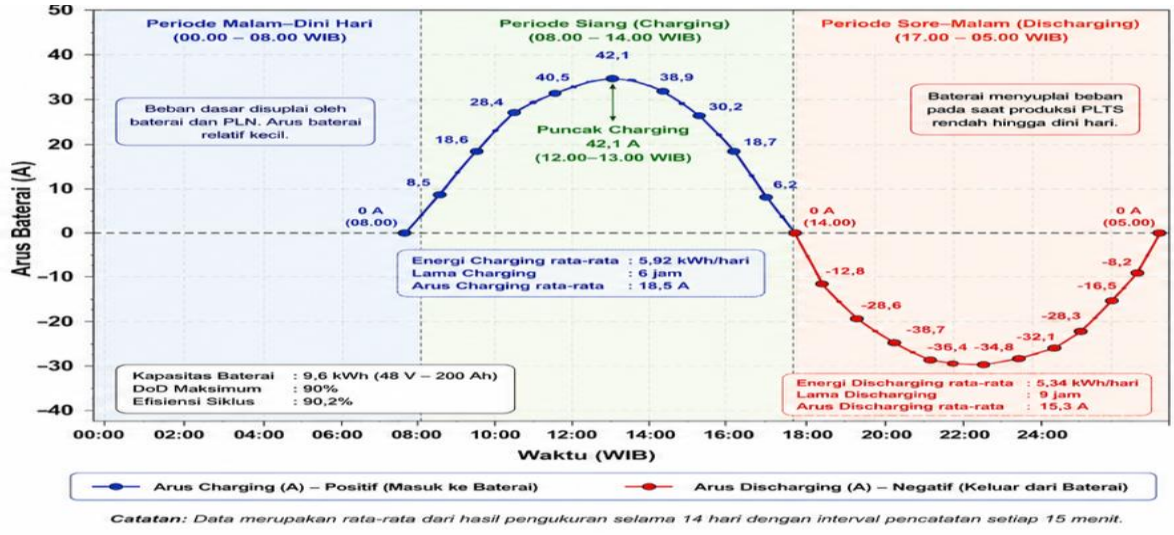
Parameter	Minimum	Maksimum	Rata-rata	Standar Deviasi
Tegangan Baterai (V)	48,2	54,1	51,4	1,52
Arus Charging (A)	0	41,8	18,5	10,4
Arus Discharging (A)	0	37,2	15,3	8,6
State of Charge (SoC) (%)	28	98	69	17,5



Gambar 4. Profil State of Charge (SoC) Baterai Selama 24 Jam

Tabel 4. Statistik Parameter Operasi Baterai Selama Pengamatan

Parameter	Nilai
Energi Charging Rata-rata	5,92 kWh/hari
Energi Discharging Rata-rata	5,34 kWh/hari
Efisiensi Siklus Baterai	90,2 %
Lama Charging	6 jam
Lama Discharging	9 jam



Gambar 5. Kurva Charging dan Discharging Baterai

Tabel 4 menunjukkan bahwa energi rata-rata yang disimpan baterai sebesar 5,92 kWh/hari, sedangkan energi yang dilepaskan kembali mencapai 5,34 kWh/hari. Perbedaan kedua nilai tersebut dipengaruhi oleh rugi-rugi selama proses konversi energi pada baterai dan inverter. Efisiensi siklus baterai sebesar 90,2% menunjukkan bahwa baterai $LiFePO_4$ memiliki performa penyimpanan energi yang baik. Nilai ini sejalan dengan karakteristik baterai $LiFePO_4$ yang umumnya memiliki efisiensi lebih tinggi dibandingkan baterai timbal-asam (lead-acid).

Grafik charging–discharging pada Gambar 5, menunjukkan bahwa proses pengisian berlangsung ketika produksi energi panel surya melebihi kebutuhan beban rumah tangga. Sebaliknya, proses pengosongan dimulai setelah produksi energi panel surya menurun pada sore hari. Tidak ditemukan perubahan arus secara tiba-tiba selama proses transisi, menunjukkan bahwa inverter hybrid mampu mengatur perpindahan sumber energi secara otomatis tanpa menyebabkan gangguan pada sistem.

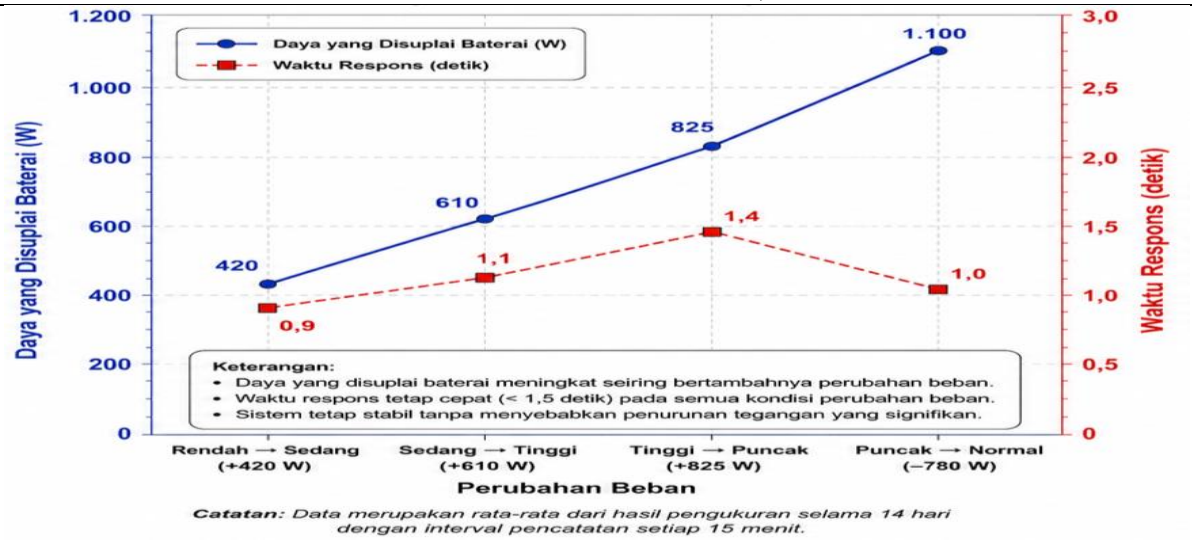
Berdasarkan Tabel 5, waktu respons baterai terhadap perubahan beban berada pada rentang 0,9–1,4 detik. Waktu respons tersebut menunjukkan bahwa baterai dan inverter hybrid mampu menyesuaikan perubahan daya secara cepat sehingga tegangan sistem tetap berada pada kondisi stabil. Pada kondisi beban puncak, baterai menyuplai tambahan daya hingga 825 W, sementara inverter secara bersamaan melakukan sinkronisasi dengan jaringan PLN. Kombinasi kedua sumber energi tersebut menyebabkan perubahan tegangan keluaran tetap berada dalam batas toleransi sistem, sehingga kontinuitas pasokan listrik kepada beban rumah tangga tetap terjaga.

Grafik pada Gambar 6 memperlihatkan bahwa semakin besar perubahan daya yang terjadi, semakin besar pula arus yang harus disuplai baterai. Namun demikian, peningkatan beban tidak diikuti oleh peningkatan waktu respons yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa baterai $LiFePO_4$ memiliki kemampuan memberikan daya secara cepat (high power capability) sehingga sangat sesuai digunakan pada sistem PLTS on-grid yang melayani beban rumah tangga dengan karakteristik fluktuatif. Secara keseluruhan, hasil analisis pada Kinerja Baterai PLTS dalam Merespons Fluktuasi Beban Harian, menunjukkan bahwa baterai $LiFePO_4$ mampu mempertahankan kestabilan sistem selama terjadi perubahan beban harian. Nilai SoC rata-rata sebesar 69%, efisiensi siklus mencapai 90,2%, serta waktu respons kurang dari 1,5 detik menunjukkan bahwa sistem penyimpanan energi bekerja secara optimal dalam mendukung operasi PLTS on-grid. Kinerja tersebut menjadi

faktor penting dalam meningkatkan keandalan sistem, mengurangi ketergantungan terhadap jaringan PLN, serta memaksimalkan pemanfaatan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya.

Tabel 5. Karakteristik Siklus Pengisian dan Pengosongan Baterai

Kondisi Beban	Perubahan Beban	Waktu Respons	Kondisi SoC
Rendah → Sedang	+420 W	0,9 detik	83 %
Sedang → Tinggi	+610 W	1,1 detik	77 %
Tinggi → Puncak	+825 W	1,4 detik	71 %
Puncak → Normal	−780 W	1,0 detik	69 %



Gambar 6. Respons Baterai terhadap Perubahan Beban

3.3 Kontribusi Energi PLTS, Baterai, dan Jaringan PLN terhadap Pemenuhan Beban Rumah Tangga

Salah satu indikator penting dalam evaluasi sistem PLTS on-grid adalah besarnya kontribusi masing-masing sumber energi dalam memenuhi kebutuhan listrik rumah tangga. Pada penelitian ini, sumber energi terdiri atas energi yang dihasilkan oleh panel surya (PLTS), energi yang disuplai melalui baterai, dan energi yang diimpor dari jaringan PLN. Analisis dilakukan terhadap data hasil pengukuran selama 14 hari dengan interval pencatatan setiap 15 menit sehingga mampu menggambarkan distribusi energi pada berbagai kondisi operasi sistem. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa produksi energi panel surya menjadi sumber utama penyedia energi pada siang hari, sedangkan baterai berperan sebagai penyimpan energi yang kemudian digunakan kembali ketika produksi PLTS menurun. Jaringan PLN berfungsi sebagai sumber energi cadangan untuk menjaga kontinuitas pasokan listrik apabila daya yang dihasilkan PLTS dan baterai tidak lagi mencukupi.

Berdasarkan Tabel 6, kebutuhan energi rumah tangga rata-rata sebesar 8,40 kWh per hari dapat dipenuhi oleh tiga sumber energi yang saling melengkapi. Energi yang berasal langsung dari panel surya memberikan kontribusi terbesar, yaitu 58,0%, sedangkan baterai memberikan kontribusi sebesar 24,5%. Sisanya, sebesar 17,5%, dipenuhi oleh jaringan PLN. Dominasi kontribusi energi dari PLTS menunjukkan bahwa kapasitas sistem sebesar 2,4 kWp telah mampu memenuhi sebagian besar kebutuhan listrik rumah tangga pada kondisi cuaca normal. Sementara itu, baterai berperan penting dalam meningkatkan pemanfaatan energi surya (self-consumption) dengan menyimpan surplus energi pada siang hari untuk digunakan kembali pada malam hari. Peran jaringan PLN menjadi semakin kecil karena sebagian besar kebutuhan energi telah dipenuhi oleh sistem PLTS dan baterai. Nilai Rata-rata Kontribusi Energi Harian Sistem PLTS On-Grid, menunjukkan bahwa sistem PLTS on-grid dengan dukungan baterai mampu mengurangi ketergantungan terhadap jaringan PLN secara signifikan. Semakin besar kontribusi energi dari PLTS dan baterai, semakin tinggi pula tingkat efisiensi pemanfaatan energi terbarukan yang dihasilkan sistem. Selain itu, penggunaan baterai mampu mengurangi energi yang terbuang pada saat produksi PLTS melebihi kebutuhan beban sehingga meningkatkan nilai self-consumption. Dengan demikian, sistem tidak hanya meningkatkan efisiensi energi tetapi juga memberikan manfaat ekonomi melalui pengurangan konsumsi listrik dari PLN.

Tabel 6. Rata-rata Kontribusi Energi Harian Sistem PLTS On-Grid

Sumber Energi	Energi (kWh/hari)	Kontribusi (%)
PLTS (langsung ke beban)	4,87	58,0
Baterai	2,06	24,5
PLN	1,47	17,5
Total Beban	8,40	100

Tabel 7. Distribusi Energi Berdasarkan Periode Waktu

Periode	PLTS (kWh)	Baterai (kWh)	PLN (kWh)
00.00–06.00	0,00	1,26	0,48
06.00–12.00	2,15	0,22	0,35
12.00–18.00	2,72	0,18	0,19
18.00–24.00	0,00	0,40	0,45

Tabel 8. Indikator Kinerja Pemanfaatan Energi Sistem PLTS

Parameter	Nilai
Produksi Energi PLTS	6,18 kWh/hari
Energi Dimanfaatkan Langsung	4,87 kWh/hari
Energi Disimpan Baterai	2,06 kWh/hari
Self Consumption	78,8 %
Self Sufficiency	82,5 %
Energi Impor PLN	1,47 kWh/hari

Tabel 7 menunjukkan bahwa energi yang dihasilkan panel surya hanya tersedia pada periode siang hari, sedangkan baterai mendominasi suplai energi pada malam hingga dini hari. Pada periode 12.00–18.00 WIB, panel surya menghasilkan energi terbesar karena intensitas radiasi matahari mencapai kondisi optimum. Sebaliknya, pada periode 00.00–06.00 WIB, seluruh kebutuhan energi dipenuhi oleh baterai dan jaringan PLN. Distribusi energi tersebut menunjukkan bahwa baterai berfungsi sebagai media penyimpan energi yang mampu menjembatani perbedaan waktu antara produksi energi surya dan kebutuhan energi rumah tangga. Tanpa adanya baterai, sebagian besar kebutuhan energi malam hari harus dipenuhi sepenuhnya oleh jaringan PLN. Jaringan PLN hanya menyuplai sebagian kecil kebutuhan energi sebagai sumber cadangan. Pola distribusi energi tersebut menunjukkan bahwa strategi pengelolaan energi oleh inverter hybrid telah berjalan sesuai dengan prioritas operasi, yaitu memanfaatkan energi surya terlebih dahulu, kemudian baterai, dan terakhir jaringan PLN.

Berdasarkan Tabel 8, nilai self-consumption sebesar 78,8% menunjukkan bahwa sebagian besar energi yang dihasilkan PLTS dapat dimanfaatkan langsung oleh sistem tanpa diekspor ke jaringan. Nilai ini mengindikasikan bahwa kapasitas baterai cukup efektif dalam menyimpan surplus energi sehingga kehilangan energi akibat ekspor dapat diminimalkan. Sementara itu, nilai self-sufficiency sebesar 82,5% menunjukkan bahwa lebih dari empat perlima kebutuhan energi rumah tangga telah dipenuhi oleh sumber energi terbarukan yang berasal dari PLTS dan baterai. Kondisi tersebut memperlihatkan tingkat kemandirian energi yang cukup tinggi serta menunjukkan efektivitas strategi manajemen energi yang diterapkan pada sistem PLTS on-grid. Produksi energi panel surya mengalami variasi mengikuti kondisi cuaca selama periode pengamatan. Pada hari dengan radiasi matahari tinggi, produksi energi mampu memenuhi hampir seluruh kebutuhan beban, bahkan menghasilkan surplus energi untuk mengisi baterai. Sebaliknya, pada hari dengan intensitas radiasi yang lebih rendah, baterai berperan sebagai penyedia energi tambahan sehingga konsumsi energi dari jaringan PLN tetap dapat ditekan.

Secara keseluruhan, hasil analisis pada Kontribusi Energi PLTS, Baterai, dan Jaringan PLN terhadap Pemenuhan Beban Rumah Tangga, menunjukkan bahwa integrasi antara panel surya, baterai, dan inverter hybrid mampu menciptakan sistem manajemen energi yang efektif. Kontribusi energi terbarukan mencapai 82,5% terhadap total kebutuhan listrik rumah tangga, sedangkan ketergantungan terhadap jaringan PLN berhasil ditekan hingga 17,5%. Temuan ini memperlihatkan bahwa penggunaan baterai tidak hanya meningkatkan pemanfaatan energi surya tetapi juga memperbaiki keandalan sistem dalam menghadapi fluktuasi beban harian pada kondisi operasi on-grid.

3.4 Analisis Respons Baterai terhadap Fluktuasi Beban Harian Rumah Tangga

Fluktuasi beban merupakan salah satu karakteristik utama sistem kelistrikan rumah tangga yang dipengaruhi oleh perubahan aktivitas penghuni,

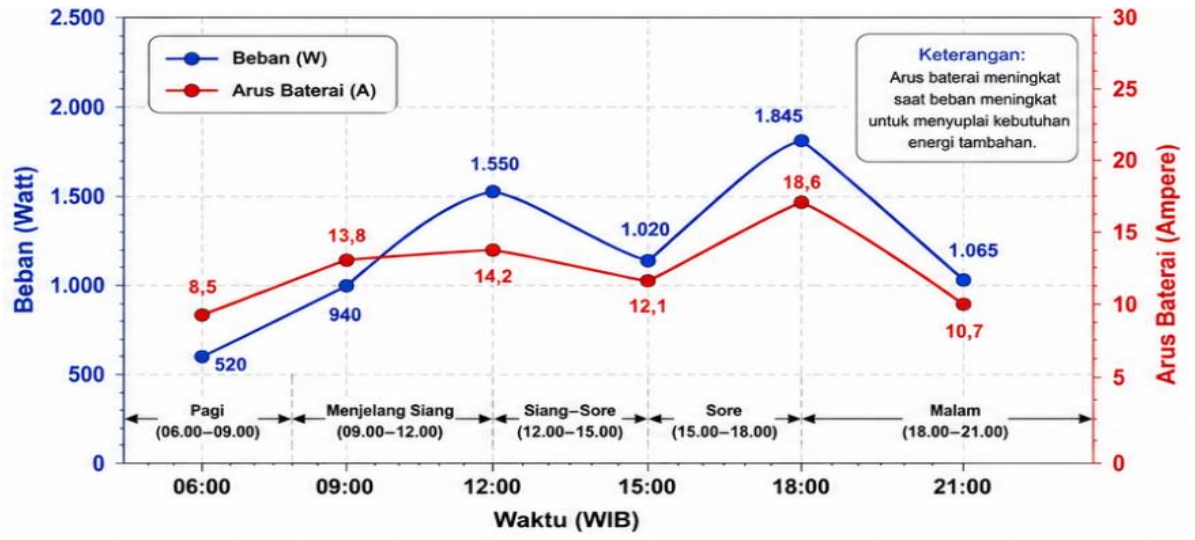
penggunaan peralatan listrik, serta waktu operasional masing-masing peralatan. Pada sistem PLTS on-grid, perubahan beban yang terjadi secara tiba-tiba dapat menyebabkan perubahan aliran daya, tegangan sistem, dan kondisi operasi inverter. Oleh karena itu, keberadaan baterai berperan penting sebagai media penyimpan energi yang mampu menyerap maupun menyuplai daya secara cepat sehingga perubahan beban tidak secara langsung membebani jaringan PLN. Pada penelitian ini, kemampuan baterai dalam merespons fluktuasi beban dianalisis berdasarkan perubahan daya beban, perubahan arus baterai, perubahan State of Charge (SoC), waktu respons sistem, serta kestabilan tegangan keluaran inverter. Seluruh parameter diperoleh dari hasil pencatatan data setiap 15 menit selama 14 hari pengamatan.

Tabel 9 menunjukkan bahwa perubahan beban terbesar terjadi pada periode sore hari dengan kenaikan daya sebesar 825 W. Kondisi ini dipicu oleh penggunaan beberapa peralatan listrik secara bersamaan, seperti pendingin ruangan, televisi, lampu penerangan, pompa air, dan peralatan dapur. Pada kondisi tersebut baterai secara otomatis meningkatkan arus pelepasan energi hingga 18,6 A untuk membantu memenuhi kebutuhan beban. Sebaliknya, ketika beban mulai menurun pada malam hari, arus baterai juga mengalami penurunan karena sebagian kebutuhan energi telah berkurang. Pola ini menunjukkan bahwa baterai tidak hanya berfungsi sebagai penyimpan energi, tetapi juga sebagai penyeimbang perubahan daya (power balancing) sehingga perubahan beban tidak menyebabkan lonjakan daya yang signifikan pada sisi jaringan PLN.

Grafik pada Gambar 7, menunjukkan bahwa perubahan arus baterai mengikuti perubahan daya beban secara proporsional. Ketika beban meningkat, inverter segera memerintahkan baterai untuk melepaskan energi sehingga arus baterai meningkat. Sebaliknya, saat beban menurun, arus baterai kembali berkurang sehingga energi yang tersimpan dapat dipertahankan untuk memenuhi kebutuhan pada periode berikutnya. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa baterai memiliki kemampuan dynamic load following, yaitu kemampuan mengikuti perubahan kebutuhan daya secara otomatis tanpa menyebabkan gangguan terhadap sistem kelistrikan.

Tabel 9. Karakteristik Fluktuasi Beban Rumah Tangga

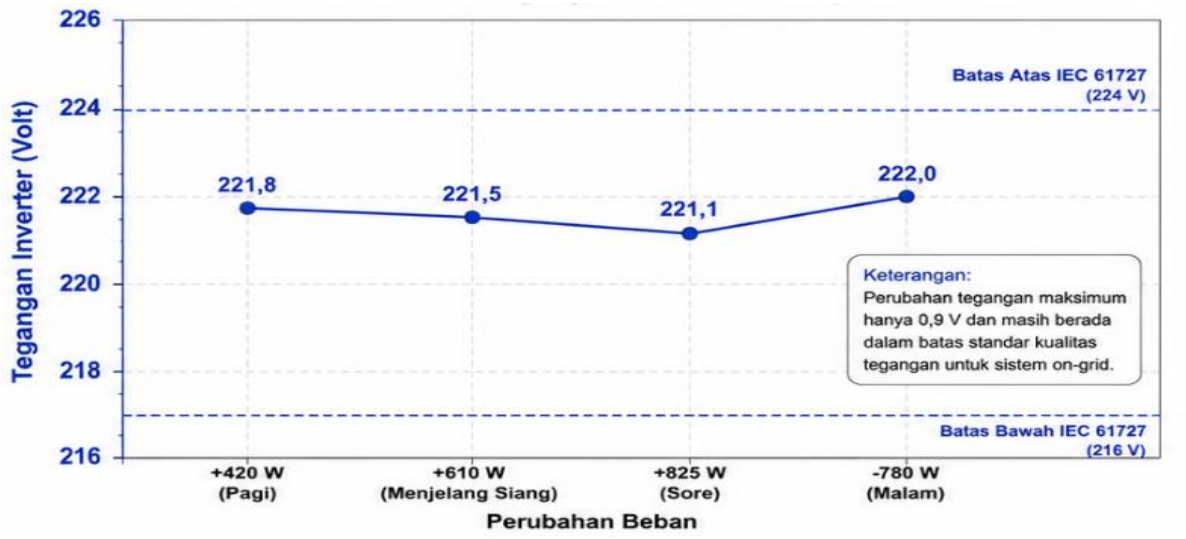
Kondisi Operasi	Beban Awal (W)	Beban Akhir (W)	Δ Beban (W)	Arus Baterai (A)	SoC (%)
Pagi	520	940	+420	8,5	83
Menjelang Siang	940	1.550	+610	13,8	77
Sore	1.020	1.845	+825	18,6	71
Malam	1.845	1.065	−780	10,7	69



Gambar 7. Fluktuasi Beban dan Respons Arus Baterai

Tabel 10. Waktu Respons Sistem terhadap Perubahan Beban

Perubahan Beban	Waktu Respons (detik)	Tegangan Inverter (V)	Frekuensi (Hz)
+420 W	0,9	221,8	50,02
+610 W	1,1	221,5	50,01
+825 W	1,4	221,1	49,99
−780 W	1,0	222,0	50,00



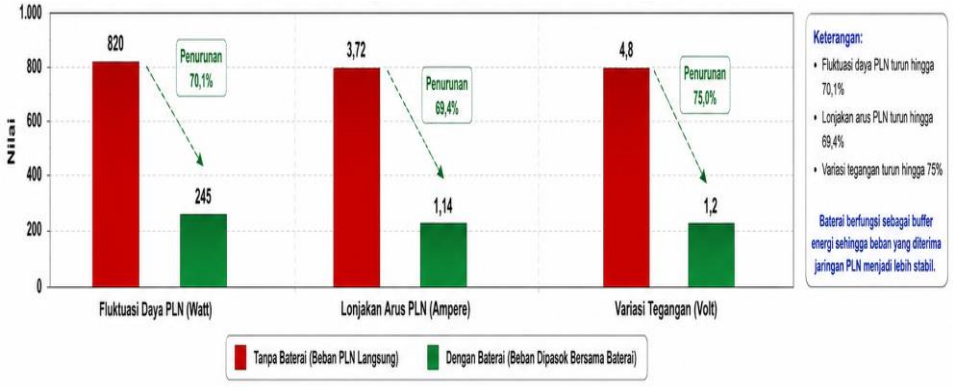
Gambar 8. Stabilitas Tegangan Inverter terhadap Fluktuasi Beban

Tabel 10 memperlihatkan bahwa waktu respons sistem berada pada kisaran 0,9–1,4 detik. Nilai tersebut menunjukkan bahwa inverter hybrid bersama baterai mampu merespons perubahan daya secara cepat sehingga tegangan keluaran tetap berada pada kisaran 221–222 V. Selama proses perubahan beban, frekuensi sistem juga relatif stabil di sekitar 50 Hz, sehingga kualitas daya tetap memenuhi standar instalasi rumah tangga. Stabilitas tegangan dan frekuensi menunjukkan bahwa baterai mampu meredam perubahan daya secara efektif sehingga fluktuasi beban tidak menimbulkan gangguan terhadap peralatan listrik yang terhubung.

Grafik pada Gambar 8, memperlihatkan bahwa perubahan beban tidak menyebabkan penurunan tegangan yang signifikan. Penurunan tegangan maksimum hanya sekitar 0,9 V, kemudian kembali stabil setelah inverter melakukan penyesuaian aliran energi dari baterai. Hal ini menunjukkan bahwa sistem kontrol inverter dan baterai mampu mempertahankan kualitas tegangan sesuai standar IEC 61727 untuk sistem PLTS yang terhubung ke jaringan.

Tabel 11 Indikator Peredaman Fluktuasi Beban oleh Baterai

Parameter	Tanpa Baterai	Dengan Baterai	Penurunan (%)
Fluktuasi Daya PLN (W)	820	245	70,1
Lonjakan Arus PLN (A)	3,72	1,14	69,4
Variasi Tegangan (V)	4,8	1,2	75,0



Gambar 9. Perbandingan Fluktuasi Daya PLN Sebelum dan Sesudah Menggunakan Baterai

Hasil analisis yang ditampilkan pada Tabel 11, menunjukkan bahwa keberadaan baterai mampu menurunkan fluktuasi daya yang harus disuplai oleh jaringan PLN hingga sekitar 70,1%. Selain itu, lonjakan arus pada sisi jaringan juga berkurang sebesar 69,4%, sedangkan variasi tegangan sistem turun hingga 75%. Temuan ini menunjukkan bahwa baterai berfungsi sebagai buffer energi yang menyerap perubahan daya secara cepat sehingga jaringan PLN hanya menerima perubahan daya yang relatif kecil. Kondisi tersebut sangat menguntungkan karena dapat mengurangi beban sesaat pada jaringan distribusi sekaligus meningkatkan kualitas daya listrik yang diterima

oleh konsumen. Gambar 9 memperlihatkan bahwa penggunaan baterai secara nyata menurunkan besarnya fluktuasi daya yang diterima jaringan PLN. Perubahan daya yang sebelumnya harus dipenuhi langsung oleh jaringan sebagian besar dialihkan ke baterai sehingga beban pada jaringan menjadi lebih stabil. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi baterai pada sistem PLTS on-grid tidak hanya meningkatkan pemanfaatan energi surya, tetapi juga memperbaiki kualitas operasi sistem distribusi listrik. Secara keseluruhan, hasil analisis Respons Baterai terhadap Fluktuasi Beban Harian Rumah Tangga menunjukkan bahwa baterai $LiFePO_4$ berkapasitas 9,6 kWh mampu merespons perubahan beban rumah tangga secara cepat dengan waktu respons kurang dari 1,5 detik, menjaga tegangan keluaran tetap stabil pada kisaran 221–222 V, serta menurunkan fluktuasi daya jaringan PLN hingga sekitar 70%. Temuan ini mengonfirmasi bahwa baterai memiliki peran strategis dalam meningkatkan keandalan sistem PLTS on-grid, khususnya pada rumah tangga dengan pola konsumsi listrik yang bersifat dinamis dan fluktuatif.

Jika dibandingkan penelitian terdahulu [16]-[20] yang terutama berorientasi pada pemodelan dan simulasi PLTS on-grid, implementasi PLTS atap, pengurangan ketergantungan terhadap PLN, serta evaluasi teknis-ekonomi, penelitian ini memperluas ruang analisis dengan menjadikan respons operasional baterai terhadap fluktuasi beban rumah tangga aktual sebagai fokus utama. Kebaruan penelitian tidak diklaim pada penggunaan teknologi baterai atau PLTS secara individual, tetapi pada integrasi analisis temporal profil beban dengan perilaku charging–discharging, tegangan, arus, SoC, efisiensi penyimpanan, distribusi energi PLTS–baterai–PLN, dan kemampuan load smoothing dalam satu kerangka evaluasi eksperimental. Pada sistem PLTS 2,4 kWp dengan baterai $LiFePO_4$ 9,6 kWh, penelitian memperoleh efisiensi charging 93,2%, discharging 96,5%, serta kontribusi PLTS melalui pemanfaatan langsung dan baterai sebesar 69,0% terhadap kebutuhan energi rumah tangga. Penggunaan baterai juga menurunkan daya puncak yang dipasok PLN sebesar 41,7%. Dengan demikian, kontribusi ilmiah penelitian ini terletak pada karakterisasi empiris hubungan antara dinamika beban dan respons penyimpanan energi, bukan sekadar evaluasi kapasitas atau efisiensi sistem secara agregat. Hasil tersebut memberikan dasar berbasis pengukuran untuk memahami fungsi baterai sebagai energy buffer dalam meningkatkan pemanfaatan energi surya dan meredam fluktuasi daya pada PLTS on-grid rumah tangga, serta menjadi masukan bagi pengembangan strategi energy management dan penentuan kapasitas penyimpanan yang responsif terhadap karakteristik beban aktual.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, baterai $LiFePO_4$ pada sistem PLTS on-grid mampu merespons fluktuasi beban harian rumah tangga dan mendukung pemenuhan kebutuhan energi secara efektif. Profil beban menunjukkan tiga periode puncak, yaitu pagi, siang, dan malam, dengan beban tertinggi sebesar 1.845 W pada periode 18.00–21.00 WIB. Selama pengujian, Baterai merespons perubahan beban dalam 0,9–1,4 detik,menjaga kestabilan tegangan inverter pada kisaran 221–222 V, serta menurunkan fluktuasi daya yang diterima jaringan PLN hingga sekitar 70,1%, tegangan baterai berada pada rentang 48,2–54,1 V, dengan SoC berfluktuasi antara 28% hingga 98% dan rata-rata 69% dan mencapai kondisi penuh pada sebagian besar hari dengan kondisi penyinaran yang memadai. Efisiensi pengisian dan pengosongan masing-masing mencapai 93,2% dan 96,5%. Rata-rata kebutuhan energi rumah tangga sebesar 8,4 kWh/hari dipenuhi oleh energi PLTS secara langsung sebesar 58,0%, kontribusi baterai sebesar 24,5%, dan jaringan PLN sebesar 17,5%, sehingga total kontribusi PLTS melalui pemanfaatan langsung dan penyimpanan mencapai 69,0%. Integrasi baterai juga mampu menurunkan daya puncak yang dipasok PLN dari 1.845 W menjadi 1.076 W, atau sebesar 41,7%, yang menunjukkan efektivitas baterai sebagai energy buffer dalam melakukan load smoothing. Hasil tersebut menghasilkan tingkat kemandirian energi (self-sufficiency) sebesar 82,5%, yang menunjukkan bahwa sebagian besar kebutuhan energi rumah tangga telah dipenuhi oleh sumber energi terbarukan Secara keseluruhan, hasil tersebut menunjukkan bahwa integrasi baterai pada PLTS on-grid meningkatkan pemanfaatan energi surya dan mengurangi ketergantungan terhadap jaringan PLN pada periode beban tinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada pihak-pihak yang telah mendukung terlaksananya penelitian ini, Dosen-dosen Peneliti di Teknik Elektro UMSU dan Jurnal Media Elektro yang telah menerbitkan paper ini.

DAFTAR PUSTAKA

[1] T. Zahari and B. McLellan, "Review of Policies for Indonesia's Electricity Sector Transition and Qualitative Evaluation of Impacts and Influences Using a Conceptual Dynamic Model," *Energies,* 2023 2023, doi: http://dx.doi.org/10.3390/en16083406.

[2] J. Langer, J. Quist, and K. Blok, "Review of Renewable Energy Potentials in Indonesia and Their Contribution to a 100% Renewable Electricity System," *Energies,* 2021 2021, doi: http://dx.doi.org/10.3390/en14217033.

[3] D. Silalahi, A. Blakers, M. Stocks, B. Lu, C. Cheng, and L. Hayes, "Indonesia's Vast Solar Energy Potential," *Energies,* 2021 2021, doi: http://dx.doi.org/10.3390/en14175424.

[4] U. Subramaniam, S. Vavilapalli, S. Padmanaban, F. Blaabjerg, J. Holm-Nielsen, and D. Almakhles, "A Hybrid PV-Battery System for ON-Grid and OFF-Grid Applications—Controller-In-Loop Simulation Validation," *Energies,* vol. 13, pp. 1–19, 2020 2020, doi: http://dx.doi.org/10.3390/en13030755.

[5] H. T. Paradongan, "Techno-economic feasibility study of solar photovoltaic power plant using RETScreen to achieve Indonesia energy transition," *Heliyon,* vol. 10, 2024 2024, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27680.

[6] N. Pambudi, "Renewable Energy in Indonesia: Current Status, Potential, and Future Development," *Sustainability,* 2023 2023, doi: http://dx.doi.org/10.3390/su15032342.

[7] M. R. Hafizan, A. A. Zakri, D. Hanafi, and U. Ali, "Implementation of Solar Power Plant as a Backup Power Source in Apartment Buildings," *Int. J. Electr. Energy Power Syst. Eng,* 2024 2024, doi: http://dx.doi.org/10.31258/ijeepse.7.3.175-189.

[8] N. Chatzigeorgiou, S. Theocharides, G. Makrides, and G. Georghiou, "A review on battery *energy* storage systems: Applications, developments, and research trends of hybrid installations in the end-user sector," *J. Energy Storage,* 2024 2024, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2024.111192.

[9] N. Saxena, I. Hussain, B. Singh, and A. Vyas, "Implementation of a Grid-Integrated PV-Battery *System* for Residential and Electrical Vehicle Applications," *IEEE Trans. Ind. Electron,* vol. 65, pp. 6592–6601, 2018 2018, doi: http://dx.doi.org/10.1109/tie.2017.2739712.

[10] F. I. Pasaribu, S. Hardi, A. Taufik, and A. Panjaitan, "Techno-economic optimization of hybrid renewable energy systems for household energy management," vol. 14, pp. 1035–1043, 2025 2025, doi: http://dx.doi.org/10.11591/ijape.v14.i4.pp1035-1043.

[11] F. I. Pasaribu, N. Evalina, and P. Harahap, "Comparison of Wet and Dry Battery Charging to Improve Charging Time Using a Power Converter Adapter," vol. 19, pp. 123–134.

[12] S. Xie, X. Hu, Q. Zhang, X. Lin, B. Mu, and H. Ji, "Aging-aware co-optimization of battery size, depth of discharge, and energy management for plug-in hybrid electric vehicles," *J. Power Sources,* vol. 450, p. 227638, 2020 2020.

[13] A. M. Tobing *et al.*, "Perancangan Sistem Kendali PLTS Menggunakan Sensor Photocell Dan Alarm Kontrol Untuk Penerangan Kapal Nelayan," *JTELS J. Telecommun. Electr. Sci,* vol. 01, no. 01, pp. 1–11, 2024 2024.

[14] Z. Zhou, B. Duan, Y. Kang, Q. Zhang, Y. Shang, and C. Zhang, "Online state of health estimation for series-connected LiFePO4 battery pack based on differential voltage and inconsistency analysis," *IEEE Trans. Transp. Electrif,* vol. 10, no. 1, pp. 989–998, 2023 2023.

[15] B. A. Enache, "A battery screening system for second life LiFePO4 batteries," presented at the 2020 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE, 2020, 2020.

[16] E. M. Silalahi, "Analisis energi listrik PLTS on-grid dengan boost converter dan inverter berbasis MATLAB/Simulink," *J. Inform. dan Tek. Elektro* Terap, vol. 13, no. 1, 2025 2025.

[17] I. Sukarno, H. Matsumoto, and L. Susanti, "Household lifestyle effect on residential electrical energy consumption in Indonesia: On-site measurement methods," *urban Clim,* vol. 20, pp. 20–32, 2017 2017, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2017.02.008.

[18] B. T. Mardandi, S. Nisworo, and J. Windarta, "Analisis Implementasi Rumah Mandiri Energi PLTS Atap On Grid," *J. Profesi Ins. Indones,* vol. 1, no. 8, pp. 346–349, 2025 2025.

[19] Y. Takata, T. Kubota, S. Pratiwi, and H. Sani, "Classification of daily lifestyle patterns and their relationships with household energy consumption in apartment buildings: a case study of Indonesia," *J. Asian Archit. Build. Eng,* 2025 2025, doi: http://dx.doi.org/10.1080/13467581.2025.2574558.

[20] H. Wibowo, S. Bandri, and A. Anugrah, "Studi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap On-Grid Skala Rumah Tinggal Daya 1300 VA Menggunakan Software Homer," *Innov. J. Soc. Sci. Res,* vol. 4, no. 5, pp. 9524–9544, 2024 2024.
[21] M. L. Katche, A. B. Makokha, S. O. Zachary, and M. S. Adaramola, "A comprehensive review of maximum power point tracking (mppt) techniques used in solar pv systems," *Energies,* vol. 16, no. 5, p. 2206, 2023 2023.
[22] R. R. R. Mochamad, "Rancang Bangun Monitoring State Of Charge (SOC) Pada Baterai Lithium Iron Phosphate (Lifepo4) Dengan Metode Coulomb Counting," 2024 2024.
[23] E. A. W. Mamoto and S. Tumiwa, "Desain Baterai Sepeda Listrik Dengan Tegangan 48 Volt Dc Menggunakan Empat Buah Accu 12 Volt 3, 5 Ah."
[24] R. B. Negara, S. D. Nugroho, S. A. Ulfiah, F. A. Arsal, and Y. K. Putri, "Analisis Perencanaan Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Plts) Atap Dengan Beban Langganan Pln Kapasitas 900va Menggunakan Konfigurasi Off-Grid," J. Elektro Kontrol, vol. 5, no. 2, pp. 60–71, 2025 2025.
[25] P. Omer, J. Kumar, and B. S. Surjan, "A review on reduced switch count multilevel inverter topologies," *IEEE access,* vol. 8, pp. 22281–22302, 2020 2020.
[26] A. F. Nurhasanah, S. Sudarti, and Y. Yushardi, "Kajian Perubahan Iklim Terhadap Efisiensi Panel Surya Sebagai Sumber Energi Alternatif Di Indonesia," *Opt. J. Pendidik. Fis,* vol. 7, no. 2, pp. 366–375, 2023 2023.