

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Perubahan iklim global dan penurunan cadangan bahan bakar fosil telah memaksa dunia untuk mencari alternatif sumber energi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Energi terbarukan muncul sebagai solusi penting dalam mengatasi tantangan tersebut. Menurut laporan *International Renewable Energy Agency* [1], energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, hidro, dan biomassa diperkirakan akan mendominasi pasokan energi global dalam beberapa dekade mendatang. Di antara berbagai jenis energi terbarukan, energi surya menempati posisi strategis karena ketersediaannya yang melimpah dan potensi pemanfaatannya yang sangat luas secara geografis.

Energi surya dihasilkan melalui proses konversi radiasi matahari menjadi energi listrik menggunakan teknologi panel fotovoltaik (PV). Dengan kelebihan seperti minimnya emisi karbon selama operasi, umur pakai yang panjang, serta penurunan biaya produksi panel PV secara signifikan dalam dekade terakhir, sistem energi surya menjadi pilihan utama untuk memenuhi kebutuhan listrik terutama di daerah terpencil dan juga perkotaan. Namun, energi surya memiliki sifat *intermittent*, artinya produksinya sangat bergantung pada kondisi cuaca dan siklus siang-malam, sehingga tidak dapat memberikan pasokan energi secara kontinu tanpa dukungan sistem tambahan. Karakteristik *intermittent* ini menjadi salah satu kendala utama dalam pengembangan sistem energi terbarukan. Misalnya, saat malam hari atau saat terjadi awan tebal, produksi energi listrik dari panel surya bisa menurun drastis bahkan menjadi nol, sementara kebutuhan listrik tetap ada. Oleh karena itu, diperlukan solusi agar energi yang dihasilkan pada saat tersedia dapat disimpan dan digunakan saat dibutuhkan. Sistem penyimpanan energi (*Energy Storage System/ESS*) menjadi komponen krusial untuk memastikan kontinuitas dan keandalan pasokan energi dalam sistem energi terbarukan. Berbagai teknologi ESS telah dikembangkan untuk berbagai kebutuhan, mulai dari penyimpanan mekanik, termal, hingga penyimpanan kimiawi seperti baterai. *Battery Energy Storage System (BESS)* adalah salah satu

bentuk ESS yang paling banyak diaplikasikan terutama untuk penyimpanan energi dalam sistem tenaga listrik. BESS menyimpan energi dalam bentuk energi kimia dan mengubahnya kembali menjadi listrik saat dibutuhkan, sehingga membantu menstabilkan pasokan energi dan meningkatkan kualitas daya yang disalurkan ke pengguna [2].

*BESS* sangat cocok digunakan bersama sistem energi surya karena fleksibilitas dan skalabilitasnya. Pada sistem rumah tangga, *BESS* berkapasitas kecil hingga menengah memungkinkan pengguna untuk memanfaatkan energi surya secara lebih optimal, menurunkan ketergantungan pada jaringan listrik utama, dan bahkan mengurangi biaya listrik[3]. Selain itu, penggunaan *BESS* mendukung program elektrifikasi di daerah terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik, serta mempercepat penerapan sistem energi bersih secara luas. Namun, desain dan implementasi *BESS* tidak terlepas dari tantangan teknis. Salah satu faktor penting adalah efisiensi penyimpanan dan pemulihan energi. Efisiensi *BESS* dipengaruhi oleh karakteristik baterai, metode pengisian dan pengosongan, serta kondisi operasi. Selain itu, waktu pengisian baterai dari sumber energi surya merupakan aspek penting dalam perencanaan sistem, karena waktu pengisian yang terlalu lama dapat menurunkan keandalan sistem dan kenyamanan pengguna [4].

Pengisian baterai dari energi surya harus dilakukan secara optimal agar energi yang dihasilkan panel surya tidak terbuang sia-sia. Oleh karena itu, kapasitas dan karakteristik panel surya harus disesuaikan dengan kapasitas *BESS* dan kebutuhan beban listrik. Bila kapasitas panel terlalu kecil, maka waktu pengisian akan terlalu lama dan baterai tidak dapat diisi penuh saat matahari bersinar, mengakibatkan pemborosan potensi energi. Sebaliknya, kapasitas panel yang terlalu besar tanpa pengaturan pengisian yang baik dapat menyebabkan overcharging yang membahayakan baterai dan menimbulkan kerugian energi[5]. Selain itu, efisiensi konversi energi dari panel surya ke baterai dipengaruhi oleh berbagai faktor lain, termasuk teknologi kontrol pengisian seperti penggunaan *Maximum Power Point Tracking (MPPT)* yang berfungsi menjaga panel surya beroperasi pada titik daya maksimum untuk memaksimalkan energi yang

dihasilkan [6]. Dengan teknologi ini, meskipun kondisi sinar matahari berubah-ubah, sistem tetap dapat menghasilkan energi optimal yang disalurkan ke *BESS*.

Dalam konteks kapasitas sistem penyimpanan, teknologi baterai Lithium-ion, terutama tipe Lithium Iron Phosphate ( $\text{LiFePO}_4$ ), semakin populer digunakan karena menawarkan kombinasi densitas energi yang tinggi, umur siklus yang panjang, serta keamanan yang lebih baik dibandingkan baterai jenis lain seperti Lead Acid [7]. Teknologi ini sangat relevan untuk aplikasi sistem energi surya residensial dan portabel.

Namun, kapasitas baterai harus dirancang dengan mempertimbangkan profil konsumsi energi pengguna dan pola produksi energi dari panel surya. Kapasitas *BESS* yang tidak tepat dapat menyebabkan ketidakseimbangan sistem, misalnya baterai cepat penuh sementara kapasitas beban melebihi energi yang tersedia sehingga menyebabkan gangguan pasokan listrik [8]. Selain itu, faktor eksternal seperti kondisi iklim juga memengaruhi performa sistem. Intensitas radiasi matahari, suhu lingkungan, serta durasi penyinaran harian berbeda antar wilayah dan musim, yang memengaruhi produksi energi panel surya serta efisiensi pengisian baterai [10]. Oleh karena itu, perancangan sistem penyimpanan energi harus disesuaikan dengan kondisi lokal agar optimal.

Singkatnya, untuk mendukung pengembangan energi terbarukan terutama energi surya, pengembangan sistem penyimpanan energi yang efisien dan dapat diandalkan sangat diperlukan. Penelitian mengenai hubungan antara kapasitas panel surya dengan performa *BESS* dalam hal waktu pengisian dan efisiensi menjadi penting untuk memastikan sistem yang dirancang dapat berfungsi optimal dan ekonomis. Penyesuaian kapasitas panel surya terhadap kapasitas baterai serta penerapan teknologi kontrol pengisian yang tepat menjadi kunci keberhasilan sistem energi surya dengan penyimpanan baterai. *Battery Energy Storage System (BESS)* memainkan peran vital dalam integrasi energi surya ke dalam sistem kelistrikan modern. Karena produksi listrik dari panel surya bersifat tidak menentu dan bergantung pada faktor lingkungan seperti intensitas cahaya matahari dan suhu, keberadaan *BESS* menjadi sangat penting untuk menjaga stabilitas pasokan listrik. *BESS* memungkinkan energi listrik yang dihasilkan oleh

panel surya selama periode produksi tinggi (misalnya siang hari) untuk disimpan dan digunakan pada saat produksi rendah atau permintaan tinggi (misalnya malam hari), menjadikan sistem energi surya lebih andal dan fleksibel [3].

Fungsi utama *BESS* dalam sistem energi surya mencakup, penyimpanan Energi Sementara – *BESS* menyimpan energi yang tidak segera digunakan agar dapat dimanfaatkan di waktu lain, terutama saat matahari tidak bersinar. Stabilisasi Jaringan Listrik Lokal – *BESS* dapat membantu meredam fluktuasi daya dan tegangan akibat variabilitas output panel surya. Pengurangan Ketergantungan pada Jaringan PLN – Dengan *BESS*, sistem mandiri off-grid atau hybrid dapat lebih optimal, terutama di wilayah terpencil. Peningkatan Efisiensi dan Efektivitas Energi – Energi yang seharusnya terbuang saat kapasitas beban tidak mencukupi, dapat disimpan dan digunakan kembali [4].

Pengisian baterai dari energi surya harus dilakukan secara optimal agar energi yang dihasilkan panel surya tidak terbuang sia-sia. Oleh karena itu, kapasitas dan karakteristik panel surya harus disesuaikan dengan kapasitas *BESS* dan kebutuhan beban listrik. Bila kapasitas panel terlalu kecil, maka waktu pengisian akan terlalu lama dan baterai tidak dapat diisi penuh saat matahari bersinar, mengakibatkan pemborosan potensi energi. Sebaliknya, kapasitas panel yang terlalu besar tanpa pengaturan pengisian yang baik dapat menyebabkan overcharging yang membahayakan baterai dan menimbulkan kerugian energi [5].

Selain itu, efisiensi konversi energi dari panel surya ke baterai dipengaruhi oleh berbagai faktor lain, termasuk teknologi kontrol pengisian seperti penggunaan *Maximum Power Point Tracking (MPPT)* yang berfungsi menjaga panel surya beroperasi pada titik daya maksimum untuk memaksimalkan energi yang dihasilkan [6]. Dengan teknologi ini, meskipun kondisi sinar matahari berubah-ubah, sistem tetap dapat menghasilkan energi optimal yang disalurkan ke *BESS*.

Dalam konteks kapasitas sistem penyimpanan, teknologi baterai Lithium-ion, terutama tipe Lithium Iron Phosphate ( $\text{LiFePO}_4$ ), semakin populer digunakan karena menawarkan kombinasi densitas energi yang tinggi, umur siklus yang panjang, serta keamanan yang lebih baik dibandingkan baterai jenis lain seperti

Lead Acid [7]. Teknologi ini sangat relevan untuk aplikasi sistem energi surya residensial dan portabel.

Namun, kapasitas baterai harus dirancang dengan mempertimbangkan profil konsumsi energi pengguna dan pola produksi energi dari panel surya. Kapasitas *BESS* yang tidak tepat dapat menyebabkan ketidakseimbangan sistem, misalnya baterai cepat penuh sementara kapasitas beban melebihi energi yang tersedia sehingga menyebabkan gangguan pasokan listrik [8]. Selain itu, faktor eksternal seperti kondisi iklim juga memengaruhi performa sistem. Intensitas radiasi matahari, suhu lingkungan, serta durasi penyinaran harian berbeda antar wilayah dan musim, yang memengaruhi produksi energi panel surya serta efisiensi pengisian baterai [9]. Oleh karena itu, perancangan sistem penyimpanan energi harus disesuaikan dengan kondisi lokal agar optimal. Singkatnya, untuk mendukung pengembangan energi terbarukan terutama energi surya, pengembangan sistem penyimpanan energi yang efisien dan dapat diandalkan sangat diperlukan. Penelitian mengenai hubungan antara kapasitas panel surya dengan performa *BESS* dalam hal waktu pengisian dan efisiensi menjadi penting untuk memastikan sistem yang dirancang dapat berfungsi optimal dan ekonomis. Penyesuaian kapasitas panel surya terhadap kapasitas baterai serta penerapan teknologi kontrol pengisian yang tepat menjadi kunci keberhasilan sistem energi surya dengan penyimpanan baterai.

*Battery Energy Storage System (BESS)* memainkan peran vital dalam integrasi energi surya ke dalam sistem kelistrikan modern. Karena produksi listrik dari panel surya bersifat tidak menentu dan bergantung pada faktor lingkungan seperti intensitas cahaya matahari dan suhu, keberadaan *BESS* menjadi sangat penting untuk menjaga stabilitas pasokan listrik. *BESS* memungkinkan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya selama periode produksi tinggi (misalnya siang hari) untuk disimpan dan digunakan pada saat produksi rendah atau permintaan tinggi (misalnya malam hari), menjadikan sistem energi surya lebih andal dan fleksibel [10].

Fungsi utama *BESS* dalam sistem energi surya mencakup, penyimpanan Energi Sementara – *BESS* menyimpan energi yang tidak segera digunakan agar

dapat dimanfaatkan di waktu lain, terutama saat matahari tidak bersinar. Stabilitas Jaringan Listrik Lokal – *BESS* dapat membantu meredam fluktuasi daya dan tegangan akibat variabilitas output panel surya. Pengurangan Ketergantungan pada Jaringan PLN – Dengan *BESS*, sistem mandiri off-grid atau hybrid dapat lebih optimal, terutama di wilayah terpencil. Peningkatan Efisiensi dan Efektivitas Energi – Energi yang seharusnya terbuang saat kapasitas beban tidak mencukupi, dapat disimpan dan digunakan kembali [4].

Teknologi baterai yang digunakan dalam *BESS* sangat menentukan performa dan keandalan sistem. Beberapa karakteristik penting yang perlu diperhatikan adalah, kapasitas Energi (Wh atau kWh): Menunjukkan berapa banyak energi yang dapat disimpan. Misalnya, *BESS* 640 Wh dapat menyuplai daya 64 W selama 10 jam. Tegangan dan Arus Nominal: Mempengaruhi kompatibilitas sistem dan waktu pengisian. *Depth of Discharge (DoD)*: Persentase energi yang dapat digunakan tanpa merusak baterai. *Round-trip Efficiency*: Persentase energi yang kembali dapat digunakan setelah proses pengisian dan pengosongan. Jumlah Siklus (*Cycle Life*): Jumlah pengisian dan pengosongan yang bisa dilakukan sebelum kapasitas baterai menurun secara signifikan.

Salah satu teknologi baterai yang populer saat ini adalah *Lithium Iron Phosphate* ( $\text{LiFePO}_4$ ), yang menawarkan keunggulan dalam hal stabilitas termal, umur pakai yang panjang (hingga 2000–5000 siklus), dan keamanan tinggi dibandingkan teknologi Lead-Acid maupun jenis lithium lainnya [7]. Baterai  $\text{LiFePO}_4$  juga memiliki efisiensi round-trip yang tinggi, berkisar antara 90%–95%, menjadikannya ideal untuk sistem energi surya.

Dalam pengaplikasian *BESS*, sistem kontrol pengisian (*charge controller*) berperan penting dalam menjaga performa dan umur baterai. Sistem ini mengatur tegangan dan arus dari panel surya yang masuk ke baterai agar sesuai dengan batas aman. Teknologi kontrol modern seperti *Maximum Power Point Tracking (MPPT)* memungkinkan panel surya bekerja pada titik daya maksimum meskipun kondisi cahaya berubah-ubah, sehingga mempercepat waktu pengisian dan meningkatkan efisiensi sistem [10].

Efisiensi sistem secara keseluruhan juga ditentukan oleh kesesuaian antara kapasitas panel surya dan kapasitas baterai. Bila kapasitas panel terlalu kecil, maka waktu pengisian akan terlalu lama, dan baterai tidak akan terisi penuh. Sebaliknya, kapasitas panel yang terlalu besar tanpa sistem kontrol memadai dapat mempercepat degradasi baterai akibat overcharging dan panas berlebih [5].

Dengan semakin meningkatnya kebutuhan akan sistem energi mandiri dan bersih, penggunaan *BESS* dalam sistem energi surya diprediksi akan terus berkembang, terutama untuk aplikasi rumah tangga dan skala kecil di wilayah tropis seperti Indonesia.

Kapasitas panel surya merupakan salah satu parameter paling krusial dalam desain sistem energi surya, karena secara langsung mempengaruhi jumlah energi yang dapat dikumpulkan dan digunakan untuk mengisi sistem penyimpanan energi (*BESS*). Dalam konteks sistem energi mandiri atau hybrid, kesesuaian antara kapasitas panel surya dengan kapasitas baterai sangat menentukan efisiensi pengisian, keandalan suplai daya, dan umur komponen sistem secara keseluruhan [11].

Secara teknis, kapasitas panel surya dinyatakan dalam satuan Watt-peak (Wp), yaitu output daya maksimum panel di bawah kondisi standar (Standard Test Condition/STC: 1000 W/m<sup>2</sup> iradiasi, suhu sel 25°C). Dalam implementasi nyata, output aktual panel sangat bergantung pada intensitas sinar matahari, posisi matahari, sudut kemiringan panel, dan kondisi lingkungan. Oleh karena itu, kapasitas panel harus dirancang agar mampu menghasilkan energi yang cukup untuk mengisi penuh kapasitas baterai dalam jangka waktu penyinaran efektif harian, yang umumnya berkisar antara 4 hingga 6 jam di daerah tropis<sup>9</sup>. Jika kapasitas panel terlalu kecil dibandingkan kapasitas baterai, maka waktu pengisian akan sangat lama atau bahkan tidak akan pernah mencapai 100% *State of Charge (SoC)*. Hal ini menyebabkan energi terbarukan yang tersedia tidak dimanfaatkan secara optimal dan memperpendek masa pakai baterai akibat sering berada dalam kondisi setengah penuh (*partial cycling*), yang dalam jangka panjang dapat menurunkan efisiensi sistem secara signifikan [12]. Sebaliknya,

jika kapasitas panel terlalu besar tanpa sistem kontrol dan pemutus otomatis, baterai bisa mengalami overcharge dan overheating yang berbahaya.

Pemilihan kapasitas panel surya harus mempertimbangkan beberapa faktor, Total kebutuhan energi harian pengguna (Wh/day), Kapasitas baterai yang tersedia (Wh), Efisiensi sistem secara keseluruhan (umumnya 70–85%), Durasi penyinaran matahari efektif per hari (jam). Selain kuantitas daya, kualitas konversi juga penting. Teknologi kontrol seperti MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) dapat meningkatkan efisiensi sistem hingga 30% dibandingkan sistem PWM biasa [6]. MPPT memastikan panel bekerja pada titik daya maksimum meskipun intensitas cahaya bervariasi, sehingga meningkatkan output aktual dari panel yang digunakan.

Dengan perancangan kapasitas panel surya yang sesuai dan efisiensi sistem yang tinggi, waktu pengisian baterai dapat dikendalikan dengan baik dan sistem menjadi lebih handal serta tahan lama. Oleh karena itu, studi mengenai pengaruh kapasitas panel terhadap performa pengisian *BESS* menjadi aspek penting dalam pengembangan sistem energi surya skala kecil maupun besar. Efisiensi pengisian baterai adalah rasio antara energi yang disimpan secara efektif di dalam baterai dengan total energi listrik yang digunakan selama proses pengisian. Dalam sistem energi surya yang terintegrasi dengan Battery Energy Storage System (*BESS*), efisiensi pengisian merupakan indikator kunci dari performa sistem secara keseluruhan. Efisiensi tinggi menunjukkan bahwa sedikit energi yang terbuang, sedangkan efisiensi rendah menandakan adanya kerugian energi akibat panas, resistansi internal, konversi daya, atau kontrol sistem yang tidak optimal.

Efisiensi pengisian biasanya dinyatakan sebagai round-trip efficiency (RTE), yaitu persentase energi yang dapat dikeluarkan kembali dari baterai dibandingkan dengan energi yang masuk saat pengisian. Pada baterai  $\text{LiFePO}_4$ , nilai RTE umumnya mencapai 90–95%, jauh lebih tinggi dibandingkan baterai timbal-asam (Lead-Acid) yang hanya sekitar 70–80% [7].

Beberapa faktor utama yang mempengaruhi efisiensi pengisian baterai adalah teknologi baterai menentukan karakteristik pengisian, tegangan operasi, efisiensi, serta stabilitas termal.  $\text{LiFePO}_4$  memiliki efisiensi tinggi karena



resistansi internal rendah, toleransi suhu tinggi, dan kemampuan pengisian cepat (fast charging) yang aman. Sebaliknya, baterai timbal-asam cenderung mengalami penurunan efisiensi akibat sulfasi dan degradasi elektrolit selama siklus pengisian-pengosongan [12]. Keberadaan komponen seperti MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) dan inverter sangat mempengaruhi efisiensi energi dari panel ke baterai. Sistem MPPT dapat meningkatkan efisiensi pengisian hingga 30% dibandingkan dengan PWM karena mampu menjaga panel surya bekerja pada titik daya maksimumnya sepanjang waktu [6].

Selain itu, kualitas konversi inverter dari DC ke AC juga memengaruhi total efisiensi sistem. Baterai sangat sensitif terhadap suhu. Pengisian pada suhu tinggi ( $>45^{\circ}\text{C}$ ) dapat mempercepat degradasi sel dan mengurangi efisiensi, sedangkan suhu rendah ( $<10^{\circ}\text{C}$ ) memperlambat reaksi kimia sehingga menurunkan kapasitas penyimpanan sementara [8]. Sistem *BESS* yang ideal dilengkapi dengan sistem manajemen suhu atau *Battery Management System (BMS)* untuk mengontrol dan melindungi sel baterai. Proses pengisian yang dilakukan terlalu cepat dengan arus tinggi dapat menyebabkan peningkatan resistansi internal dan pembentukan panas, sehingga menurunkan efisiensi dan memperpendek umur baterai. Oleh karena itu, metode pengisian berbasis *Constant Current–Constant Voltage (CC–CV)* banyak digunakan untuk menjaga kestabilan dan efisiensi selama pengisian penuh [5]. Energi input dari panel surya sangat dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari, sudut panel, dan cuaca. Produksi energi yang tidak stabil atau rendah menyebabkan pengisian menjadi tidak efisien karena baterai tidak menerima tegangan dan arus optimal untuk proses pengisian.

Secara umum, desain sistem yang optimal—mulai dari pemilihan baterai, kontrol daya, hingga penyesuaian kapasitas panel—akan meningkatkan efisiensi pengisian, mengurangi kerugian energi, dan memperpanjang umur sistem. Oleh karena itu, studi mengenai efisiensi pengisian baterai menjadi penting dalam menentukan performa dan kelayakan teknis serta ekonomis sistem energi surya berbasis *BESS*. Penelitian terkait integrasi panel surya dan sistem penyimpanan energi (*BESS*) telah berkembang pesat dalam lima tahun terakhir, didorong oleh kebutuhan akan sistem energi yang bersih, mandiri, dan efisien. Berbagai studi

telah mengevaluasi pengaruh kapasitas panel surya terhadap waktu pengisian, efisiensi sistem, serta umur pakai baterai dalam konteks aplikasi rumah tangga dan skala kecil.

Ketika sistem PV- BESS skala rumah dengan kapasitas baterai 1,2 kWh diuji terhadap variasi kapasitas panel mulai dari 100 Wp hingga 500 Wp. Hasilnya menunjukkan bahwa panel dengan kapasitas terlalu kecil ( $\leq 200$  Wp) menghasilkan waktu pengisian yang sangat panjang ( $\geq 8$  jam) bahkan dalam kondisi penyinaran maksimal, sedangkan kapasitas 400–500 Wp menghasilkan pengisian optimal dalam waktu 3–4 jam. Efisiensi round-trip tertinggi dicapai pada rasio panel-baterai 1:2,5 [13]. Dalam melakukan simulasi sistem PV-BESS off-grid dengan berbagai kombinasi kapasitas panel dan baterai untuk mengidentifikasi konfigurasi paling efisien<sup>14</sup>. Mereka menemukan bahwa efisiensi sistem sangat dipengaruhi oleh keselarasan antara kapasitas penyimpanan dan kapasitas produksi energi. Ketidakseimbangan antara keduanya (misalnya kapasitas panel terlalu besar tanpa sistem kontrol) menyebabkan penurunan efisiensi hingga 20% karena overcharging dan pemakaian tidak optimal. Studi yang dilakukan di Malaysia, lingkungan tropis yang memiliki profil penyinaran mirip dengan Indonesia, menunjukkan bahwa untuk sistem BESS 640Wh, kapasitas panel 150–200 Wp cukup untuk pengisian penuh dalam satu hari dengan efisiensi pengisian di atas 90% jika menggunakan MPPT [15]. Namun efisiensi bisa turun hingga 70% jika hanya menggunakan PWM dan tidak ada pengaturan suhu. Penggunaan *charge controller* berbasis MPPT meningkatkan efisiensi pengisian hingga 25% dibandingkan sistem PWM biasa, terutama pada kondisi iradiasi yang fluktuatif [16].

Penelitian ini juga menekankan pentingnya pengaturan suhu dan ventilasi dalam menjaga performa baterai dalam jangka panjang. Pengujian langsung sistem PV-BESS skala rumah di Brasil dengan menggunakan baterai LiFePO<sub>4</sub> 100Ah dan panel 200 Wp, sistem mampu menyuplai kebutuhan listrik dasar rumah (lampu, kipas, dan perangkat elektronik kecil) selama 8–10 jam per hari [17]. Studi ini menegaskan bahwa kesesuaian kapasitas panel terhadap kebutuhan

energi harian dan kapasitas penyimpanan adalah kunci keberhasilan sistem off-grid yang efisien.

Dibandingkan dengan penelitian-penelitian sebelumnya, penelitian ini menitikberatkan pada analisis kuantitatif dan eksperimental pengaruh kapasitas panel terhadap waktu pengisian dan efisiensi sistem pada *BESS* 640 Wh, dengan pendekatan praktis di iklim tropis. Fokus ini memberikan kontribusi terhadap kebutuhan desain sistem energi terbarukan skala kecil yang lebih terjangkau dan mudah diimplementasikan di rumah tangga Indonesia, terutama di daerah yang belum terjangkau oleh listrik PLN.

Berdasarkan kajian literatur yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa integrasi sistem panel surya dan *BESS* (*Battery Energy Storage System*) telah menjadi solusi yang semakin penting dalam upaya transisi menuju energi terbarukan yang bersih, stabil, dan berkelanjutan. Salah satu aspek kunci yang menentukan keberhasilan sistem ini adalah efisiensi pengisian baterai, yang dipengaruhi secara langsung oleh kapasitas panel surya, teknologi baterai, dan sistem pengendali daya.

Dari berbagai studi yang telah ditinjau, terlihat bahwa kapasitas panel surya yang sesuai dengan kapasitas penyimpanan energi memiliki pengaruh besar terhadap. Waktu pengisian baterai, yang menentukan seberapa cepat energi dari matahari dapat disimpan secara optimal; Efisiensi round-trip, yang mencerminkan seberapa besar energi yang benar-benar bisa dimanfaatkan kembali setelah proses penyimpanan; Umur baterai, yang akan terjaga lebih lama jika pengisian dilakukan secara tepat dan sesuai dengan profil teknis baterai [12].

Kesesuaian antara kapasitas panel surya dan kapasitas baterai tidak hanya menyangkut perhitungan matematis kebutuhan energi, tetapi juga mencakup aspek teknis seperti waktu penyinaran efektif harian, kondisi lingkungan, dan jenis charge controller yang digunakan. Misalnya, penggunaan *charge controller* berbasis MPPT terbukti dapat meningkatkan efisiensi sistem secara signifikan [6], sementara sistem dengan PWM memiliki keterbatasan dalam mengikuti fluktuasi intensitas sinar matahari, terutama di wilayah tropis yang rentan terhadap awan dan hujan mendadak.

Implikasi utama dari literatur ini terhadap penelitian yang dilakukan adalah bahwa pemilihan kapasitas panel surya tidak dapat dipisahkan dari desain keseluruhan sistem, khususnya ketika menggunakan sistem *BESS* dengan kapasitas terbatas seperti 640 Wh. Sistem dengan baterai kecil membutuhkan perhitungan yang lebih cermat untuk menghindari ketidakseimbangan daya, baik kelebihan (*overcharge*) maupun kekurangan (*undercharge*), yang sama-sama berisiko menurunkan efisiensi dan umur sistem<sup>7</sup>.

Selain itu, studi literatur juga menunjukkan bahwa desain sistem PV-*BESS* untuk rumah tangga perlu mempertimbangkan kebutuhan energi spesifik pengguna. Sebagai contoh, pengguna yang hanya ingin memenuhi kebutuhan dasar (pencahaya, kipas angin, atau pengisian ponsel) akan membutuhkan konfigurasi panel dan baterai yang berbeda dari pengguna yang juga mengoperasikan beban menengah seperti kulkas atau televisi.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pada pengembangan sistem energi surya skala kecil yang lebih efisien dan aplikatif, khususnya di wilayah-wilayah Indonesia yang belum terjangkau oleh jaringan listrik konvensional. Dengan menganalisis pengaruh kapasitas panel terhadap waktu pengisian dan efisiensi sistem penyimpanan 640 Wh, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar untuk merancang sistem yang hemat biaya, mudah dirakit, dan tahan lama dalam kondisi lingkungan tropis.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang sistem panel surya yang terintegrasi dengan *BESS* berkapasitas 640 Wh untuk penggunaan di daerah non listrik ?
2. Seberapa besar pengaruh variasi kapasitas panel surya terhadap waktu pengisian baterai *BESS*?
3. Bagaimana hubungan antara kapasitas panel surya dan efisiensi pengisian energi pada sistem *BESS* 640 Wh?

### 1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian lebih terfokus dan tidak melebar dari tujuan yang telah ditentukan, maka batasan-batasan dalam penelitian ini adalah:

1. Sistem penyimpanan energi yang digunakan adalah *Battery Energy Storage System (BESS)* berbasis  $\text{LiFePO}_4$  dengan kapasitas total 640 Wh.
2. Kapasitas panel surya yang dianalisis dibatasi pada rentang 50 Wp hingga 200 Wp, sesuai dengan kondisi sistem skala rumah tangga.
3. Penelitian hanya menganalisis waktu pengisian dan efisiensi pengisian, tanpa membahas degradasi jangka panjang dari baterai.
4. Sumber cahaya matahari yang digunakan adalah sinar matahari alami di wilayah tropis (Indonesia), tanpa penggunaan simulator cahaya buatan.
5. Sistem kontrol pengisian yang digunakan adalah *solar charge controller* tipe MPPT.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan utama dari penelitian ini adalah:

1. Merancang dan mengimplementasikan sistem panel surya yang dapat digunakan untuk mengisi *BESS* 640 Wh.
2. Menganalisis pengaruh kapasitas panel surya terhadap waktu pengisian baterai dalam kondisi nyata.
3. Mengevaluasi efisiensi pengisian energi dari sistem berdasarkan variasi kapasitas panel surya.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

- Menambah wawasan dan referensi ilmiah terkait perancangan sistem energi surya skala kecil yang efisien.
- Memberikan kontribusi terhadap pengembangan literatur tentang optimasi sistem panel surya dan baterai dalam konteks energi terbarukan.

- Menjadi acuan bagi masyarakat, khususnya di wilayah yang belum terjangkau listrik PLN, dalam membangun sistem energi mandiri skala kecil.
- Mendorong penggunaan energi bersih dan terbarukan yang ramah lingkungan.
- Membantu mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil dan mendukung transisi energi hijau di tingkat rumah tangga.

