

## Studi Analisis Efisiensi Dan Unjuk Kerja Baterai Pada Sistem Panel Surya *Hybrid OFF-GRID*

**Didan Prakosa**

Program Studi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Semarang, Semarang 50196, Indonesia

e-mail : [didan78910@gmail.com](mailto:didan78910@gmail.com)

**Ari Endang Jayati, Roni Kartika Pramuyanti**

Program Studi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Semarang, Semarang 50196, Indonesia

e-mail : [ariendang@usm.ac.id](mailto:ariendang@usm.ac.id), [ronikartika@usm.ac.id](mailto:ronikartika@usm.ac.id)

### Abstrak

Sistem panel surya *hybrid off-grid* merupakan solusi penyediaan energi listrik yang memanfaatkan sumber energi terbarukan secara mandiri tanpa ketergantungan penuh pada jaringan PLN. Dalam sistem ini, baterai memiliki peran penting sebagai media penyimpanan energi listrik dari panel surya yang digunakan saat intensitas matahari rendah atau pada malam hari. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efisiensi dan unjuk kerja baterai pada sistem panel surya *hybrid off-grid* dengan mempertimbangkan variasi beban, kapasitas penyimpanan energi, serta tingkat kedalaman pengosongan baterai *Depth of Discharge* (DOD). Hasil analisis menunjukkan bahwa efisiensi baterai dipengaruhi oleh besarnya arus pengisian, suhu operasi, serta nilai DOD yang digunakan. Semakin tinggi DOD menyebabkan efisiensi energi menurun dan mempercepat penurunan umur baterai. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa efisiensi sistem panel surya *hybrid off-grid* dapat ditingkatkan dengan pemilihan kapasitas baterai yang sesuai dengan kebutuhan beban, pengaturan DOD yang optimal, dan penerapan sistem kontrol yang baik antara panel surya, inverter, serta baterai. Hasil studi ini diharapkan menjadi acuan dalam pengembangan sistem energi terbarukan yang efisien, handal, dan berkelanjutan.

**Kata Kunci:** Panel surya, system *hybrid*, baterai, efisiensi, DOD

### Abstract

*An off-grid hybrid solar panel system is a solution for providing electricity independently using renewable energy sources without relying entirely on the PLN grid. In this system, batteries play a crucial role as a medium for storing electrical energy from solar panels, which is used during low solar intensity or at night. This study aims to analyze the efficiency and performance of batteries in an off-grid hybrid solar panel system, taking into account load variations, energy storage capacity, and the depth of discharge (DOD). The analysis shows that battery efficiency is influenced by the charging current, operating temperature, and the DOD value used. A higher DOD decreases energy efficiency and accelerates battery life. The study concludes that the efficiency of an off-grid hybrid solar panel system can be improved by selecting a battery capacity appropriate to the load requirements, optimal DOD settings, and implementing a robust control system between the solar panels, inverter, and battery. The results of this study are expected to serve as a reference in the development of efficient, reliable, and sustainable renewable energy systems.*

**Keywords:** Solar panel, hybrid systems, batteries, efficiency, DOD

### PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat seiring pertumbuhan populasi dan perkembangan industri menuntut adanya sistem penyediaan energi yang lebih efisien, andal, serta ramah lingkungan. Pemanfaatan energi terbarukan, khususnya energi surya melalui sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS), menjadi solusi strategis untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil dan menekan emisi gas rumah kaca (IEA, 2023). Indonesia sebagai negara tropis memiliki potensi

radiasi matahari yang tinggi sepanjang tahun, sehingga penerapan sistem panel surya hybrid off-grid dinilai sangat relevan untuk mendukung kemandirian energi, terutama di daerah dengan keterbatasan akses jaringan listrik konvensional (Prasetyo et al., 2022).

Sistem panel surya hybrid off-grid merupakan sistem pembangkit listrik mandiri yang mengintegrasikan modul fotovoltaik dengan sistem penyimpanan energi berupa baterai. Pada sistem ini, baterai memiliki peran krusial sebagai media penyimpanan energi listrik yang dihasilkan panel surya untuk digunakan saat intensitas radiasi matahari rendah atau pada malam hari. Oleh karena

itu, performa dan efisiensi baterai menjadi faktor utama yang menentukan keandalan dan kontinuitas suplai energi pada sistem secara keseluruhan (Hemmatpour et al., 2021).

Efisiensi baterai dalam sistem PLTS dipengaruhi oleh berbagai faktor operasional, seperti arus pengisian dan pengosongan, temperatur lingkungan, serta kedalaman pengosongan baterai atau *Depth of Discharge* (DoD). Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan DoD yang dilakukan secara berulang dapat mempercepat degradasi kapasitas baterai dan menurunkan umur siklusnya secara signifikan (Zhang et al., 2022). Selain itu, fenomena penuaan baterai (*battery aging*) yang terjadi akibat proses kimia internal dan siklus penggunaan juga berdampak langsung terhadap penurunan efisiensi energi yang dapat dimanfaatkan dalam jangka panjang (Liu et al., 2022).

Di sisi lain, perkembangan teknologi baterai lithium-ion, khususnya lithium iron phosphate (LiFePO<sub>4</sub>), memberikan alternatif penyimpanan energi dengan efisiensi siklus tinggi, stabilitas termal yang baik, serta umur pakai yang lebih panjang dibandingkan baterai konvensional berbasis timbal-asam. Teknologi ini memungkinkan sistem PLTS hybrid off-grid beroperasi dengan tingkat keandalan yang lebih tinggi serta kehilangan energi yang lebih rendah selama proses penyimpanan dan distribusi daya (Li et al., 2024).

Selain karakteristik baterai, strategi manajemen energi dalam sistem hybrid juga memegang peranan penting dalam mengoptimalkan pemanfaatan energi surya. Pengaturan distribusi daya antara panel surya, baterai, dan beban secara optimal dapat meningkatkan efisiensi sistem sekaligus memperpanjang umur operasional komponen penyimpanan energi (Almeida et al., 2021). Oleh karena itu, analisis efisiensi dan unjuk kerja baterai pada sistem panel surya hybrid off-grid menjadi aspek penting yang perlu dikaji secara komprehensif.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efisiensi serta performa baterai pada sistem panel surya hybrid off-grid dengan mempertimbangkan variasi beban, kapasitas penyimpanan energi, serta parameter operasional seperti *Depth of Discharge*, temperatur kerja, dan pola pengisian. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem energi terbarukan yang lebih efisien, andal, dan berkelanjutan.

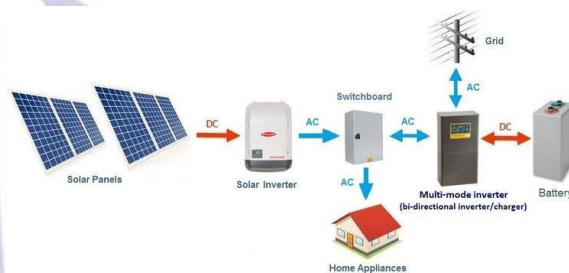
## TINJUAN PUSTAKA

### *Sistem Panel Surya Hybrid Off-Grid*

Sistem panel surya hybrid off-grid merupakan sistem pembangkit listrik mandiri yang

mengombinasikan energi dari panel fotovoltaik dengan sistem penyimpanan energi, umumnya berupa baterai. Sistem ini dirancang untuk menyediakan energi listrik secara kontinu tanpa ketergantungan penuh pada jaringan utilitas, sehingga sangat cocok diterapkan pada daerah terpencil atau wilayah dengan akses listrik terbatas (Khezri et al., 2021).

Dalam konfigurasi hybrid, energi yang dihasilkan panel surya dapat langsung digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban, disimpan dalam baterai, atau dikombinasikan dengan sumber energi lain. Keunggulan utama sistem ini terletak pada fleksibilitas operasional serta kemampuannya dalam menjaga kontinuitas suplai energi melalui integrasi sistem penyimpanan (Dey & Mohapatra, 2021).



Gambar 1 Sistem Panel Surya Hybrid Off-Grid

Gambar 1 menunjukkan sistem panel surya *hybrid off-grid* yang terdiri dari panel surya, *solar charge controller*, inverter hybrid, baterai, beban, dan jaringan listrik (grid). Panel surya menghasilkan energi listrik DC yang kemudian diatur oleh *charge controller* sebelum disimpan pada baterai atau disalurkan ke inverter. Inverter berfungsi mengubah listrik DC menjadi AC untuk digunakan oleh beban. Baterai menyimpan energi cadangan yang digunakan saat produksi panel surya menurun, sedangkan jaringan listrik berperan sebagai sumber daya tambahan ketika energi dari panel surya dan baterai tidak mencukupi. Sistem ini memungkinkan pasokan listrik yang lebih andal dan efisien.

### *Panel Surya dan Karakteristik Energi*

Panel surya atau modul fotovoltaik (PV) merupakan perangkat yang mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik arus searah (DC) melalui efek fotovoltaik. Kinerja panel surya dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, seperti intensitas radiasi matahari, temperatur permukaan modul, serta sudut kemiringan dan orientasi pemasangan (IEA, 2023).

Efisiensi modul fotovoltaik komersial saat ini umumnya berada pada kisaran 15–22%, tergantung pada jenis teknologi yang digunakan, seperti monokristalin, polikristalin, maupun thin-film. Peningkatan temperatur modul diketahui dapat menurunkan tegangan keluaran, sehingga berdampak pada penurunan efisiensi sistem secara keseluruhan (Prasetyo et al., 2022).

### *Baterai sebagai Sistem Penyimpanan Energi*

Baterai merupakan komponen utama dalam sistem PLTS hybrid off-grid yang berfungsi sebagai media penyimpanan energi listrik untuk menjamin kontinuitas suplai daya. Karakteristik utama baterai meliputi kapasitas energi, efisiensi charge-discharge, umur siklus (*cycle life*), serta tingkat keamanan operasional (Hemmatpour et al., 2021).

Teknologi baterai yang umum digunakan dalam sistem PLTS meliputi baterai timbal-asam (lead-acid) dan lithium-ion. Baterai lithium-ion, khususnya tipe lithium iron phosphate (LiFePO<sub>4</sub>), memiliki keunggulan dalam hal efisiensi tinggi, umur pakai panjang, serta stabilitas termal yang lebih baik dibandingkan baterai konvensional, sehingga lebih sesuai untuk aplikasi sistem energi terbarukan modern (Li et al., 2024).

### **Efisiensi dan Unjuk Kerja Baterai**

Efisiensi baterai merupakan parameter penting yang menunjukkan kemampuan baterai dalam menyimpan dan mengembalikan energi listrik. Salah satu indikator utama adalah *round-trip efficiency*, yaitu perbandingan antara energi yang dikeluarkan dengan energi yang disimpan selama proses pengisian dan pengosongan. Nilai efisiensi ini dipengaruhi oleh rugi-rugi internal, kondisi operasi, serta kualitas sistem manajemen baterai (Choi et al., 2022).

Selain itu, unjuk kerja baterai juga dipengaruhi oleh fenomena *battery aging*, yaitu penurunan kapasitas baterai seiring waktu akibat reaksi kimia internal dan siklus penggunaan. Penuaan baterai dapat terjadi baik karena faktor waktu (*calendar aging*) maupun siklus charge-discharge (*cycle aging*), yang secara langsung mempengaruhi performa dan efisiensi sistem (Liu et al., 2022).

### **Depth of Discharge (DoD) dan State of Charge (SoC)**

*Depth of Discharge* (DoD) merupakan parameter yang menunjukkan persentase energi yang telah dikeluarkan dari baterai dibandingkan dengan kapasitas totalnya. Sebaliknya, *State of Charge* (SoC) menunjukkan tingkat energi yang masih tersimpan dalam baterai. Kedua parameter ini memiliki hubungan yang saling berkebalikan dan sangat penting dalam menentukan umur serta performa baterai.

Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan DoD yang terlalu dalam secara berulang dapat mempercepat degradasi kapasitas dan menurunkan umur siklus baterai secara signifikan. Oleh karena itu, pengoperasian baterai pada rentang DoD yang optimal menjadi strategi penting untuk meningkatkan keandalan sistem (Zhang et al., 2022).

### **Pengaruh Temperatur terhadap Kinerja Baterai**

Temperatur merupakan faktor kritis yang mempengaruhi performa dan umur baterai. Suhu tinggi dapat mempercepat reaksi kimia internal yang menyebabkan degradasi material aktif, sedangkan suhu rendah dapat menurunkan kapasitas efektif serta efisiensi pengisian baterai.

Pada baterai lithium-ion, temperatur operasi yang optimal umumnya berada pada kisaran 15–35°C. Operasi di luar rentang tersebut dapat menurunkan efisiensi dan mempercepat proses penuaan baterai, sehingga diperlukan sistem manajemen termal yang baik untuk menjaga stabilitas kinerja (Li et al., 2024).

### **Sistem Manajemen Energi pada PLTS Hybrid**

Sistem manajemen energi (*Energy Management System/EMS*) berperan dalam mengatur distribusi daya antara panel surya, baterai, dan beban agar sistem dapat bekerja secara optimal. Strategi pengelolaan energi yang baik dapat meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan, mengurangi rugi-rugi energi, serta memperpanjang umur operasional baterai (Almeida et al., 2021).

Optimasi manajemen energi juga mencakup pengaturan prioritas penggunaan energi, seperti pemanfaatan langsung energi surya untuk beban pada siang hari serta penggunaan baterai pada kondisi beban puncak atau saat produksi energi menurun. Dengan demikian, sistem hybrid off-grid dapat beroperasi secara lebih efisien dan berkelanjutan.

## **METODE PENELITIAN**

### **Jenis dan Pendekatan Penelitian**

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif, yaitu penelitian yang berfokus pada pemahaman dan analisis fenomena teknis yang terjadi pada sistem panel surya hybrid off-grid, khususnya pada kinerja dan efisiensi baterai sebagai media penyimpanan energi.

Pendekatan ini bertujuan untuk memberikan gambaran nyata mengenai bagaimana baterai bekerja dalam sistem, faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensinya, serta kendala yang muncul selama pengoperasian sistem.

### **Objek dan Fokus Penelitian**

Objek penelitian ini adalah sistem panel surya hybrid off-grid yang mencakup komponen utama berupa panel surya, inverter, dan baterai sebagai media penyimpanan energi. Penelitian difokuskan pada analisis efisiensi proses pengisian dan pengosongan baterai,

pengaruh kondisi lingkungan terhadap kinerjanya, serta evaluasi kesesuaian performa aktual sistem dengan spesifikasi teknis yang telah ditetapkan.

### Sumber Data

Data primer dalam penelitian ini diperoleh melalui observasi langsung terhadap sistem panel surya hybrid off-grid, wawancara dengan teknisi atau operator yang berpengalaman dalam menangani performa serta kendala pada baterai, dan pencatatan lapangan yang mencakup pengamatan arus, tegangan, suhu, serta waktu operasi baterai. Sementara itu, data sekunder dikumpulkan dari berbagai sumber seperti dokumen teknis spesifikasi baterai dan sistem panel surya, literatur atau jurnal penelitian terdahulu yang membahas efisiensi maupun unjuk kerja baterai, serta data hasil monitoring sistem yang berasal dari log inverter atau data logger sebagai pendukung analisis.

### Teknik Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui beberapa pendekatan. Pertama, observasi lapangan dilakukan dengan mengamati secara langsung perilaku sistem, kondisi pengisian dan pengosongan baterai, serta efisiensi kerja sistem secara keseluruhan. Kedua, wawancara baik terstruktur maupun tidak terstruktur melibatkan teknisi, pengguna, maupun ahli energi surya untuk memperoleh pemahaman mendalam mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi performa baterai. Ketiga, dokumentasi dilakukan dengan mengumpulkan data dari laporan sistem, spesifikasi alat, grafik hasil monitoring, serta foto-foto sistem sebagai bahan pendukung analisis.

### Teknik Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan secara kualitatif deskriptif melalui beberapa tahapan. Proses dimulai dengan reduksi data, yaitu menyeleksi informasi yang relevan dan berkaitan langsung dengan efisiensi serta performa baterai. Data yang telah dipilih kemudian disajikan dalam bentuk tabel, grafik, maupun narasi agar lebih mudah dipahami. Selanjutnya, dilakukan penarikan kesimpulan dengan menganalisis keterkaitan antara kondisi operasional, beban sistem, dan kinerja baterai untuk menentukan tingkat efisiensi serta unjuk kerja yang dicapai. Tahap akhir berupa validasi data, yaitu membandingkan hasil pengamatan dengan data sekunder atau teori untuk memastikan ketepatan dan konsistensi analisis.

### Alur Penelitian

Tahapan kegiatan penelitian disusun dalam sebuah alur yang sistematis, dimulai dari studi literatur mengenai sistem panel surya hybrid off-grid dan karakteristik baterai sebagai dasar pemahaman teoritis. Setelah itu dilakukan observasi sistem serta

pengumpulan data lapangan untuk memperoleh gambaran nyata terkait kondisi operasional. Kegiatan ini dilengkapi dengan wawancara dan dokumentasi sebagai sumber data pendukung. Seluruh informasi yang terkumpul kemudian dianalisis untuk menilai efisiensi dan performa baterai. Pada tahap akhir, hasil analisis dirangkum dan disusun menjadi kesimpulan penelitian yang memberikan gambaran komprehensif mengenai unjuk kerja sistem.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Definisi Panel Surya

Panel surya atau modul fotovoltaik (PV) adalah perangkat yang mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik. Panel ini terdiri dari sel surya yang terbuat dari bahan semikonduktor, biasanya silikon kristalin (monokristalin atau polikristalin) atau teknologi thin-film (lapisan tipis).

### Jenis Panel Surya:

1. Monokristalin: Efisiensi tinggi (sekitar 18–22%), bentuk sel seragam, performa baik di area terbatas, harga relatif lebih mahal.
2. Polikristalin: Efisiensi sedang (sekitar 15–18%), lebih murah, tampilan biru bercorak.
3. Thin-Film: Efisiensi rendah (10–12%), fleksibel, performa baik dalam cahaya rendah, umur lebih pendek.



Gambar 2 Panel Surya Monokristalin, Polikristalin, dan Thin-Film

### Komponen Utama Panel Surya:

1. Sel fotovoltaik: Tempat terjadinya konversi cahaya menjadi listrik.
2. Kaca pelindung: Melindungi sel dari benturan dan cuaca.
3. Lapisan belakang (backsheet): Isolator listrik dan pelindung mekanik.
4. Frame aluminium: Penyangga dan memudahkan pemasangan.

### Prinsip Kerja Panel Surya

Efek Fotovoltaik yaitu ketika cahaya matahari (foton) mengenai sel surya, elektron di dalam material semikonduktor terserap energinya sehingga terjadi pergerakan elektron yang menghasilkan arus listrik searah (DC).

**Proses Dasar:**

1. Penyerapan Cahaya: Panel menyerap cahaya matahari melalui sel surya.
2. Eksitasi Elektron: Energi foton membangkitkan elektron dari pita valensi ke pita konduksi, menciptakan pasangan elektron-hole.
3. Pembentukan Arus: Lapisan semikonduktor menciptakan medan listrik internal, sehingga elektron mengalir ke arah tertentu, menghasilkan arus DC.
4. Pengumpulan Arus: Arus dari setiap sel dikumpulkan melalui busbar dan dihubungkan ke terminal output panel.

**Hybrid Off-Grid:**

Dalam sistem hybrid off-grid, listrik dari panel surya dapat digunakan langsung untuk beban, disimpan di baterai, atau dikombinasikan dengan sumber energi cadangan (misalnya genset atau jaringan listrik utama). Sistem ini tidak sepenuhnya tergantung pada listrik PLN, sehingga sangat cocok untuk daerah terpencil.

**Data Kapasitas PV (Panel Surya)**

**Konfigurasi Panel Surya**

- Jumlah panel : 32 unit
- Daya per panel (Wp) : 435 Wp
- Total kapasitas array :  $32 \times 435 \text{ Wp} = 13.92 \text{ kWp}$

Tabel 1. Data Teknis Tiap Panel (Contoh Tipe 435 Wp Mono)

Parameter	Nilai
Daya maksimum (Pmax)	435 Wp
Tegangan pada Pmax (Vmp)	41.2 V
Arus pada Pmax (Imp)	10.56 A
Tegangan open circuit (Voc)	49.6 V
Arus short circuit (Isc)	11.31 A
Efisiensi modul	20,2 %
Toleransi daya	0 ~ +3%
Suhu operasi	-40°C ~ +85°C
Koefisien suhu daya	-0.35% / °C

Tabel 1 menunjukkan spesifikasi teknis panel surya monokristalin berkapasitas 435 Wp yang digunakan pada sistem. Parameter yang ditampilkan meliputi daya maksimum, tegangan dan arus kerja, efisiensi modul, serta karakteristik operasional lainnya yang menjadi dasar dalam perancangan dan analisis performa sistem PLTS.

**Konfigurasi Rangkaian**

sistem 48V dengan MPPT 600V:

- Susunan seri: 8 panel per string ( $V_{mp \text{ string}} \approx 8 \times 41.2 = 329.6 \text{ V}$ )
- Jumlah string paralel: 4
- Total daya per string:  $8 \times 435 = 3.48 \text{ kWp}$
- Total array:  $4 \times 3.48 = 13.92 \text{ kWp}$

**Data Kapasitas Inverter Hybrid**

Sistem menggunakan 4 unit inverter hybrid 5 kW.

**Kapasitas Total**

- Daya inverter per unit : 5 kW
- Jumlah unit : 4
- Total kapasitas :  $4 \times 5 = 20 \text{ kW}$

Tabel 2. Spesifikasi Teknis Inverter Hybrid (5 kW, 48V)

Parameter	Nilai
Tipe	Hybrid Off-Grid / On-Grid
Daya nominal	5000 W
Surge power / peak	10.000 W (5 detik)
Tegangan DC input	120–500 VDC
Max PV input	6000 W per unit
Max arus input MPPT	18 – 22 A
Efisiensi MPPT	99%
Efisiensi AC-DC / DC-AC	93 – 97%
Tegangan output AC	220–230 VAC
Mode operasi	PV → Beban → Baterai → PLN (urutan prioritas)

Tabel 2 menyajikan spesifikasi inverter hybrid yang digunakan sebagai penghubung antara panel surya, baterai, dan beban. Data tersebut menunjukkan kemampuan inverter dalam mengelola daya, efisiensi konversi energi, serta batas operasional yang mendukung kinerja sistem secara keseluruhan.

**Total Kapasitas Sistem**

1. Total PV dapat diterima inverter:  $4 \times 6000 \text{ W} = 24 \text{ kW PV max}$  (jadi array 13.92 kWp masih aman)
2. Kapasitas output AC total: 20 kW
3. Kapasitas surja total (peak):  $4 \times 10 \text{ kW} = 40 \text{ kW}$  (sesaat)



Gambar 3 Inverter Hybrid

**Data Kapasitas Baterai (LiFePO4)**

Menggunakan 8 unit baterai LiFePO<sub>4</sub> 48V 200Ah.

Tabel 3. Kapasitas Setiap Unit

Parameter	Nilai
Tegangan nominal	48 V
Kapasitas	200 Ah
Energi	48 V x 200 Ah = 9,6 kWh
Tegangan kerja	42 – 54 V
BMS current max	100 – 150 V
Cycle life	3000 – 6000 siklus (80 % DoD)
Efisiensi charge/discharge	95 – 98 %

Tabel 3 menunjukkan spesifikasi baterai LiFePO<sub>4</sub> yang digunakan sebagai media penyimpanan energi pada sistem panel surya hybrid off-grid. Parameter yang ditampilkan meliputi tegangan nominal, kapasitas, energi tersimpan, efisiensi pengisian-pengosongan, dan umur siklus baterai.

**Total Kapasitas Sistem Baterai**

- Jumlah unit: 8
- Konfigurasi: Paralel (8P)
- Tegangan tetap: 48V
- Kapasitas total Ah:  $8 \times 200 = 1600$  Ah
- Energi total:  $48 \times 1600 = 76.8$  kWh

**Kapasitas Usable (disarankan)**

Dengan DoD 80% untuk keawetan: Usable = 76.8 kWh  $\times$  0.8 = 61.44 kWh

Tabel 4. Ringkasan Kapasitas Sistem Secara Utuh

Komponen	Kapasitas	Keterangan
Panel Surya	13.92 kWp	32 $\times$ 435 Wp
Inverter Hybrid	20 kW	4 $\times$ 5 kW
Baterai Total	76.8 kWh	8 $\times$ 9.6 kWh (48V 200Ah)

Energi baterai usable	61.44 kWh	DoD 80%
-----------------------	-----------	---------

Tabel 4 merangkum kapasitas seluruh komponen utama sistem, yaitu panel surya, inverter hybrid, dan baterai. Ringkasan ini memberikan gambaran mengenai kemampuan sistem dalam menghasilkan, menyimpan, dan menyalurkan energi listrik.

**PEMBAHASAN**

**Jenis Baterai untuk PLTS**

**Lead-Acid (Aki Timbal)**

a. Flooded Lead-Acid (FLA)

- Memerlukan perawatan rutin (cek air aki, pembersihan terminal).
- Depth of Discharge ideal hanya 50%.
- Efisiensi pengisian sekitar 75–85%.
- Umur pakai: 3–5 tahun.

b. Valve Regulated Lead-Acid (VRLA)

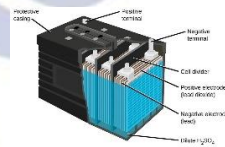
Terdiri dari dua tipe utama:

1. Absorbent Glass Mat (AGM)

- Minim perawatan.
- Lebih tahan arus tinggi.
- Efisiensi 85–90%.
- Umur pakai 4–7 tahun.

2. Gel

- Lebih stabil terhadap suhu tinggi.
- DoD aman sampai 60–70%.
- Umur pakai 5–8 tahun.
- Sensitif terhadap overcharging.



Gambar 4 Lead-Acid (Aki Timbal)

**Lithium-Ion**

1. Lithium Iron Phosphate (LiFePO<sub>4</sub> / LFP)

- Paling populer untuk PLTS.
- Sangat aman secara termal.
- Efisiensi 92–98%.
- DoD hingga 80–90%.
- Umur pakai 10–15 tahun (3000–6000 siklus).

2. NMC (Nickel Manganese Cobalt)

- Kepadatan energi tinggi.
- Banyak dipakai pada kendaraan listrik.
- Kurang tahan panas dibanding LFP.
- Umur pakai 8–12 tahun.



Gambar 5 Lithium-Ion

### Nickel-Based Batteries

Lebih jarang digunakan karena harga tinggi, namun memiliki ketahanan ekstrem.

1. Nickel-Cadmium (NiCd)
  - Sangat tahan temperatur ekstrem.
  - Siklus panjang.
  - Mengandung bahan beracun (cadmium).
  - DoD bisa 80–90%.
2. Nickel-Metal Hydride (NiMH)
  - Lebih aman daripada NiCd.
  - Umur pakai moderat.
  - Tidak sepopuler Lithium untuk PLTS.

Tabel 5. Perbandingan singkat jenis baterai

Jenis Baterai	Efisiensi	DoD	Umur Pakai	Perawatan	Biaya
FLA	Rendah	50%	3-5 tahun	Tinggi	Murah
AGM	Sedang	50-60%	4-7 tahun	Rendah	Sedang
Gel	Sedang	60-70%	5-8 tahun	Rendah	Sedang
LiFePO <sub>4</sub>	Tinggi	80-90%	10-15 tahun	Sangat Rendah	Tinggi
NMC	Tinggi	70-85%	8-12 tahun	Rendah	Tinggi
Flow	Stabil	100%	15-20 tahun	Rendah	Sangat Tinggi

Tabel 5 menyajikan perbandingan karakteristik beberapa jenis baterai yang umum digunakan pada sistem PLTS berdasarkan efisiensi, kedalaman pengosongan (*Depth of Discharge*), umur pakai, kebutuhan perawatan, dan biaya investasi. Perbandingan ini digunakan sebagai dasar pemilihan teknologi baterai yang sesuai dengan kebutuhan sistem.

### Depth of Discharge (DoD)

Depth of Discharge (DoD) adalah parameter kunci yang menggambarkan seberapa besar porsi energi yang telah dikeluarkan dari sebuah baterai dibandingkan kapasitas totalnya. Nilai ini biasanya dinyatakan dalam persen dan sangat menentukan umur pakai, efisiensi, serta kinerja baterai dalam sistem panel surya, terutama konfigurasi hybrid off-grid.

### Makna DoD

DoD menunjukkan kedalaman pengosongan baterai. Misalnya:

- DoD 30% berarti baterai telah mengeluarkan 30% dari total energinya.
- DoD 80% berarti energinya sudah diambil hingga 80% dari kapasitas penuh.

### Mengapa DoD Penting?

- Menentukan umur baterai Semakin sering baterai dikosongkan dalam (DoD tinggi), semakin cepat degradasinya. Misalnya, baterai LiFePO<sub>4</sub> dapat bertahan ±6000 cycle pada DoD 80%, tetapi bisa mencapai >9000 cycle pada DoD 50%.
- Menentukan perencanaan kapasitas Dalam sistem panel surya hybrid off-grid, DoD dipakai untuk menentukan berapa banyak baterai yang diperlukan agar tidak dikosongkan terlalu dalam setiap hari.
- Menjaga stabilitas dan keamanan operasi Baterai yang dioperasikan melebihi DoD maksimum (misalnya lead-acid > 50%) bisa mengalami kerusakan permanen, sulfatasi, atau penurunan kapasitas.

Tabel 6. DoD Berdasarkan jenis baterai

Jenis Baterai	DoD Aman
Lead-acid(VRLA/AGM/GEL)	50% - 60%
Lithium LiFePO <sub>4</sub>	80% - 90%
NMC Lithium	70% - 80%
Flooded Lead-acid	40% - 50%

Tabel 6 menunjukkan rentang *Depth of Discharge* (DoD) yang direkomendasikan untuk berbagai jenis baterai. Nilai DoD aman digunakan sebagai acuan pengoperasian baterai agar umur pakai dan performanya tetap optimal.

### Contoh Perhitungan DoD di Sistem Hybrid Off-Grid

- Kapasitas baterai = 48 V, 200 Ah → 9.6 kWh
- Energi yang dipakai dalam sehari = 5 kWh

DoD harian:

$$DoD = \frac{5}{9.6} \times 100\% = 52\% \quad (1)$$

Artinya baterai dikosongkan hingga sekitar setengah kapasitasnya. Jika sistem memakai LiFePO<sub>4</sub> yang aman sampai DoD 80%, maka operasi ini masih dalam batas aman.

### Implikasi DoD pada Desain Sistem

- Untuk meningkatkan umur baterai, disarankan merancang penggunaan harian di bawah 60% dari DoD maksimum.

- Kapasitas baterai sering dihitung berdasarkan:

$$Kapasitas\ Baterai = \frac{beban\ harian}{DoD\ maks\ yang\ diizinkan} \quad (2)$$

$$= \frac{8}{0.7} = 11.4\ kWh \quad (3)$$

Contoh: beban harian 8 kWh, DoD aman 70%

State of Charge (SoC) adalah parameter yang menunjukkan seberapa banyak energi yang masih tersimpan di dalam baterai pada suatu waktu dibandingkan kapasitas penuhnya. Nilai ini dinyatakan dalam persen dan berfungsi seperti “indikator bahan bakar” pada baterai, khususnya dalam sistem panel surya hybrid off-grid.

### State of Charge (SoC)

#### Makna SoC

SoC menggambarkan tingkat pengisian baterai:

- SoC 100% → baterai penuh.
- SoC 50% → energi tersisa setengah dari kapasitas total.
- SoC 20% → baterai hampir habis dan perlu segera diisi.

SoC adalah kebalikan dari Depth of Discharge (DoD):

$$SoC = 100\% - DoD$$

Contoh:

- DoD 40% → SoC 60%
- DoD 80% → SoC 20%

Tabel 7. Rentang SoC ideal berdasarkan jenis baterai

Jenis Baterai	SoC Minimum Aman
Lead-acid (VRLA/GEL/AGM)	50%
LiFePO4	10% - 20%
NMC Lithium	20%

Tabel 7 menyajikan batas minimum *State of Charge* (SoC) yang disarankan untuk masing-masing jenis baterai. Pengoperasian baterai di atas batas SoC minimum membantu menjaga kesehatan baterai dan mengurangi risiko degradasi kapasitas.

#### Contoh Penggunaan SoC pada Sistem Anda

sistem hybrid off-grid dengan baterai LiFePO4:

- Kapasitas baterai: 10 kWh
- Energi terpakai hari ini: 6 kWh

Maka:

$$SoC = (1 - \frac{6}{10}) \times 100\% = 40\% \quad (5)$$

### Round-trip efficiency

Round-trip efficiency adalah ukuran yang menggambarkan seberapa efisien sebuah baterai dalam menyimpan dan mengembalikan energi. Parameter ini menunjukkan persentase energi yang berhasil keluar kembali dari baterai dibandingkan energi yang masuk saat proses pengisian.

#### Definisi

Round-trip efficiency (RTE) menggambarkan:

- Energi yang disimpan → energi yang dikeluarkan kembali  
Semakin tinggi nilai ini, semakin kecil energi yang hilang selama proses charging–discharging.

Secara matematis:

$$RTE = \frac{Energi\ Keluar}{Energi\ Masuk} \times 100\% \quad (6)$$

#### Contoh Sederhana

Jika baterai menerima 10 kWh saat pengisian, tetapi hanya dapat mengeluarkan 9 kWh:

$$RTE = \frac{9}{10} \times 100\% = 90\% \quad (7)$$

Artinya terdapat 10% energi hilang akibat panas, resistansi internal, dan proses kimia.

#### Faktor yang Mempengaruhi Round-trip Efficiency

1. Jenis baterai Teknologi lithium memiliki efisiensi tinggi, lead-acid relatif rendah.
2. Suhu operasi Suhu terlalu panas atau terlalu dingin menurunkan efisiensi.
3. Arus pengisian & pengosongan Arus besar memperbesar kehilangan energi (losses).

4. Umur baterai (cycle aging) Baterai yang sudah lama digunakan memiliki resistansi internal lebih tinggi.
5. Kualitas BMS control inverter Pengaturan yang kurang optimal menambah rugi-rugi.

- Depth of Discharge (DoD) yang terlalu besar
- Arus charging/discharging yang tinggi
- Suhu operasi tinggi
- Overcharging atau deep discharge

Misalnya, baterai lithium akan menua lebih cepat jika sering dikosongkan hingga <20%.

### Contoh Hitungan Round-trip Efficiency

Panel surya memasukkan energi ke baterai: 12 kWh

- Energi yang dapat dipakai kembali: 11.1 kWh

Maka:

$$RTE = \frac{11.1}{12} \times 100\% = 92.5\% \quad (8)$$

Ini tipikal untuk baterai LiFePO<sub>4</sub>.

### Battery aging & cycle life

Battery aging & cycle life adalah dua konsep penting yang menjelaskan bagaimana baterai mengalami penurunan performa seiring waktu serta berapa banyak siklus pengisian-pengosongan yang dapat ditanggung sebelum kapasitasnya menurun secara signifikan. Keduanya sangat berpengaruh dalam analisis efisiensi dan unjuk kerja baterai pada sistem panel surya hybrid off-grid.

#### 1. Battery Aging (Penuaan Baterai)

Battery aging adalah proses alami ketika baterai kehilangan kapasitas dan efisiensinya akibat reaksi kimia internal, suhu, beban, dan pola penggunaan. Ada dua jenis utama:

- a. Calendar Aging (penuaan berdasarkan waktu)

Penuaan ini terjadi meskipun baterai tidak digunakan. Dipengaruhi oleh:

- Suhu penyimpanan
- Level SoC rata-rata
- Reaksi kimia internal

Contoh:

Baterai LiFePO<sub>4</sub> yang disimpan pada 25°C dengan SoC 50% akan lebih awet dibanding disimpan pada SoC 100% dalam suhu 40°C.

- b. Cycle Aging (penuaan berdasarkan siklus pemakaian)

Terjadi akibat proses charge-discharge berulang.

Faktor pemicu:

### Cycle Life (Umur Siklus Baterai)

Cycle life adalah jumlah siklus penuh (1 siklus = 1 charge dari kosong → penuh → kosong) yang dapat dijalani baterai sebelum kapasitasnya turun ke batas tertentu, biasanya 80% dari kapasitas awal.

Contoh:

- Jika baterai LiFePO<sub>4</sub> punya spesifikasi 6000 cycle @ DoD 80%, maka setelah sekitar 6000 siklus, kapasitasnya tinggal ±80%.

### Hubungan DoD dengan Cycle Life

Semakin dangkal DoD, semakin panjang cycle life

Contoh umum baterai LiFePO<sub>4</sub>:

- DoD 100% → ±3500 cycle
- DoD 80% → ±6000 cycle
- DoD 50% → ±9000 cycle
- DoD 30% → >12.000 cycle

Artinya penggunaan lebih dangkal memperpanjang usia baterai.

### Faktor yang Mempercepat Battery Aging

1. Suhu tinggi meningkatkan resistansi internal dan mempercepat degradasi elektrolit.
2. DoD terlalu dalam beban berat pada setiap siklus.
3. Arus pengisian besar mempercepat stress kimia.
4. Overcharge atau over-discharge dapat merusak sel baterai.
5. Penggunaan pada SoC ekstrem (0–10% dan 90–100%) mempercepat penurunan kapasitas.

Tabel 8. Perbandingan *cycle life* berdasarkan teknologi

Teknologi Baterai	Cycle Life (DoD 80%)
LiFePO <sub>4</sub>	4000-8000 cycle
NMC Lithium	2000-4000 cycle
GEL/AGM Lead-Acid	500-1200 cycle
Flooded Lead-Acid	300-800 cycle

Tabel 8 menunjukkan perbandingan umur siklus (*cycle life*) beberapa teknologi baterai pada kondisi DoD 80%. Data ini menggambarkan ketahanan baterai terhadap siklus pengisian dan pengosongan berulang selama masa operasionalnya.

**Pengaruh Temperatur (Suhu)**

Suhu adalah faktor paling berpengaruh terhadap performa dan umur baterai. Baterai adalah perangkat elektrokimia, dan reaksi kimianya sangat sensitif terhadap perubahan temperatur.

1. Suhu Tinggi (> 40°C)

Dampaknya:

- Mempercepat degradasi elektrolit.
- Meningkatkan resistansi internal, menurunkan efisiensi.
- Mempercepat calendar aging hingga 2–4 kali lipat.
- Memicu thermal runaway pada beberapa jenis lithium jika ekstrem.

Contoh:

Baterai LiFePO<sub>4</sub> yang bertahan 10 tahun pada suhu 25°C bisa berkurang menjadi 4–6 tahun pada suhu rata-rata 40°C.

2. Suhu Rendah (< 10°C)

Dampaknya:

- Kemampuan menerima arus pengisian menurun.
- Kapasitas efektif berkurang (bisa turun 20–30%).
- Reaksi elektrokimia melambat → efisiensi turun.

Pada lithium, charging < 0°C sangat tidak disarankan karena dapat merusak elektroda (lithium plating).

3. Suhu Ideal Operasi

- Lithium (LiFePO<sub>4</sub>) → 15–35°C
- Lead-acid (AGM/GEL) → 20–30°C

Sistem panel surya sering ditempatkan outdoor, sehingga desain ventilasi, shading, dan airflow pada ruang baterai sangat penting.

**Pengaruh Arus Pengisian (Charging Current)**

Arus pengisian menentukan seberapa cepat baterai menerima daya dari panel surya maupun sumber lain (PLN/genset). Pengaturan arus yang tepat melindungi baterai dari stress elektrokimia.

1. Arus Pengisian Terlalu Besar

Dampaknya:

- Mempercepat cycle aging.
- Menurunkan round-trip efficiency.
- Dapat memicu overload pada sel tertentu (jika BMS buruk).
- Mengurangi kapasitas usable dalam jangka panjang.

Contoh:

Baterai LiFePO<sub>4</sub> dengan rekomendasi charge rate 0.5C akan menurun usianya jika dipaksa sering di atas 1C.

2. Arus Pengisian Terlalu Kecil

Dampaknya:

- Pengisian menjadi sangat lambat.
- Baterai dapat bertahan pada SoC rendah terlalu lama → mempercepat aging.
- Pada lead-acid, menyebabkan sulfatasi karena ion tidak kembali sepenuhnya.

Tabel 9. Batas arus charging ideal

Jenis Baterai	Arus Rekomendasi
LiFePO <sub>4</sub>	0,2C – 0,5C
NMC Lithium	0,3C – 0,8C
AGM/GEL	0,1C – 0,3C

(C rate adalah persentase kapasitas baterai)

Tabel 9 menunjukkan rentang arus pengisian (*charging current*) yang direkomendasikan untuk masing-masing jenis baterai. Pengaturan arus pengisian yang sesuai dapat meningkatkan efisiensi pengisian sekaligus memperpanjang umur pakai baterai.

**Pengaruh Pola Beban (Load Pattern)**

Pola beban harian sangat menentukan kedalaman discharge (DoD), frekuensi siklus, serta stabilitas kinerja sistem.

1. Beban Lonjakan (Inrush / Surge Load)

Seperti pompa air, kulkas, atau mesin cuci.

Dampaknya:

- Arus puncak tinggi → stress pada baterai dan inverter.
- Meningkatkan resistansi internal.
- Menurunkan umur sel yang sering terkena lonjakan.

2. Beban Berat Berkepanjangan

Jika sistem digunakan di malam hari secara konstan:

- DoD harian menjadi lebih dalam → cycle life menurun.
- Baterai lithium masih stabil, tetapi lead-acid sangat terpengaruh.

### 3. Beban Tidak Merata (Fluktuatif)

Dampaknya:

- BMS bekerja lebih keras mengatur sel.
- Rugi-rugi meningkat akibat switching berulang.
- Arus naik-turun cepat → memicu aging lebih cepat.

### 4. Pola Beban Ideal

- Beban stabil, distribusi merata.
- Penggunaan beban besar dipindah ke siang hari saat PV menghasilkan daya maksimal.
- Hindari discharge mendalam setiap hari (DoD < 70% untuk lithium lebih baik).

## Integrasi Tiga Faktor dalam Sistem Hybrid Off-Grid

Dalam sistem yang saya gunakan (PV 32×435 Wp + baterai + inverter hybrid):

- Temperatur memengaruhi seluruh komponen, termasuk efisiensi MPPT dan BMS.
- Arus pengisian menentukan stres sel saat panel menghasilkan daya puncak siang hari.
- Pola beban menentukan *DoD harian*, yang sangat berpengaruh pada *cycle life*.

Kinerja optimal tercapai ketika:

- Suhu ruang baterai dijaga 20–30°C
- Charging rate stabil, tidak melebihi rekomendasi pabrik
- Pola beban diatur agar discharge harian ringan–sedang

## PENUTUP

### Simpulan

Pemilihan baterai pada sistem panel surya hybrid off-grid harus mempertimbangkan kebutuhan energi, efisiensi, umur pakai, dan biaya. Lithium-ion, khususnya tipe LiFePO<sub>4</sub>, menawarkan keseimbangan terbaik berkat efisiensi tinggi, kedalaman pengosongan (DoD) yang besar, umur siklus panjang,

dan minim perawatan, sehingga sangat sesuai untuk sistem modern. Sementara itu, baterai lead-acid masih dapat digunakan pada sistem berbiaya rendah, meskipun memiliki DoD lebih kecil, efisiensi lebih rendah, serta umur pakai lebih pendek sehingga memerlukan pengelolaan yang lebih ketat. Dalam pengoperasiannya, DoD dan State of Charge (SoC) menjadi parameter penting yang menentukan kesehatan baterai. Pengendalian DoD agar tetap dalam batas aman serta menjaga SoC minimum membantu mencegah penuaan dini, mempertahankan efisiensi, dan memperpanjang umur siklus baterai. Selain itu, efisiensi siklus penuh atau round-trip efficiency (RTE) turut menentukan seberapa banyak energi yang dapat dikembalikan setelah disimpan. Lithium-ion menunjukkan RTE lebih tinggi dibandingkan lead-acid, sehingga memberikan penghematan energi yang signifikan terutama untuk kebutuhan harian yang besar. Umur baterai juga dipengaruhi oleh proses penuaan dan jumlah siklus pemakaian yang dipengaruhi oleh suhu, arus pengisian, dan pola beban. Baterai lithium dapat bertahan lebih lama apabila dioperasikan dengan DoD dangkal serta arus pengisian yang sesuai rekomendasi. Faktor lingkungan seperti suhu tinggi, ketidakteraturan beban, serta arus pengisian berlebih dapat mempercepat degradasi sel, sehingga diperlukan manajemen yang baik melalui pengaturan ventilasi, sistem BMS, serta distribusi beban yang optimal agar performa baterai dan keseluruhan sistem tetap terjaga.

### Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pengujian jangka panjang guna menganalisis degradasi kapasitas dan perubahan efisiensi baterai pada sistem panel surya hybrid off-grid secara lebih komprehensif. Selain itu, perlu dilakukan perbandingan beberapa jenis teknologi baterai serta kajian pengaruh kedalaman pengosongan, temperatur, dan variasi beban terhadap unjuk kerja baterai. Penggunaan sistem monitoring berbasis data logger atau IoT juga dianjurkan agar parameter operasional baterai dapat dipantau secara real-time sehingga hasil analisis lebih akurat. Ke depan, penelitian dapat dikembangkan dengan simulasi optimasi kapasitas baterai serta analisis ekonomi dan lingkungan agar perancangan sistem hybrid off-grid menjadi lebih efisien, andal, dan berkelanjutan.

### REFERENSI

- Almeida, P. M., Castro, R., & Fernandes, C. (2021). Energy management optimization of hybrid PV-battery systems. *Renewable Energy*, 179, 1323–1335. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.102>
- Aziz, M., Oda, T., & Kashiwagi, T. (2021). Integration of renewable energy and battery storage systems. *Energy Procedia*, 158, 4020–4025. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2021.01.844>
- Bai, X., Cao, Y., & Li, Y. (2022). Performance degradation analysis of lithium-ion batteries under different operating conditions. *Journal of Energy Storage*,

- 47, 103595.  
<https://doi.org/10.1016/j.est.2022.103595>
- Choi, S., Kim, J., & Cho, B. (2022). Advanced battery management strategies for renewable energy storage systems. *Applied Energy*, 306, 117981. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117981>
- Dey, S., & Mohapatra, A. (2021). Techno-economic analysis of solar PV hybrid energy systems. *Energy Reports*, 7, 2274–2286. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.04.041>
- García, P., Torreglosa, J. P., & Fernández, L. M. (2023). Optimal sizing of battery storage in off-grid photovoltaic systems. *Solar Energy*, 246, 230–242. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.12.018>
- Hemmatpour, M. H., Mohammadi-Ivatloo, B., & Anvari-Moghaddam, A. (2021). Battery technologies for renewable energy integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110603. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110603>
- Khezri, R., Mahmoudi, A., & Aki, H. (2021). Review of hybrid renewable energy systems with battery storage. *Energy Conversion and Management*, 236, 114039. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114039>
- Li, W., Li, Y., & Chen, Z. (2024). Thermal behavior and efficiency analysis of LiFePO<sub>4</sub> batteries in solar applications. *Journal of Power Sources*, 596, 233997. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.233997>
- Liu, H., Zhang, X., & Wang, C. (2022). Cycle life prediction model for lithium-ion batteries. *Energy Storage Materials*, 45, 421–430. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2021.11.018>