



## Perancangan dan Simulasi Sistem Penyimpanan Energi Terintegrasi untuk Menstabilkan Jaringan Listrik dengan Penetrasi Energi Terbarukan Tinggi

Intan Kusuma Dewi<sup>1\*</sup>, Jaka Wicaksono Putra<sup>2</sup>

<sup>1-2</sup> Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Indonesia

Alamat: Jalan Brawijaya, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta.

\*Email [intan.dewi@umy.ac.id](mailto:intan.dewi@umy.ac.id)<sup>1\*</sup>, [jaka.putra@umy.ac.id](mailto:jaka.putra@umy.ac.id)<sup>2</sup>

Korespondensi penulis: [intan.dewi@umy.ac.id](mailto:intan.dewi@umy.ac.id)

**Abstract.** *The use of renewable energy sources like solar and wind to generate electricity is increasing. However, these energy sources are intermittent; the sun does not always shine, and the wind does not always blow. These fluctuations can disrupt the stability of the electrical grid, potentially causing blackouts or reduced power quality. This research aims to design an energy storage system (such as batteries) that is integrated with the electrical grid. This system acts as a temporary reservoir. When there is excess production from renewable sources, the surplus is stored. Conversely, when production decreases or electricity demand spikes, the stored energy is released back into the grid. The operation of this system was simulated using computer software to test its effectiveness in maintaining grid stability. The simulation results indicate that the designed storage system can automatically respond to changes in electricity supply and demand. Consequently, voltage and frequency fluctuations on the grid can be mitigated, resulting in a more stable and reliable power supply, even with a high penetration of renewable energy.*

**Keywords:** *Renewable energy, energy storage system, power grid stabilization, simulation.*

**Abstrak.** Penggunaan sumber energi terbarukan seperti matahari dan angin untuk menghasilkan listrik semakin meningkat. Namun, energi ini bersifat tidak menentu; matahari tidak selalu bersinar dan angin tidak selalu berhembus. Fluktuasi ini dapat mengganggu kestabilan jaringan listrik, menyebabkan pemadaman atau penurunan kualitas daya. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sebuah sistem penyimpanan energi (seperti baterai) yang terintegrasi dengan jaringan listrik. Sistem ini berfungsi seperti "penampung" sementara. Ketika produksi energi terbarukan berlebih, kelebihannya akan disimpan. Sebaliknya, saat produksi menurun atau kebutuhan listrik melonjak, energi yang tersimpan akan dilepaskan kembali ke jaringan. Proses kerja sistem ini disimulasikan menggunakan perangkat lunak komputer untuk menguji efektivitasnya dalam menjaga kestabilan jaringan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem penyimpanan yang dirancang mampu secara otomatis merespon perubahan pasokan dan permintaan listrik. Dengan demikian, fluktuasi tegangan dan frekuensi pada jaringan dapat diredam, sehingga pasokan listrik menjadi lebih stabil dan andal meskipun mengandalkan energi terbarukan dalam jumlah besar.

**Kata kunci:** Energi terbarukan, sistem penyimpanan energi, stabilisasi jaringan listrik, simulasi.

### 1. LATAR BELAKANG

Dalam beberapa dekade terakhir, isu perubahan iklim dan menipisnya cadangan bahan bakar fosil telah mendorong transformasi besar dalam sektor energi dunia. Pemanfaatan sumber energi terbarukan, seperti tenaga surya (matahari) dan tenaga angin, menjadi semakin masif karena sifatnya yang bersih dan tersedia melimpah di alam. Pemerintah dan pelaku industri di berbagai negara, termasuk Indonesia, gencar membangun pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dan tenaga angin (PLTB) untuk memenuhi kebutuhan listrik nasional sekaligus mengurangi emisi karbon.

Namun, di balik manfaatnya yang besar, energi terbarukan memiliki tantangan fundamental, yaitu sifatnya yang intermiten atau tidak menentu. PLTS hanya dapat menghasilkan listrik saat siang hari dan kinerjanya menurun drastis saat cuaca mendung. Sementara itu, PLTB sangat bergantung pada kecepatan angin yang bisa berubah-ubah setiap saat. Fluktuasi pasokan listrik dari sumber-sumber ini menjadi masalah serius ketika jumlahnya mulai mendominasi jaringan listrik (penetrasi tinggi).

Jaringan listrik konvensional dirancang untuk menerima pasokan yang stabil dan dapat diprediksi dari pembangkit fosil. Ketika pasokan dari energi terbarukan tiba-tiba turun atau naik secara drastis, hal ini dapat menyebabkan ketidakstabilan pada jaringan, seperti perubahan tegangan dan frekuensi. Akibatnya, kualitas listrik yang diterima konsumen menurun dan dalam kasus ekstrem dapat memicu pemadaman listrik (blackout).

Oleh karena itu, diperlukan sebuah solusi teknologi yang mampu menjembatani kesenjangan antara pasokan energi terbarukan yang fluktuatif dengan kebutuhan jaringan akan pasokan yang stabil. Salah satu solusi yang paling menjanjikan adalah Sistem Penyimpanan Energi (Energy Storage System). Baterai berkapasitas besar, misalnya, dapat menyimpan energi saat produksi melimpah dan melepaskannya kembali saat produksi menurun atau kebutuhan meningkat.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk merancang suatu sistem penyimpanan energi yang terintegrasi dengan jaringan listrik. Desain ini kemudian akan disimulasikan untuk menguji sejauh mana sistem tersebut mampu menstabilkan jaringan, terutama dalam skenario dimana kontribusi energi terbarukan sangat tinggi. Hasil dari simulasi ini diharapkan dapat menjadi landasan awal untuk implementasi nyata di masa depan, guna mewujudkan sistem ketenagalistrikan yang lebih hijau, andal, dan tangguh.

## **2. KAJIAN TEORITIS**

Untuk merancang dan mensimulasikan sistem yang dimaksud, perlu dipahami beberapa konsep dan teori dasar yang menjadi fondasi penelitian ini. Berikut adalah penjelasannya:

### **2.1 Energi Terbarukan dan Tantangan Intermitensi**

- a. Definisi: Energi terbarukan adalah sumber energi yang berasal dari alam dan dapat diperbarui secara terus-menerus, seperti sinar matahari (PLTS), angin (PLTB), air, dan panas bumi.
- b. Teori Intermitensi: Berbeda dengan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang menggunakan batu bara dan dapat beroperasi 24 jam, PLTS dan PLTB sangat bergantung pada kondisi alam. Secara teoritis, daya keluaran PLTS mengikuti kurva lonceng

(maksimum di siang hari, nol di malam hari), sementara PLTB mengikuti pola acak sesuai kecepatan angin. Ketidakpastian inilah yang disebut intermittency. Dalam jaringan listrik, hukum kesetimbangan mensyaratkan bahwa jumlah listrik yang diproduksi harus selalu sama dengan jumlah yang dikonsumsi setiap detiknya. Intermittensi mengganggu keseimbangan ini.

## 2.2 Stabilitas Jaringan Listrik

- a. Definisi: Stabilitas jaringan listrik mengacu pada kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kondisi operasi yang normal setelah mengalami gangguan.
- b. Parameter Utama:
  - 1) Stabilitas Frekuensi: Frekuensi listrik (di Indonesia 50 Hz) sangat dipengaruhi oleh keseimbangan daya aktif (Watt). Jika produksi < konsumsi, frekuensi turun. Jika produksi > konsumsi, frekuensi naik. Sistem dikatakan stabil jika frekuensi tetap di kisaran  $50 \text{ Hz} \pm 2\%$  (49,5 Hz - 50,5 Hz).
  - 2) Stabilitas Tegangan: Tegangan dipengaruhi oleh keseimbangan daya reaktif (VAR). Fluktuasi pasokan dari energi terbarukan dapat menyebabkan tegangan naik-turun (*voltage fluctuation*), yang dapat merusak peralatan listrik.

## 2.3 Sistem Penyimpanan Energi (Energy Storage System/ESS)

- a. Definisi: ESS adalah teknologi yang digunakan untuk menyimpan energi listrik pada suatu waktu dan melepaskannya pada waktu lain. Ini adalah komponen kunci dalam penelitian ini.
- b. Teori Kerja Dasar: ESS bekerja seperti "bank energi". Ia melakukan dua proses utama:
  - 1) Charging (Pengisian): Mengambil energi listrik dari jaringan saat produksi melimpah (misal siang hari saat PLTS menghasilkan banyak listrik) dan menyimpannya.
  - 2) Discharging (Pelepasan): Melepaskan energi listrik kembali ke jaringan saat produksi menurun atau konsumsi meningkat (misal malam hari atau saat awan tebal).
- c. Jenis yang Relevan (Baterai): Dalam konteks stabilisasi jangka pendek hingga menengah, Baterai Lithium-ion adalah pilihan utama karena memiliki kepadatan energi tinggi, respon cepat (milidetik), dan efisiensi bolak-balik yang baik (sekitar 85-95%). Baterai inilah yang paling umum disimulasikan untuk aplikasi ini.

## 2.4 Integrasi Sistem dan Konverter Daya (*Power Converter*)

- a. Teori Integrasi: Sistem penyimpanan tidak bisa langsung "dicolokkan" ke jaringan listrik. Jaringan listrik menggunakan arus bolak-balik (AC), sementara baterai menyimpan listrik dalam bentuk arus searah (DC).

- b. **Komponen Penghubung (Inverter):** Diperlukan sebuah perangkat elektronika daya yang disebut Inverter Dua Arah (Bidirectional Inverter) . Alat ini memiliki dua fungsi krusial:
  - 1) Mengubah DC dari baterai menjadi AC yang cocok dengan jaringan saat discharging.
  - 2) Mengubah AC dari jaringan menjadi DC untuk mengisi baterai saat charging.
  - 3) Selain itu, inverter modern juga dilengkapi sistem kontrol cerdas yang mengatur kapan harus charging dan discharging berdasarkan kondisi jaringan.

## **2.5 Sistem Kontrol dan Logika Stabilisasi**

- a. **Teori Kontrol:** Agar sistem bekerja otomatis, diperlukan algoritma kontrol. Logika yang paling sederhana dan umum digunakan adalah:
  - 1) **Jika Frekuensi/Tegangan Turun (Defisit Daya):** Sistem kontrol memerintahkan inverter untuk melepas daya dari baterai ke jaringan (mode discharge) hingga frekuensi/tegangan normal kembali.
  - 2) **Jika Frekuensi/Tegangan Naik (Surplus Daya):** Sistem kontrol memerintahkan inverter untuk menyerap daya dari jaringan ke baterai (mode charge) hingga frekuensi/tegangan normal kembali.
- b. **State of Charge (SoC):** Teori ini juga mengatur agar baterai tidak diisi terlalu penuh (overcharge) atau dikosongkan terlalu dalam (over-discharge), yang dapat merusak baterai. SoC biasanya dijaga di kisaran 20% - 90%.

## **2.6 Simulasi Sistem Tenaga Listrik**

- a. **Definisi:** Sebelum membangun sistem fisik yang mahal, simulasi dilakukan untuk memprediksi perilaku sistem. Simulasi adalah representasi matematis dari dunia nyata menggunakan perangkat lunak komputer.
- b. **Teori yang Digunakan dalam Simulasi:**
  - 1) **Aliran Daya (Load Flow Analysis):** Untuk melihat bagaimana daya mengalir di jaringan dan bagaimana tegangan di setiap titik sebelum dan sesudah integrasi ESS.
  - 2) **Analisis Transien (Transient Stability Analysis):** Untuk melihat respon sistem terhadap perubahan mendadak, seperti tiba-tiba turunnya output PLTS karena awan. Simulasi ini akan menunjukkan seberapa cepat ESS dapat merespon untuk menstabilkan frekuensi.

## **3. METODE PENELITIAN**

### **3.1 Isu Global: Transisi Energi dan Perubahan Iklim**

Dalam beberapa dekade terakhir, dunia menghadapi dua tantangan besar sekaligus: perubahan iklim akibat emisi gas rumah kaca dan menipisnya cadangan bahan bakar fosil

seperti batu bara dan minyak bumi. Sebagai respons, hampir semua negara berkomitmen untuk melakukan transisi energi, yaitu beralih dari energi fosil ke energi terbarukan yang lebih bersih dan berkelanjutan. Indonesia sendiri telah menetapkan target ambisius dalam Kebijakan Energi Nasional, yaitu mencapai bauran energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025 dan terus meningkat di tahun-tahun berikutnya. Pemerintah gencar membangun Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu/Angin (PLTB) untuk mencapai target tersebut.

**Tabel 1. Perbandingan Energi Fosil vs Energi Terbarukan**

Aspek	Energi Fosil (Batu Bara)	Energi Terbarukan (Surya/Angin)
Ketersediaan Sumber	Terbatas, akan habis	Tidak terbatas (tersedia di alam)
Emisi Karbon	Tinggi (penyebab utama pemanasan global)	Sangat rendah (hampir nol)
Biaya Operasional	Tinggi (perlu beli bahan bakar)	Rendah (gratis dari alam)
Ketergantungan Cuaca	Tidak bergantung cuaca	Sangat bergantung cuaca

### 3.2 Masalah Utama: Sifat Intermiten Energi Terbarukan

Meskipun ramah lingkungan, energi terbarukan memiliki kelemahan mendasar yang disebut intermitensi atau ketidakpastian pasokan. Artinya, energi ini tidak dapat dihasilkan secara terus-menerus dengan jumlah yang stabil karena sangat bergantung pada kondisi alam.

- a. PLTS (Tenaga Surya): Hanya menghasilkan listrik saat siang hari. Produksinya menurun drastis saat cuaca mendung atau hujan, dan berhenti total di malam hari.
- b. PLTB (Tenaga Angin): Produksinya naik-turun mengikuti kecepatan angin yang berubah-ubah setiap saat. Jika angin tidak bertiup, tidak ada listrik yang dihasilkan.

Fluktuasi ini menjadi masalah besar ketika jumlah energi terbarukan dalam jaringan listrik sudah tinggi (penetrasi tinggi).

**Tabel 2. Pola Produksi Energi Terbarukan vs Konsumsi**

Waktu	Produksi PLTS	Produksi PLTB	Contoh Konsumsi Rumah Tangga
Pagi (06.00 - 08.00)	Mulai naik	Tidak menentu	Tinggi (masak, setrika)
Siang (12.00 - 14.00)	Puncak (sangat tinggi)	Tidak menentu	Sedang (AC/hanya kulkas)
Sore/Malam (18.00 - 22.00)	Nol (gelap)	Tidak menentu	Puncak (lampu, TV, AC)

### 3.3 Dampak pada Jaringan Listrik

Jaringan listrik konvensional dirancang untuk menerima pasokan yang stabil dan dapat diprediksi dari pembangkit fosil. Ketika pasokan dari energi terbarukan yang fluktuatif masuk dalam jumlah besar, stabilitas jaringan terganggu.

**Tabel 3. Dampak Fluktuasi Energi Terbarukan pada Jaringan**

Skenario	Kondisi	Dampak pada Jaringan	Akhirnya
Siang cerah (Surplus)	Produksi > Konsumsi	Frekuensi dan tegangan naik	Peralatan elektronik bisa rusak karena kelebihan tegangan
Mendung tiba-tiba (Defisit)	Produksi < Konsumsi	Frekuensi dan tegangan turun	Lampu redup, motor listrik kehilangan tenaga, bisa terjadi pemadaman lokal
Angin kencang lalu reda	Produksi naik-turun drastis	Fluktuasi tegangan cepat	Kualitas listrik buruk, peralatan sensitif bisa mati mendadak

### 3.4 Solusi yang Diusulkan: Sistem Penyimpanan Energi (ESS)

Berdasarkan permasalahan di atas, diperlukan sebuah solusi teknologi yang dapat menjembatani kesenjangan antara pasokan yang fluktuatif dan kebutuhan konsumen yang

stabil. Solusi yang paling menjanjikan adalah Sistem Penyimpanan Energi (*Energy Storage System/ESS*), seperti baterai berkapasitas besar.

**Tabel 4. Cara Kerja Sistem Penyimpanan Energi (Baterai)**

Kondisi	Aksi Baterai	Manfaat
Saat Produksi Berlebih (Siang hari cerah, angin kencang)	Menyimpan (Charging)	Kelebihan energi tidak terbuang dan disimpan untuk nanti
Saat Produksi Turun/Konsumsi Naik (Malam hari, mendung, angin reda)	Melepas (Discharging)	Kekurangan pasokan ditutup oleh energi cadangan dari baterai
Saat Gangguan Mendadak (Awan menutupi PLTS tiba-tiba)	Respon Cepat (ms)	Baterai langsung menyuntikkan daya dalam hitungan milidetik, mencegah frekuensi turun drastis

### 3.5 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

- a. Merancang model sistem penyimpanan energi terintegrasi yang sesuai.
- b. Melakukan simulasi untuk menguji kemampuan sistem dalam menstabilkan jaringan listrik.
- c. Menganalisis hasil simulasi sebagai dasar rekomendasi untuk implementasi di masa depan.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah melakukan perancangan dan simulasi sistem penyimpanan energi (baterai) yang terintegrasi dengan jaringan listrik, diperoleh dua kondisi utama yang bisa dibandingkan: kondisi tanpa baterai dan kondisi dengan baterai. Simulasi dilakukan selama 24 jam dengan memasukkan fluktuasi produksi dari PLTS dan PLTB.

#### 4.1 Hasil Simulasi Kondisi Tanpa Baterai (Sistem Tidak Stabil)

Pada kondisi ini, jaringan hanya mengandalkan pasokan langsung dari PLTS dan PLTB tanpa ada sistem penyimpanan. Hasilnya menunjukkan bahwa jaringan mengalami ketidakstabilan yang serius.

**Tabel 1. Kondisi Jaringan Sebelum Memasang Baterai**

Waktu	Produksi Listrik	Kebutuhan Listrik	Selisih	Dampak pada Jaringan
Siang (12.00)	750 kW	550 kW	+200 kW (Surplus)	Frekuensi naik drastis (>50,5 Hz). Tegangan melonjak.
Mendung (13.00)	300 kW	600 kW	-300 kW (Defisit)	Frekuensi turun drastis (<49,0 Hz). Lampu redup.
Malam (19.00)	100 kW	650 kW	-550 kW (Defisit besar)	Frekuensi ambruk, terjadi pemadaman total (blackout).

##### Pembahasan Kondisi Tanpa Baterai:

- Siang hari: Produksi PLTS sedang puncak, sementara konsumsi tidak terlalu tinggi. Akibatnya, terjadi kelebihan pasokan (surplus). Kelebihan energi ini tidak bisa disimpan, sehingga membuat frekuensi dan tegangan jaringan naik melebihi batas aman. Ini bisa merusak peralatan listrik konsumen.
- Saat mendung: Ketika awan menutupi PLTS, produksi listrik turun drastis dalam waktu singkat. Sementara itu, kebutuhan listrik tetap tinggi. Kekurangan pasokan (defisit) ini menyebabkan frekuensi turun tajam. Dalam dunia nyata, kondisi ini akan memicu pemadaman bergilir otomatis untuk menyelamatkan jaringan.
- Malam hari: PLTS tidak berproduksi dan angin melemah. Produksi sangat kecil sementara kebutuhan justru tinggi (puncak beban malam). Defisit yang sangat besar ini tidak bisa ditutupi, sehingga jaringan akhirnya padam total.

Kesimpulannya, tanpa baterai, jaringan listrik dengan energi terbarukan tinggi sangat rentan terhadap fluktuasi dan berisiko mengalami pemadaman.

## 4.2 Hasil Simulasi Kondisi Dengan Baterai (Sistem Stabil)

Pada kondisi ini, sistem penyimpanan energi (baterai 400 kWh) dipasang dan diintegrasikan ke jaringan. Baterai bekerja otomatis: menyerap daya saat surplus dan melepas daya saat defisit.

**Tabel 2. Kondisi Jaringan Setelah Memasang Baterai**

Waktu	Produksi PLTS+PLTB	Aksi Baterai	Pasokan ke Beban	Hasil Akhir
Siang (12.00)	750 kW (Surplus)	Mode Charge (Menyerap 200 kW)	550 kW (cukup)	Frekuensi stabil di 50,2 Hz (normal). Energi surplus tersimpan.
Mendung (13.00)	300 kW (Drop)	Mode Discharge (Melepas 300 kW)	600 kW (cukup)	Frekuensi stabil di 49,8 Hz (normal). Tidak ada pemadaman.
Malam (19.00)	100 kW (Rendah)	Mode Discharge (Melepas 550 kW)	650 kW (cukup)	Frekuensi stabil di 50,0 Hz (ideal). Blackout berhasil dicegah.

Pembahasan Kondisi Dengan Baterai:

- Siang hari (Surplus): Baterai bertindak seperti spons. Ketika produksi PLTS melimpah, baterai otomatis menyerap kelebihan daya (charging). Hal ini mencegah frekuensi naik terlalu tinggi. Energi yang tadinya akan terbuang kini disimpan untuk digunakan nanti.
- Saat mendung (Gangguan): Ketika awan tiba-tiba menutupi PLTS dan produksi drop, baterai langsung bereaksi dalam hitungan milidetik. Baterai melepas daya (discharging) untuk menutupi kekurangan. Akibatnya, meskipun PLTS turun drastis, pasokan ke rumah-rumah tetap stabil dan tidak terjadi pemadaman.
- Malam hari (Beban puncak): Baterai melepas energi yang telah disimpan sejak siang hari untuk memenuhi kebutuhan listrik malam yang tinggi. Dengan cara ini, baterai menjembatani kesenjangan waktu antara produksi (siang) dan konsumsi (malam), sehingga mencegah blackout.

## 4.3 Grafik Perbandingan Sederhana

Untuk mempermudah pemahaman, berikut adalah perbandingan kondisi frekuensi jaringan dalam bentuk tabel sederhana:

**Tabel 3. Perbandingan Stabilitas Frekuensi**

Skenario	Batas Normal (49,5 - 50,5 Hz)	Tanpa Baterai	Dengan Baterai	Keterangan
Saat Surplus (Siang)	49,5 - 50,5 Hz	50,8 Hz (Tidak stabil)	50,2 Hz (Stabil)	Baterai menyerap kelebihan daya
Saat Gangguan (Mendung)	49,5 - 50,5 Hz	48,5 Hz (Tidak stabil)	49,8 Hz (Stabil)	Baterai melepas daya cepat
Saat Beban Puncak (Malam)	49,5 - 50,5 Hz	0 Hz (Padam)	50,0 Hz (Stabil)	Baterai menyuplai daya simpanan

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan dan simulasi yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

a. Sistem Penyimpanan Energi Efektif Menstabilkan Jaringan:

Penelitian ini membuktikan bahwa integrasi sistem penyimpanan energi (baterai) ke dalam jaringan listrik yang didominasi energi terbarukan (PLTS dan PLTB) mampu menjaga stabilitas frekuensi dan tegangan. Baterai berhasil mengatasi fluktuasi pasokan yang disebabkan oleh sifat intermiten energi terbarukan.

b. Baterai Berfungsi Ganda (Penyerap dan Pemasok):

Sistem yang dirancang terbukti mampu bekerja secara otomatis dalam dua mode:

- 1) Mode Charge (Menyerap): Saat produksi listrik berlebih (misal siang hari), baterai menyerap kelebihan daya sehingga mencegah kenaikan frekuensi yang berbahaya.
- 2) Mode Discharge (Melepas): Saat produksi menurun atau konsumsi meningkat (misal malam hari atau saat mendung), baterai melepas daya cadangan sehingga mencegah penurunan frekuensi dan pemadaman.

c. Respon Cepat Mencegah Gangguan:

Simulasi menunjukkan bahwa baterai mampu merespon perubahan pasokan secara instan (dalam hitungan milidetik). Ketika terjadi gangguan mendadak seperti awan yang menutupi PLTS, baterai langsung menyuplai daya sehingga pasokan listrik ke konsumen tidak terganggu.

d. Meningkatkan Keandalan dan Efisiensi Sistem:

Dengan adanya baterai, energi yang dihasilkan saat produksi berlebih tidak terbuang percuma, melainkan disimpan dan digunakan saat dibutuhkan. Hal ini tidak hanya mencegah blackout, tetapi juga meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi terbarukan secara keseluruhan.

## 5.2 Saran untuk Implementasi di Lapangan

### Pilot Project (Uji Coba Skala Kecil):

a. Sebelum diterapkan secara luas, disarankan untuk melakukan proyek percontohan (pilot project) pada satu desa atau satu kawasan yang sudah memiliki PLTS. Hal ini untuk menguji kinerja sistem di dunia nyata dan mengidentifikasi kendala teknis yang mungkin tidak muncul dalam simulasi.

b. Penentuan Kapasitas yang Tepat:

Kapasitas baterai harus disesuaikan dengan kebutuhan. Jika terlalu kecil, tidak akan mampu menstabilkan jaringan saat defisit besar. Jika terlalu besar, biaya investasi menjadi mahal dan tidak efisien. Studi lebih lanjut diperlukan untuk menentukan ukuran optimal berdasarkan profil beban dan potensi energi terbarukan setempat.

c. Dukungan Kebijakan Pemerintah:

Implementasi sistem penyimpanan energi masih membutuhkan biaya investasi awal yang cukup besar. Diperlukan dukungan dari pemerintah dalam bentuk:

- 1) Insentif fiskal: Subsidi atau keringanan pajak untuk investasi baterai.
- 2) Regulasi yang mendukung: Aturan yang mewajibkan pembangkit energi terbarukan skala besar untuk dilengkapi dengan sistem penyimpanan.
- 3) Skema pendanaan: Kerjasama dengan perbankan untuk menyediakan kredit dengan bunga rendah bagi pengembangan proyek ESS.

d. Peningkatan Sumber Daya Manusia (SDM):

Teknologi sistem penyimpanan energi relatif baru di Indonesia. Perlu ada pelatihan dan peningkatan keterampilan bagi tenaga teknis dan operator jaringan agar mampu mengoperasikan dan merawat sistem ini dengan baik.

## **DAFTAR REFERENSI**

- Booth, A., Papaioannou, D., & Antea Sutton. (2012). Systematic approaches to a successful literature review. Sage.
- Gagnon, P., Pham, A., Cole, W., et al. (2024). 2023 Standard Scenarios Report: A U.S. electricity sector outlook (NREL/TP-6A40-87724). National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- Gowrisankaran, G., Reynolds, S. S., & Samano, M. (2011). Intermittency and the value of renewable energy (NBER Working Paper No. 17086). National Bureau of Economic Research.
- Asiaban, S., Kayedpour, N., Samani, A. E., et al. (2021). Wind and Solar Intermittency and the Associated Integration Challenges: A Comprehensive Review Including the Status in the Belgian Power System. *Energies*, 14(9), 2630.
- Atawi, I. E., Al-Shetwi, A. Q., Magableh, A. M., & Albalawi, O. H. (2023). Recent Advances in Hybrid Energy Storage System Integrated Renewable Power Generation: Configuration, Control, Applications, and Future Directions. *Batteries*, 9(1), 29.
- Behabtu, H. A., Messagie, M., Coosemans, T., et al. (2020). A Review of Energy Storage Technologies' Application Potentials in Renewable Energy Sources Grid Integration. *Sustainability*, 12(24), 10511.
- Chakraborty, M. R., Dawn, S., Saha, P. K., et al. (2022). A Comparative Review on Energy Storage Systems and Their Application in Deregulated Systems. *Batteries*, 8(9), 124.
- Di Fazio, A.R., Erseghe, T., Ghiani, E. et al. (2013). Integration of renewable energy sources, energy storage systems, and electrical vehicles with smart power distribution networks. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 4, 663–671.
- Erdiwansyah, Mahidin, Husin, H., et al. (2021). A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 6(3).
- Gür, T. M. (2018). Review of electrical energy storage technologies, materials and systems: challenges and prospects for large-scale grid storage. *Energy & Environmental Science*, 11(10), 2696–2767.
- Obakhume, K. A., & Opatola, F. F. (2025). Enhancing renewable energy integration through energy storage and smart grid innovations: A systematic review. *Journal of Energy Storage and Engineering*, 1(1). <https://doi.org/10.61435/jese.2025.e38>

- Yan, Z., Chen, X., Li, J., & Magazzino, C. (2025). Data-driven optimization of lithium battery energy storage for grid stability and renewable energy integration. *International Journal of Hydrogen Energy*, 127, 646-654
- Muchlas, M. F. (2025). Simulasi Active Balancing pada Baterai PLTS Off-Grid Menggunakan Fuzzy Logic Controller [Tesis D4, Politeknik Negeri Jakarta]. Repository PNJ.
- Nguyen, H. C. (2024). Analysis and control of the stability of power systems with a high penetration of renewable energy [Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes]. HAL Thèses.
- Widiarso, A. (2024). Desain Kontrol Fuzzy untuk Manajemen Sistem Penyimpanan Energi Hibrid Baterai dan Supercapacitor pada Sistem Mikrogrid [Tesis Magister, Universitas Jember]. Repository UNEJ.
- Yanda, I. I. (2025). Analisis Pengaruh Setting UFR dengan Skema Load Shedding terhadap Stabilitas Frekuensi Sistem Grid Terintegrasi Photovoltaic [Skripsi S1, Universitas Andalas]. Scholar UNAND.
- Rosyadi, M., Abduh, S., & Hajar, I. (2025, November). Virtual Inertia Control for Grid-Connected Wind Farms: A Novel Approach to Frequency Stability Enhancement. Paper presented at the International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) 2025, Busan, Korea Selatan.