



Perbandingan Teknologi Penyimpanan Energi dalam Optimalisasi Integrasi Energi Terbarukan

Comparison of Energy Storage Technologies for Optimizing Renewable Energy Integration

Natasha Vogt^{1*}, Zaskia Aleeka Indah Ramdani²

Universitas Pendidikan Indonesia

Email : natashavogt08@gmail.com^{1*}, ramdanizaskia010@gmail.com²

Article Info

Article history:

Received : 29-05-2026

Revised : 31-05-2026

Accepted : 02-06-2026

Published : 04-06-2026

Abstract

The increasing demand for sustainable energy systems has encouraged the widespread adoption of renewable energy sources such as solar and wind power. However, the intermittent nature of renewable energy presents significant challenges to grid stability and energy reliability. Energy storage systems have emerged as a crucial solution to address these challenges by storing excess energy and releasing it when required. This study aims to compare various energy storage technologies, including Pumped Hydro Energy Storage (PHES), Battery Energy Storage System (BESS), Compressed Air Energy Storage (CAES), Hydrogen Energy Storage, Flywheel Energy Storage, and Thermal Energy Storage. The research employed a literature review approach using scientific journals, academic publications, and previous studies related to renewable energy integration and energy storage technologies. The analysis focused on efficiency, storage capacity, operational lifespan, investment cost, and implementation potential. The results indicate that BESS offers high efficiency and rapid response, while PHES provides large storage capacity and long operational life. Hydrogen storage demonstrates strong potential for long-term energy storage despite economic challenges. The study concludes that no single technology can satisfy all energy storage requirements. Therefore, combining multiple storage technologies is considered the most effective strategy for supporting renewable energy integration and achieving sustainable energy development.

Keywords : Energy Storage, Renewable Energy, Sustainability

Abstrak

Peningkatan kebutuhan energi berkelanjutan mendorong pemanfaatan energi terbarukan seperti tenaga surya dan tenaga angin sebagai alternatif pengganti bahan bakar fosil. Namun, sifat energi terbarukan yang intermiten menyebabkan ketidakstabilan pasokan energi sehingga diperlukan sistem pendukung yang mampu menjaga keseimbangan antara produksi dan konsumsi energi listrik. Sistem penyimpanan energi menjadi salah satu solusi utama dalam mendukung integrasi energi terbarukan ke dalam jaringan listrik. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan berbagai teknologi penyimpanan energi yang meliputi Pumped Hydro Energy Storage (PHES), Battery Energy Storage System (BESS), Compressed Air Energy Storage (CAES), Hydrogen Energy Storage, Flywheel Energy Storage, dan Thermal Energy Storage. Metode penelitian yang digunakan adalah studi literatur dengan mengkaji berbagai jurnal ilmiah dan publikasi akademik yang relevan. Analisis dilakukan berdasarkan efisiensi energi, kapasitas penyimpanan, umur pakai, biaya investasi, dan potensi penerapan teknologi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa BESS memiliki efisiensi tinggi dan respons yang cepat, sedangkan PHES unggul dalam kapasitas penyimpanan dan umur operasional. Hydrogen Energy Storage memiliki potensi besar untuk penyimpanan energi jangka panjang meskipun masih menghadapi tantangan biaya dan efisiensi. Penelitian ini menyimpulkan bahwa kombinasi beberapa teknologi penyimpanan energi merupakan strategi yang paling efektif dalam mendukung integrasi energi terbarukan dan mewujudkan sistem energi berkelanjutan.



Kata Kunci: Energi Terbarukan, Keberlanjutan, Penyimpanan Energi

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi dan meningkatnya kebutuhan energi global mendorong berbagai negara untuk melakukan transisi dari penggunaan energi fosil menuju energi terbarukan. Sumber energi terbarukan seperti tenaga surya, tenaga angin, tenaga air, biomassa, dan panas bumi dipandang sebagai solusi yang mampu mengurangi emisi gas rumah kaca serta mendukung pembangunan berkelanjutan. Selain memberikan dampak lingkungan yang lebih baik, energi terbarukan juga berperan dalam meningkatkan ketahanan energi suatu negara melalui diversifikasi sumber energi.

Meskipun demikian, pemanfaatan energi terbarukan masih menghadapi berbagai tantangan. Salah satu permasalahan utama adalah sifat intermiten dari sumber energi tersebut. Produksi listrik dari pembangkit tenaga surya sangat bergantung pada intensitas cahaya matahari, sedangkan pembangkit tenaga angin dipengaruhi oleh kecepatan angin yang berubah-ubah. Kondisi ini menyebabkan ketidaksesuaian antara waktu produksi energi dan kebutuhan beban listrik sehingga berpotensi mengganggu stabilitas sistem tenaga listrik.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan teknologi yang mampu menyimpan energi saat produksi berlebih dan melepaskannya kembali ketika kebutuhan energi meningkat. Sistem penyimpanan energi (Energy Storage System) menjadi komponen penting dalam mendukung integrasi energi terbarukan karena mampu meningkatkan fleksibilitas operasi jaringan listrik, menjaga kestabilan frekuensi, serta meningkatkan keandalan sistem tenaga.

Berbagai teknologi penyimpanan energi telah dikembangkan, di antaranya Pumped Hydro Energy Storage (PHES), Battery Energy Storage System (BESS), Compressed Air Energy Storage (CAES), Hydrogen Energy Storage, Flywheel Energy Storage, dan Thermal Energy Storage. Masing-masing teknologi memiliki karakteristik, keunggulan, dan keterbatasan yang berbeda dari segi efisiensi energi, kapasitas penyimpanan, biaya investasi, dan umur operasional.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa tidak terdapat satu teknologi penyimpanan energi yang mampu memenuhi seluruh kebutuhan sistem energi secara optimal. Oleh karena itu, diperlukan kajian komprehensif untuk membandingkan berbagai teknologi penyimpanan energi sehingga dapat diketahui teknologi yang paling sesuai dalam mendukung integrasi energi terbarukan. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan performa berbagai teknologi penyimpanan energi berdasarkan efisiensi, kapasitas, biaya, serta potensinya dalam mendukung keberlanjutan energi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur dengan pendekatan deskriptif-komparatif. Data penelitian diperoleh dari berbagai jurnal internasional, artikel ilmiah, buku akademik, dan publikasi penelitian yang membahas teknologi penyimpanan energi dan integrasi energi terbarukan. Objek penelitian meliputi enam teknologi penyimpanan energi yang umum digunakan dalam sistem energi modern, yaitu Pumped Hydro Energy Storage (PHES), Battery Energy Storage System (BESS), Compressed Air Energy Storage (CAES), Hydrogen Energy Storage, Flywheel Energy Storage, dan Thermal Energy Storage.



Tahapan penelitian dimulai dengan pengumpulan literatur yang relevan, seleksi sumber berdasarkan kualitas dan kesesuaian topik, identifikasi informasi penting, serta pengelompokan data berdasarkan jenis teknologi penyimpanan energi. Selanjutnya dilakukan analisis komparatif terhadap parameter efisiensi energi, kapasitas penyimpanan, biaya investasi, umur pakai, dan potensi integrasi dengan energi terbarukan. Hasil analisis kemudian disusun secara sistematis untuk memperoleh gambaran mengenai teknologi penyimpanan energi yang paling potensial dalam mendukung sistem energi berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Teknologi Penyimpanan Energi

Pumped Hydro Energy Storage (PHES)

PHES merupakan teknologi penyimpanan energi mekanik yang bekerja dengan memanfaatkan dua reservoir pada ketinggian berbeda. Ketika terjadi surplus energi, air dipompa ke reservoir atas dan dialirkan kembali melalui turbin saat energi dibutuhkan. Teknologi ini memiliki kapasitas penyimpanan yang sangat besar dan umur operasi yang panjang sehingga banyak digunakan pada sistem tenaga listrik skala besar.

Battery Energy Storage System (BESS)

BESS menyimpan energi dalam bentuk reaksi elektrokimia pada baterai. Teknologi ini memiliki efisiensi tinggi, respons cepat, dan fleksibilitas implementasi yang baik. Baterai lithium-ion menjadi teknologi yang paling banyak digunakan karena memiliki densitas energi yang tinggi dan dapat diterapkan pada berbagai skala sistem.

Compressed Air Energy Storage (CAES)

CAES bekerja dengan menyimpan udara bertekanan tinggi di dalam ruang penyimpanan khusus. Udara tersebut digunakan untuk menggerakkan turbin ketika energi diperlukan. Teknologi ini memiliki kapasitas penyimpanan yang besar dan biaya penyimpanan yang relatif rendah, namun efisiensinya masih berada di bawah teknologi baterai.

Hydrogen Energy Storage

Teknologi ini menyimpan energi dalam bentuk hidrogen yang dihasilkan melalui proses elektrolisis. Hidrogen dapat digunakan kembali melalui fuel cell untuk menghasilkan listrik. Keunggulan utama teknologi ini adalah kemampuannya dalam penyimpanan energi jangka panjang.

Flywheel Energy Storage

Flywheel menyimpan energi dalam bentuk energi kinetik rotasi. Teknologi ini memiliki waktu respons yang sangat cepat dan umur siklus yang panjang sehingga cocok digunakan untuk stabilisasi frekuensi jaringan listrik.

Thermal Energy Storage



Thermal Energy Storage menyimpan energi dalam bentuk panas atau dingin untuk digunakan kembali pada waktu tertentu. Teknologi ini banyak diterapkan pada pembangkit listrik tenaga surya termal dan sistem pendinginan bangunan.

Tabel 1. Perbandingan Teknologi Penyimpanan Energi

No	Teknologi	Efisiensi	Kapasitas	Umur Pakai	Biaya Investasi
1	PHES	Tinggi	Sangat Besar	Sangat Panjang	Tinggi
2	BESS	Sangat Tinggi	Sedang	Menengah	Tinggi
3	CAES	Sedang	Besar	Panjang	Sedang
4	Hydrogen	Rendah-Sedang	Sangat Besar	Panjang	Tinggi
5	Flywheel	Tinggi	Rendah	Sangat Panjang	Sedang
6	Thermal	Sedang	Besar	Panjang	Sedang

Berdasarkan hasil perbandingan, BESS memiliki keunggulan dalam efisiensi energi dan kecepatan respons sehingga sangat cocok digunakan untuk stabilisasi jaringan listrik. PHES unggul dalam kapasitas penyimpanan dan umur operasional sehingga sesuai untuk penyimpanan energi skala besar. Hydrogen Energy Storage memiliki prospek yang menjanjikan sebagai media penyimpanan energi jangka panjang, terutama dalam mendukung sistem energi rendah karbon.

Potensi Integrasi dengan Energi Terbarukan

Integrasi teknologi penyimpanan energi dengan pembangkit energi terbarukan mampu meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik dan mengurangi ketergantungan terhadap pembangkit berbahan bakar fosil. Pada sistem tenaga surya dan tenaga angin, penyimpanan energi memungkinkan kelebihan energi disimpan saat produksi tinggi dan digunakan kembali ketika produksi menurun.

Dalam pengembangan smart grid dan microgrid, teknologi penyimpanan energi berperan penting dalam menjaga kontinuitas pasokan listrik dan meningkatkan efisiensi distribusi energi. Berdasarkan hasil kajian, kombinasi antara BESS untuk respons cepat, PHES untuk kapasitas besar, dan Hydrogen Energy Storage untuk penyimpanan jangka panjang menjadi solusi yang paling menjanjikan dalam mendukung sistem energi masa depan.

KESIMPULAN

Teknologi penyimpanan energi memiliki peran penting dalam mendukung integrasi energi terbarukan dan meningkatkan kestabilan sistem tenaga listrik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa setiap teknologi memiliki karakteristik dan keunggulan yang berbeda. Battery Energy Storage System (BESS) unggul dalam efisiensi energi dan respons cepat, sedangkan Pumped Hydro Energy Storage (PHES) memiliki kapasitas penyimpanan besar dan umur operasi yang panjang. Hydrogen Energy Storage menunjukkan potensi besar sebagai solusi penyimpanan energi jangka panjang meskipun masih menghadapi tantangan biaya dan efisiensi.

Berdasarkan hasil analisis, tidak terdapat satu teknologi yang sepenuhnya unggul untuk seluruh kebutuhan sistem energi. Oleh karena itu, kombinasi beberapa teknologi penyimpanan energi merupakan strategi yang paling efektif untuk mendukung optimalisasi integrasi energi terbarukan dan mewujudkan sistem energi berkelanjutan di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA



- Aneke, M., & Wang, M. (2016). *Energy storage technologies and real-life applications*. *Applied Energy*.
- Budt, M., et al. (2016). *A review on compressed air energy storage*. *Applied Energy*.
- Chen, H., et al. (2009). *Progress in electrical energy storage system*. *Progress in Natural Science*.
- Díaz-González, F., et al. (2012). *A review of energy storage technologies for wind power*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Dunn, B., Kamath, H., & Tarascon, J. (2011). *Electrical energy storage for the grid*. *Science*.
- Elkhatat, A., et al. (2023). *Integrating renewable energy with thermal energy storage*. *Energies*.
- Ibrahim, H., Ilinca, A., & Perron, J. (2008). *Energy storage systems—Characteristics and comparisons*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Jenkins, J., et al. (2018). *The role of energy storage in deep decarbonization*. *Energy & Environmental Science*.
- Koohi-Fayegh, S., & Rosen, M. (2020). *A review of energy storage types and applications*. *Journal of Energy Storage*.
- Luo, X., et al. (2015). *Overview of current development in electrical energy storage technologies*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Olabi, A. (2017). *Flywheel energy storage systems*. *Energy*.
- Parra, D., et al. (2017). *Energy storage for the electricity grid*. *Nature Energy*.
- Rehman, S., et al. (2015). *Hydrogen energy storage for renewable integration*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Sabihuddin, S., Kiprakis, A., & Mueller, M. (2015). *A numerical and graphical review of energy storage technologies*. *Energies*.
- Safaei, H., et al. (2019). *Grid-scale energy storage technologies*. *Renewable Energy*.
- Scafuri, M. (2024). *Thermal Energy Storage Integration in Electrical Grids*. *Sapienza University Review*. https://iris.uniroma1.it/handle/11573/1732050?utm_source
- Schmidt, O., et al. (2019). *Projected costs of future energy storage*. *Joule*.
- Yang, C., & Jackson, R. (2011). *Opportunities and barriers to pumped-hydro energy storage*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Zakeri, B., & Syri, S. (2015). *Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Zhao, H., et al. (2015). *Review of energy storage system for microgrid*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.