

ANALISIS KOMPARATIF IMPLEMENTASI *ENERGY STORAGE SYSTEM* BATERAI *LITHIUM-ION (LI-ION)* DAN *PUMPED HYDRO ENERGY STORAGE (PHES)*

Tateng Sukendar, Erwin Wijayanto

Universitas Dirgantara Marsekal Suryadarma, Teknik Elektro

Email korespondensi: tatengsukendar@gmail.com

Abstrak

Seiring meningkatnya kebutuhan akan energi bersih dan berkelanjutan, teknologi penyimpanan energi (*Energy Storage System/ESS*) menjadi elemen penting dalam mendukung stabilitas dan efisiensi sistem tenaga listrik, khususnya pada integrasi sumber energi terbarukan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara komparatif berbagai teknologi penyimpanan energi, seperti baterai lithium-ion, baterai aliran (*flow battery*), superkapasitor, dan sistem penyimpanan energi mekanik (*pumped hydro* dan *flywheel*), dari segi efisiensi, kapasitas, biaya, keandalan, dan potensi penerapannya. Metodologi penelitian mencakup studi literatur, analisis teknis dan ekonomi, serta evaluasi terhadap kasus implementasi di beberapa negara. Hasil analisis menunjukkan bahwa tidak ada satu teknologi yang unggul secara mutlak, melainkan pemilihan teknologi penyimpanan harus disesuaikan dengan kebutuhan sistem, karakteristik sumber energi, dan kondisi geografis serta ekonomi. Studi ini juga membahas potensi penerapan di Indonesia serta tantangan yang dihadapi, seperti regulasi, infrastruktur, dan biaya investasi. Rekomendasi kebijakan dan strategi implementasi disajikan sebagai bagian dari upaya mendorong adopsi teknologi penyimpanan energi dalam transisi menuju sistem energi yang berkelanjutan.

Kata kunci: teknologi penyimpanan energi, baterai, superkapasitor, efisiensi, energi terbarukan, Indonesia.

Abstract

As the demand for clean and sustainable energy continues to rise, energy storage systems (ESS) have become a crucial element in supporting the stability and efficiency of power systems, particularly in the integration of renewable energy sources. This study aims to conduct a comparative analysis of various energy storage technologies, including lithium-ion batteries, flow batteries, supercapacitors, and mechanical energy storage systems (pumped hydro and flywheels), in terms of efficiency, capacity, cost, reliability, and application potential. The research methodology involves literature review, technical and economic analysis, as well as evaluation of implementation cases in several countries. The results of the analysis indicate that no single technology is universally superior; instead, the selection of storage technology should be tailored to system requirements, energy source characteristics, and geographical and economic conditions. This study also discusses the potential implementation in Indonesia and the challenges faced, such as regulations, infrastructure, and investment costs. Policy recommendations and implementation strategies are presented as part of efforts to promote the adoption of energy storage technologies in the transition toward a sustainable energy system.

Keywords: energy storage technology, batteries, supercapacitors, efficiency, renewable energy, Indonesia.

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi energi terbarukan dalam beberapa dekade terakhir telah mendorong kebutuhan akan sistem penyimpanan energi yang andal, efisien, dan ekonomis. Teknologi penyimpanan energi (*Energy Storage Technologies/EST*) memainkan peran sentral dalam menstabilkan pasokan energi, mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil, serta meningkatkan fleksibilitas dan keandalan

sistem tenaga listrik, terutama dalam konteks penetrasi tinggi dari sumber energi terbarukan seperti tenaga surya dan angin yang bersifat intermiten.

Berbagai jenis teknologi penyimpanan energi telah dikembangkan dan diimplementasikan, mulai dari sistem penyimpanan elektro-kimia seperti baterai lithium-ion dan sodium-sulfur, penyimpanan mekanik seperti pumped hydro storage dan flywheel, hingga penyimpanan termal. Masing-masing teknologi memiliki karakteristik unik dalam hal kapasitas, efisiensi, umur pakai, biaya, dan aplikasi spesifik dalam sistem energi.

Namun, pemilihan dan penerapan teknologi penyimpanan energi tidak dapat dilakukan secara seragam, karena sangat bergantung pada faktor geografis, kebutuhan beban, kebijakan energi, serta aspek ekonomi dan teknis yang berlaku di suatu wilayah atau negara. Oleh karena itu, diperlukan analisis komparatif antar berbagai teknologi penyimpanan untuk memahami keunggulan dan keterbatasannya masing-masing.

Studi ini bertujuan untuk menganalisis secara komparatif berbagai teknologi penyimpanan energi serta mengkaji studi kasus implementasi di beberapa wilayah atau proyek nyata. Dengan pendekatan ini, diharapkan dapat diperoleh wawasan mendalam mengenai kriteria pemilihan teknologi yang sesuai, tantangan implementasi di lapangan, serta strategi pengembangan sistem penyimpanan energi yang mendukung transisi menuju sistem energi yang lebih bersih, fleksibel, dan berkelanjutan

2. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif dan komparatif dengan metode kualitatif dan kuantitatif untuk menganalisis karakteristik dan implementasi dua jenis sistem penyimpanan energi, yaitu baterai lithium-ion (Li-ion) dan *Pumped Hydro Energy Storage* (PHES). Tahapan-tahapan dalam metode penelitian ini meliputi:

1. Studi Literatur

Dilakukan pengumpulan data sekunder dari berbagai sumber akademik, seperti jurnal ilmiah, buku, laporan institusi energi (IEA, IRENA), serta dokumen kebijakan energi nasional dan internasional. Studi literatur bertujuan untuk memahami prinsip kerja dan spesifikasi teknis dari masing-masing teknologi. Mengidentifikasi parameter pembandingan antara efisiensi energi, kapasitas penyimpanan, umur pakai, biaya investasi dan operasi, keandalan sistem, serta dampak lingkungan.

2. Analisis Teknis

Analisis ini dilakukan untuk menilai performa masing-masing sistem berdasarkan parameter teknis yang diperoleh dari studi literatur dan data lapangan, meliputi: Efisiensi energi (*round-trip efficiency*), Densitas energi dan daya, dan Skalabilitas dan fleksibilitas operasional. Waktu respons dan kecepatan pengisian/pelepasan energi.

3. Studi Kasus Implementasi

Dianalisis beberapa studi kasus penerapan nyata teknologi Li-ion dan PHES di negara maju dan berkembang, termasuk potensi penerapannya di Indonesia. Studi kasus mencakup Lokasi proyek dan karakteristik sistem energy, Tujuan implementasi (misal: *peak shaving*, integrasi energi surya/angin), dan hasil dan manfaat yang diperoleh.

4. Sintesis dan Perbandingan

Hasil analisis teknis, ekonomi, dan implementasi dirangkum dan dibandingkan untuk menilai kesesuaian teknologi berdasarkan kebutuhan sistem energi nasional dan memberikan rekomendasi pemilihan teknologi sesuai konteks geografis, teknis, dan kebijakan.

3. Hasil dan Pembahasan

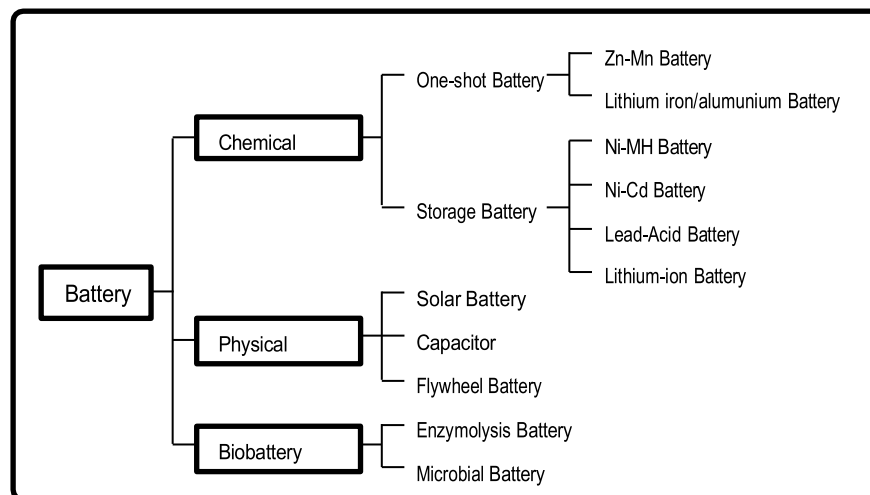
Seiring meningkatnya integrasi sumber energi terbarukan ke dalam sistem tenaga listrik global, kebutuhan akan teknologi penyimpanan energi yang andal dan efisien menjadi semakin penting. Teknologi penyimpanan tidak hanya berfungsi untuk menjembatani kesenjangan antara produksi dan konsumsi energi, tetapi juga berperan dalam meningkatkan stabilitas jaringan, meredam fluktuasi daya, dan memperkuat ketahanan sistem tenaga terhadap gangguan.

Dari berbagai teknologi yang tersedia, baterai *lithium-ion* dan *pumped hydro energy storage* (PHES) adalah media yang paling menonjol sebagai dua solusi penyimpanan energi yang paling banyak diadopsi secara global. Keduanya memiliki karakteristik teknis, ekonomi, dan lingkungan yang sangat berbeda, sehingga relevan untuk dianalisis secara komparatif guna memahami keunggulan relatif masing-masing dan menentukan aplikasinya yang paling sesuai dalam konteks tertentu.

Analisis ini akan membandingkan kedua teknologi tersebut berdasarkan lima aspek utama, yaitu: (1) prinsip kerja, (2) efisiensi energi, serta (3) dampak lingkungan. Dengan pendekatan ini, diharapkan dapat diperoleh pemahaman menyeluruh mengenai kriteria pemilihan teknologi penyimpanan energi yang tepat, sesuai dengan kebutuhan teknis dan kondisi lokal.

a. Baterai *Lithium-Ion* (Li-ion)

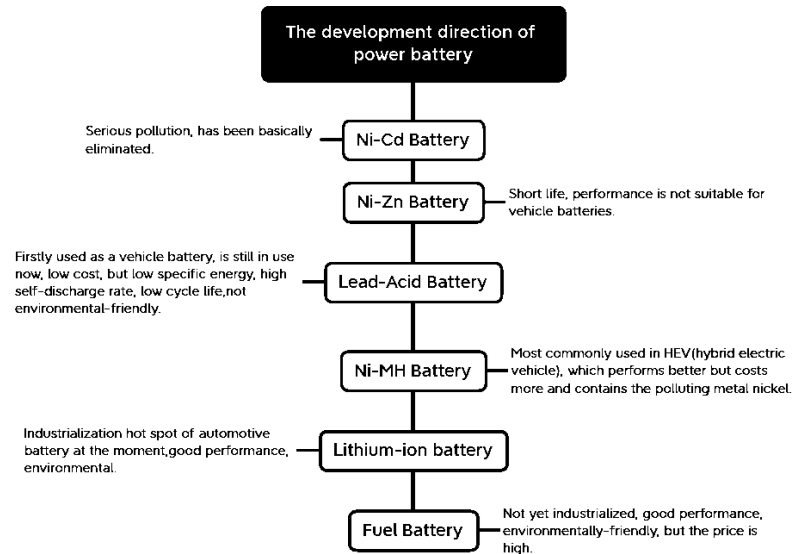
Baterai adalah perangkat yang mengubah energi kimia menjadi energi listrik, menyediakan energi listrik langsung ke luar melalui reaksi kimia di dalam baterai. Baterai secara garis besar dibagi menjadi tiga jenis: baterai kimia, baterai fisik, dan baterai biologis. Berikut adalah peta konsep klasifikasi baterai.



Gambar 1. Peta Konsep Klasifikasi Baterai

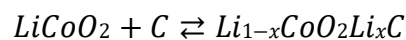
Baterai *lithium-ion* (Li-Ion) merupakan salah satu jenis baterai yang paling banyak digunakan saat ini, terutama pada perangkat elektronik portabel, kendaraan listrik, dan sistem penyimpanan energi skala besar. Keunggulannya terletak pada kepadatan energi yang tinggi, umur siklus yang panjang, serta kemampuan pengisian cepat. Sejak diperkenalkan secara komersial oleh Sony pada tahun 1991, baterai ini terus mengalami peningkatan teknologi baik dari segi material maupun sistem manajemen energi. Baterai Li-Ion terdiri atas empat komponen utama yaitu Anoda (biasanya grafit), Katoda (bervariasi, seperti LiCoO_2 , LiFePO_4 , LiNiMnCoO_2), Elektrolit (biasanya cairan berbasis litium garam dalam pelarut organik), Separator (memisahkan anoda dan katoda agar tidak terjadi hubung singkat).

Prinsip kerja baterai Li-Ion didasarkan pada perpindahan ion litium dari anoda ke katoda saat *discharge* (pengosongan) dan dari katoda ke anoda saat *charging* (pengisian). Reaksi kimia berlangsung secara *reversibel*, memungkinkan proses *charge–discharge* berulang. Baterai *lithium-ion* menyimpan dan melepaskan energi melalui reaksi elektro-kimia. Ion litium berpindah antara elektroda positif (katoda) dan elektroda negatif (anoda) selama proses pengisian dan pengosongan. Energi listrik diubah menjadi energi kimia saat pengisian, dan sebaliknya saat digunakan.



Gambar 2. Perkembangan Baterai Listrik

Baterai Li-ion bekerja berdasarkan proses reversibel dari perpindahan ion litium antara elektroda positif (katoda) dan elektroda negatif (anoda) selama siklus pengisian dan pengosongan: Saat pengisian Ion litium berpindah dari katoda ke anoda melalui elektrolit dan disimpan dalam struktur karbon (biasanya grafit) pada anoda. Saat pemakaian (*discharge*) Ion kembali ke katoda, melepaskan elektron yang mengalir melalui sirkuit eksternal menghasilkan arus listrik. Reaksi tersebut dapat kita gambarkan sebagai berikut:



Tabel 1. Kapasitas Baterai

Bahan Elektroda Positif	LiCoO ₂	Li(NiCoMn)O ₂	2O ₄	LiFePO ₄
Struktur kristal	Stratiform	Stratiform	Spinel	Olivin
Kapasitas spesifik teoritis/mAh·g ⁻¹	274	278	148	170
Kapasitas spesifik aktual/mAh·g ⁻¹	140 - 155	130 - 220	90 - 120	130 - 150
Kisaran tegangan operasi/V	3.0 - 4.3	3.0 - 4.35	3.5 - 4.3	2.5 - 3.8
Tegangan platform/V	3.6 - 3.7	3.6 - 3.7	3.7 - 3.8	3.2 - 3.3
Properti pemrosesan material	baik	Tertinggi	Medium	Buruk
Siklus hidup/waktu	> 500	> 500	> 500	> 2000
Kinerja keselamatan	Buruk	Lebih baik	baik	Sangat baik
Harga	High	Tertinggi	Rendah	Medium
Toksistas/Konservasi Lingkungan	Umum	Umum	Buruk	Baik
Toksistas/Konservasi Lingkungan	Kobalt Beracun	Kobalt Beracun	Tak Beracun	Tak Beracun

Kapasitas baterai merupakan salah satu parameter fundamental yang menentukan performa dan kelayakan suatu sistem penyimpanan energi elektro-kimia. Dalam konteks teknologi penyimpanan energi, kapasitas menggambarkan kemampuan baterai untuk menyimpan muatan listrik dan menyuplai energi dalam jangka waktu tertentu pada kondisi beban tertentu. Nilai kapasitas yang memadai sangat krusial, khususnya pada sistem yang mengandalkan pasokan energi berkelanjutan seperti kendaraan listrik, sistem energi terbarukan (*solar PV*, *wind turbine*), dan perangkat elektronik portabel.

Secara umum, kapasitas baterai dinyatakan dalam satuan ampere-jam (Ah) atau miliampere-jam (mAh), yang menunjukkan jumlah arus listrik yang dapat diberikan oleh baterai selama satu jam. Namun, kapasitas teoritis yang ditetapkan oleh produsen sering kali tidak sepenuhnya tercapai dalam aplikasi nyata karena dipengaruhi oleh berbagai faktor

operasional, seperti suhu, laju pengosongan (*discharge rate*), umur baterai, dan karakteristik bahan aktif elektroda serta elektrolit.

Pemahaman yang komprehensif mengenai kapasitas baterai tidak hanya diperlukan untuk analisis kinerja energi, tetapi juga penting dalam proses perancangan sistem manajemen baterai (*Battery Management System/BMS*), estimasi masa pakai, serta perencanaan kebutuhan daya pada aplikasi yang menggunakan baterai sebagai sumber energi utama. Selain itu, fenomena seperti efek Peukert pada baterai timbal-asam dan perubahan kapasitas seiring waktu pada baterai lithium-ion turut menjadi aspek penting dalam kajian kapasitas aktual.

Kapasitas baterai adalah ukuran jumlah muatan listrik yang dapat disimpan dan dilepaskan oleh baterai selama proses pengosongan (*discharge*). Kapasitas baterai menyatakan berapa banyak arus listrik (dalam ampere) yang dapat disuplai selama periode waktu tertentu (dalam jam) sebelum baterai habis. Satuan umum untuk kapasitas adalah:

- mAh (*milliampere-hour*) untuk baterai kecil seperti pada smartphone.
- Ah (*ampere-hour*) untuk baterai besar seperti baterai kendaraan listrik atau UPS.

Rumus dasar dari kapasitas baterai berdasar pada rumus energinya adalah

$$\text{Energi (Wh)} = V \times C \text{ dengan nilai } C \text{ didapat dari } C = I \times t$$

Jika menggunakan satuan mAh: $C = I \times t \times 1000$

Dimana: C = Kapasitas baterai (Ah); I = Arus (A); t = Waktu (jam)

Contoh:

Sebuah baterai 3 Volt memiliki kapasitas 2000 mAh. Jika digunakan pada perangkat yang mengkonsumsi 500 mA, berapa energi total yang tersimpan dan berapa lama baterai bisa bertahan?

Penyelesaian

$$\text{Energi (Wh)} = V \times C = 3 \times 2000 \text{ mAh} = 3 \times 2 \text{ Ah} = 6 \text{ Wh}$$

untuk menghitung durasi waktu dapat kita gunakan $C = I \times t$ maka $t = \frac{C}{I} = \frac{2000 \text{ mAh}}{500 \text{ mA}} = 4 \text{ jam}$

Energi yang diberikan oleh satuan massa atau satuan volume baterai disebut energi spesifik massa atau energi spesifik volume, yang juga dikenal sebagai kerapatan energi. Biasanya dinyatakan dalam bentuk kerapatan energi volume (Wh/L) atau kerapatan energi massa (Wh/kg). Jika baterai litium berbobot 143 g, tegangan pengenalnya adalah 3.2 V, kapasitasnya 6500 mAh, maka kerapatan energinya adalah

$$\text{Energi (Wh/L)} = \frac{\text{Energi (Wh)}}{m} = \frac{V \times C}{m} = \frac{3.2 \times 6500}{143} = 145 \text{ Wh/kg}$$

Efisiensi energi dalam baterai lithium-ion (Li-ion) dapat dilihat dari berbagai aspek yang mencakup konversi energi, laju pengisian dan pengosongan, serta seberapa efektif energi yang tersimpan digunakan dan dipulihkan. Berikut penjelasan rinci mengenai efisiensi energi baterai Li-ion:

1) Efisiensi Coulombic (*Coulombic Efficiency, CE*)

Definisi: Rasio antara jumlah muatan listrik (elektron) yang keluar saat baterai digunakan (*discharge*) dengan jumlah yang masuk saat pengisian (*charge*).

$$CE = \frac{Q_d}{Q_c} \times 100\%$$

Dimana: CE = Coulombic Efficiency; Q_d = Muatan discharge; Q_c = Muatan charge

Formula tersebut menunjukkan seberapa stabil dan reversibel reaksi elektrokimia dalam sel baterai. CE yang tinggi berarti reaksi samping (seperti dekomposisi elektrolit atau pembentukan lapisan SEI) sangat kecil. Nilai tipikal: >99.5% pada sistem Li-ion modern

2) Efisiensi Energi (Energy Efficiency, η_e)

Definisi: Rasio antara energi listrik yang diperoleh kembali saat discharge dibandingkan dengan energi yang diinput saat charging.

$$\eta_e = \frac{E_d}{E_c} \times 100\%$$

Dimana: CE = Coulombic Efficiency; Qd = Muatan discharge; Qc = Muatan charge

Efisiensi energi baterai dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu:

- Suhu Operasi: Suhu rendah menurunkan kapasitas efektif.
- Laju Pengosongan (*Discharge Rate*): Semakin tinggi arus keluar, semakin rendah kapasitas efektif (efek Peukert). Untuk baterai timbal-asam dan beberapa jenis lainnya, kapasitas aktual menurun saat arus pengosongan meningkat. Ini dinyatakan dalam rumus:

$$t = \frac{C}{I^k}$$

Dimana: t = waktu pengosongan (jam); C = Kapasitas (Ah); I = Arus pengosongan (A); k = Konstanta Peukert (>1)

- Umur dan Siklus Pakai: Kapasitas menurun seiring jumlah siklus pengisian dan pengosongan.
- Kualitas dan Jenis Kimia Baterai: Misalnya Li-Ion, NiMH, Pb-Acid memiliki karakteristik berbeda.

Tabel 2. Karakteristik Baterai

Karakteristik	Li-Ion	NiMH	NiCd	Lead-Acid
Tegangan nominal (per sel)	3,6 – 3,7 V	1,2 V	1,2 V	2 V
Kepadatan energi (Wh/kg)	150 – 250	60 – 120	45 – 80	30 – 50
Efisiensi energi (%)	> 90%	66 – 70%	70 – 75%	70 – 85%
Umur siklus (siklus penuh)	1000 – 5000	500 – 1000	500 – 1000	300 – 500
<i>Self-discharge</i> per bulan	2 – 5%	20 – 30%	10 – 20%	5 – 15%
Efek memori	Tidak	Sedikit	Ada	Tidak
Biaya per kWh	Sedang–Tinggi	Tinggi	Tinggi	Rendah
Perawatan	Rendah	Sedang	Sedang	Tinggi
Ramah lingkungan	Sedang	Baik	Buruk (kadmium)	Buruk (asam/timbal)

Berdasarkan karakteristik teknisnya, baterai lithium-ion menawarkan keseimbangan ideal antara kepadatan energi, efisiensi, dan umur pakai. Dengan kemampuan untuk diintegrasikan dalam sistem smart energy dan didukung oleh teknologi manajemen baterai, baterai ini menjadi tulang punggung bagi masa depan kendaraan listrik dan penyimpanan energi terbarukan. Meski biayanya masih relatif tinggi, efisiensi dan fleksibilitas baterai Li-Ion menjadikannya solusi utama dalam transisi menuju sistem energi yang bersih dan berkelanjutan. Analisis Karakteristik Kunci:

- Baterai Li-Ion memiliki kepadatan energi dua hingga lima kali lebih besar dibandingkan baterai timbal-asam, sehingga dapat menyimpan energi lebih banyak dalam ukuran yang lebih kecil dan ringan. Hal ini sangat penting dalam desain kendaraan listrik dan perangkat portabel.

- Efisiensi konversi energi yang tinggi (>90%) membuat baterai Li-Ion lebih hemat energi dan minim kehilangan daya saat pengisian dan pemakaian.
- Umur pakai yang panjang memungkinkan baterai ini digunakan dalam aplikasi jangka panjang, seperti sistem penyimpanan energi rumah tangga dan jaringan listrik (grid), dengan penggantian yang lebih jarang.
- Baterai Li-Ion hanya kehilangan sebagian kecil kapasitasnya selama tidak digunakan, membuatnya ideal untuk aplikasi dengan waktu siaga panjang.
- Tidak seperti baterai NiCd atau NiMH, baterai Li-Ion tidak mengalami penurunan kapasitas saat diisi ulang sebelum benar-benar habis (efek memori), sehingga penggunaannya lebih fleksibel.
- Perlu Sistem Proteksi, Karena sensitif terhadap *overcharge*, *overdischarge*, dan suhu tinggi, baterai Li-Ion memerlukan sistem manajemen baterai (BMS) untuk menjaga kestabilan operasional dan keamanannya.

Baterai Li-ion membutuhkan bahan-bahan tambang utama seperti litium, kobalt, dan nikel. Proses ekstraksi litium dari tambang garam (seperti di kawasan "*Lithium Triangle*" Amerika Selatan) memerlukan air dalam jumlah besar, berpotensi mengganggu ekosistem lokal dan menyebabkan konflik sosial atas sumber daya air. Kobalt, yang sebagian besar ditambang di Republik Demokratik Kongo, juga menimbulkan persoalan serius, tidak hanya terkait kerusakan lingkungan akibat limbah tambang, tetapi juga masalah sosial berupa eksploitasi pekerja anak dan praktik pertambangan informal yang tidak aman. Di sisi lain, penambangan nikel dapat menghasilkan emisi logam berat yang mencemari tanah dan air.

Proses produksi baterai lithium-ion sangat intensif energi, khususnya dalam tahap pemurnian bahan baku dan pembuatan sel. Studi menunjukkan bahwa produksi 1 kWh kapasitas baterai dapat menghasilkan emisi gas rumah kaca sebesar 150–200 kg CO₂ ekuivalen, tergantung pada jenis energi yang digunakan dalam proses manufaktur. Di negara-negara dengan dominasi energi fosil dalam sistem pembangkit, jejak karbon baterai akan jauh lebih tinggi. Selama fase operasional, baterai Li-ion tidak menghasilkan emisi langsung. Ini menjadi keunggulan utama, terutama dalam kendaraan listrik yang menggantikan mesin pembakaran dalam. Namun, keuntungan lingkungan ini hanya akan maksimal jika sumber energi pengisian berasal dari energi terbarukan. Jika tidak, maka baterai hanya berfungsi sebagai perantara dalam sistem energi yang masih berbasis fosil. Setelah mencapai batas umur pakainya, baterai Li-ion menimbulkan persoalan serius terkait pengelolaan limbah berbahaya. Jika tidak didaur ulang dengan benar, kandungan logam berat dan elektrolit beracun dapat mencemari tanah dan air. Selain itu, akumulasi baterai bekas yang tidak tertangani menimbulkan risiko kebakaran dan ledakan akibat *thermal runaway*. Sayangnya, tingkat daur ulang baterai Li-ion masih rendah karena keterbatasan teknologi, biaya tinggi, serta kerumitan proses pemisahan komponen aktif. Kebanyakan sistem daur ulang saat ini masih bersifat terbuka (*open-loop*), sehingga tidak seluruh bahan dapat digunakan kembali untuk pembuatan baterai baru.

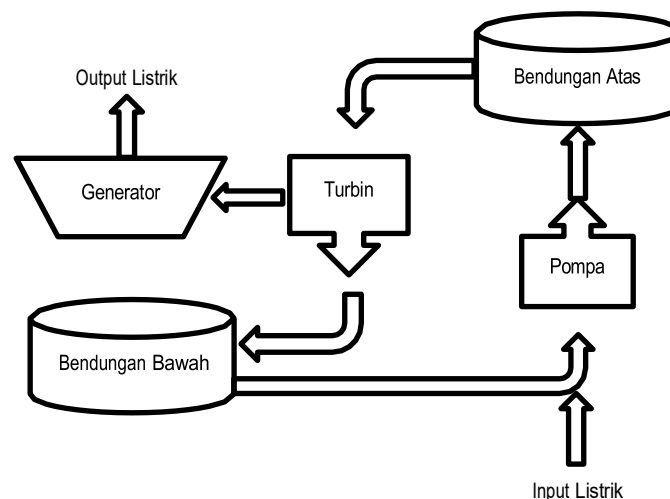
b. *Pumped Hydro Energy Storage (PHES)*

Sebagian besar energi terbarukan berasal dari alam seperti angin, matahari dan air. Namun, kondisi alam juga tidak selalu bisa diandalkan. Seperti angin, kadang angin berhembus kencang, kadang juga tidak. Sinar matahari juga tidak selamanya terang, seperti di malam hari atau hari-hari musim penghujan. Untuk mengatasi suplai sumber energi terbarukan yang tidak pasti ini, ada teknologi yang disebut *Pumped Hydro Energy Storage* atau biasa disingkat sebagai PHES yang bisa menyimpan energi listrik jika dibutuhkan. PHES pada dasarnya adalah sebuah Pembangkit Listrik tenaga Air (PLTA). Tetapi, PHES memiliki kelebihan dibandingkan PLTA biasa. Pada PLTA biasa, air dari bendungan di elevasi yang lebih tinggi mengalir sesuai hukum gravitasi ke sungai *outflow* di elevasi yang lebih rendah

melewati turbin dan menggerakkannya. Sementara itu, pada PHES air tidak mengalir ke sungai *outflow*, tetapi ke bendungan yang berada di elevasi lebih rendah. Jadi pada PHES ada 2 bendungan, di elevasi lebih tinggi dan elevasi yang lebih rendah.

Prinsip kerja PHES didasarkan pada konversi energi listrik menjadi energi potensial gravitasi, yang kemudian dapat dikonversi kembali menjadi energi listrik saat dibutuhkan. Sistem PHES terdiri dari dua reservoir air yang terletak pada ketinggian berbeda, reservoir atas (*upper reservoir*) dan reservoir bawah (*lower reservoir*). Ketika terjadi surplus energi listrik, terutama dari pembangkit listrik berbasis energi terbarukan seperti tenaga surya atau angin, energi tersebut digunakan untuk menggerakkan pompa yang memindahkan air dari reservoir bawah ke reservoir atas. Proses ini dikenal sebagai fase penyimpanan (*charging phase*), di mana energi listrik diubah menjadi energi potensial melalui elevasi massa air. Ketika permintaan energi meningkat atau terjadi kekurangan pasokan listrik, air yang tersimpan di reservoir atas dilepaskan kembali ke reservoir bawah melalui turbin hidrolik. Aliran air ini memutar turbin, yang kemudian menggerakkan generator untuk menghasilkan energi listrik. Proses ini disebut sebagai fase pelepasan (*discharging phase*). Konversi energi potensial menjadi energi kinetik dan selanjutnya menjadi energi listrik berlangsung dengan efisiensi yang relatif tinggi, umumnya berkisar antara 70% hingga 85%.

Efisiensi sistem PHES sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti ketinggian antara dua reservoir (*head height*), desain turbin dan pompa, serta kondisi lingkungan. Selain efisiensinya yang tinggi, keunggulan PHES terletak pada kapasitas penyimpanan energi yang besar dan umur operasional yang panjang, yang dapat mencapai lebih dari 50 tahun. Namun, implementasi PHES membutuhkan lokasi geografis yang sesuai, yaitu adanya perbedaan elevasi yang signifikan dan ketersediaan lahan serta air dalam jumlah memadai. Hal ini membuat PHES lebih cocok untuk wilayah dengan topografi pegunungan atau dataran tinggi. Di samping itu, pengaruh lingkungan, izin penggunaan lahan, dan investasi awal yang tinggi menjadi tantangan tersendiri dalam pengembangannya. Secara keseluruhan, PHES tetap menjadi salah satu pilihan utama untuk penyimpanan energi skala besar, khususnya dalam mendukung stabilitas jaringan listrik dan integrasi energi terbarukan yang fluktuatif.



Gambar 3. Blok Sistem PHES

Air yang sudah mengalir ke bendungan di elevasi yang lebih rendah ini dapat kembali dipompa ke bendungan yang elevasinya lebih tinggi. Tujuannya untuk menggerakkan turbin kembali ketika permintaan tenaga listrik lebih besar daripada suplainya. Selain selalu bisa diandalkan saat sedang dibutuhkan, PHES juga dapat menyimpan tenaga listrik yang dihasilkannya. Karena hal tersebut PHES disebut sebagai baterai alami. Secara prinsip, PHES menyimpan energi dengan memanfaatkan energi potensial gravitasi dari air yang dipompa ke reservoir yang terletak di elevasi lebih tinggi (atas) menggunakan kelebihan

energi listrik (misalnya dari energi surya atau angin) saat permintaan rendah. Ketika permintaan listrik meningkat, air dilepaskan kembali ke reservoir bawah melalui turbin hidro untuk menghasilkan listrik.

Prinsip dasar energi potensial gravitasi:

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

Dengan: E_p = energi potensial (joule); m = massa air (kg); g = percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$); h = tinggi vertikal antara dua reservoir (m)

Efisiensi energi pada sistem PHES didefinisikan sebagai perbandingan antara energi listrik yang dihasilkan saat discharge dan energi listrik yang dikonsumsi saat pemompaan:

$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{in}} \times 100\%$$

Nilai efisiensi teoritis maksimum sistem ideal dapat mendekati 100%, namun dalam praktiknya, PHES memiliki efisiensi sekitar 70–85%. Kerugian energi terjadi akibat dari Friksi dalam aliran air (*head loss*), Efisiensi turbin dan pompa yang tidak sempurna, Kehilangan energi dalam sistem konversi mekanik-elektrik, dan Evaporasi dan infiltrasi air dalam reservoir terbuka. Selain itu efisiensi sistem juga bergantung pada Tipe turbin (Francis, Pelton, atau *reversible pump-turbine*), Kualitas sistem kontrol dan otomatisasi, dan Kondisi geologi dan elevasi area proyek. Sebagai perbandingan, efisiensi PHES lebih rendah dari baterai lithium-ion (~90–95%), tetapi unggul dari segi kapasitas skala besar dan umur operasional (>40 tahun).

Sistem PHES jika kita kaitkan dengan dampak positif terhadap lingkungan diantaranya mempunyai Nol emisi karbon selama operasi, karena PHES tidak menghasilkan emisi langsung karena memanfaatkan air dan gravitasi. Selain itu PHES dapat berfungsi sebagai buffer untuk menyimpan kelebihan produksi dari PLTS dan PLTB. Sehingga PHES mempunyai stabilitas sistem tenaga yang mampu menyediakan respon cepat dan kapasitas daya besar saat dibutuhkan (sekitar ratusan megawatt hingga gigawatt). Namun selain dampak positif ada pula dampak negative yang dihasilkan, dampak lingkungan PHES umumnya bersifat lokal dan geografis, namun dapat signifikan jika tidak dikendalikan. Berdasarkan teori *Ecological Modernization Theory* (EMT), pembangunan teknologi energi bersih harus mempertimbangkan aspek ekologis dalam setiap tahapnya agar tidak menciptakan bentuk degradasi baru. Beberapa dampak lingkungan PHES meliputi:

- Perubahan tata guna lahan dan bentang alam, Konstruksi dua reservoir dan jaringan terowongan dapat menyebabkan penggundulan hutan, pengusiran flora-fauna lokal, dan perubahan morfologi lahan.
- Dampak terhadap ekosistem air, Pengalihan aliran sungai, perubahan debit air, dan fluktuasi muka air berdampak pada biodiversitas akuatik dan siklus kehidupan organisme air.
- Potensi gangguan social, Pemindahan penduduk dan konflik agraria akibat pembangunan bendungan atau waduk.
- Risiko teknis, Potensi longsor, gempa buatan (*induced seismicity*), dan kebocoran air akibat kegagalan struktur geoteknik.
- Konsumsi air, Kehilangan air karena evaporasi di reservoir terbuka, khususnya di wilayah kering, dapat menjadi isu penting dalam manajemen sumber daya air.

c. Perbandingan Kedua Sistem

Permintaan akan teknologi penyimpanan energi yang handal, efisien, dan berkelanjutan terus meningkat seiring dengan transisi global menuju sistem energi rendah karbon. Di antara berbagai jenis penyimpanan energi yang tersedia, baterai lithium-ion (Li-ion) dan *Pumped Hydro Energy Storage* (PHES) merupakan dua teknologi utama yang banyak diadopsi. Keduanya memiliki karakteristik yang berbeda dalam aspek teknis, efisiensi, kapasitas, fleksibilitas aplikasi, biaya, dan dampak lingkungan. Maka perbandingan mendalam antara baterai Li-ion dan PHES sebagai bagian dari strategi penyimpanan energi jangka pendek dan panjang dapat kita lihat pada tabel berikut.

Tabel 3. Perbandingan Baterai Li-Ion dan PHES

Aspek	Baterai Li-ion	<i>Pumped Hydro Energy Storage</i>
Prinsip Kerja	Reaksi kimia lithium-ion	Pompa dan turbin air
Efisiensi Energi	90–95%	70–85%
Biaya Investasi	Rendah–sedang (~\$100–200/kWh)	Sangat tinggi (~\$1.000–2.000/kW)
Kapasitas Penyimpanan	Fleksibel: rumah hingga grid	Grid besar
Umur Pakai	8–15 tahun	>40 tahun
Biaya Operasional	Rendah, tapi umur terbatas	Sangat rendah, umur panjang
Skala Aplikasi	Skala kecil-menengah	Skala besar (grid-scale)
Respon Waktu	Sangat cepat	Relatif cepat
Dampak Lingkungan	Tambang bahan kimia, limbah baterai	Gangguan lingkungan dan ekosistem lokal
Mobilitas	Tinggi (portable)	Rendah (stasioner permanen)
Skalabilitas Lokasi	Fleksibel (tidak tergantung topografi)	Terbatas pada wilayah dengan kontur tinggi
Biaya Awal per MW	Lebih rendah dan terus menurun	Sangat tinggi, terutama pembangunan awal
Aplikasi Spesifik	<i>Fast response, peak shaving</i>	Penyimpanan jangka panjang, stabilisasi beban

A. STUDI KASUS IMPLEMENTASI

Berikut adalah satu studi kasus nyata yang menggunakan teknologi baterai lithium-ion untuk penyimpanan energi, lengkap dengan penjelasan menyeluruh. *Tesla Hornsdale Power Reserve* adalah salah satu fasilitas penyimpanan energi terbesar di dunia yang menggunakan baterai lithium-ion. Proyek ini dibangun di dekat Hornsdale Wind Farm di Australia Selatan, dan resmi beroperasi pada Desember 2017. Proyek ini merupakan hasil kerja sama antara Tesla, Neoen (pengembang energi terbarukan asal Prancis), dan pemerintah negara bagian Australia Selatan. Proyek ini muncul sebagai respons atas krisis pasokan listrik di wilayah tersebut, termasuk pemadaman besar yang terjadi pada tahun 2016.

Tabel 4. Data Tesla Hornsdale Power Reserve

Tujuan utama	Spesifikasi Teknis	Fungsi dan Peran	Dampak dan Hasil
• Meningkatkan keandalan pasokan listrik, • Menyediakan cadangan daya cepat, • Menstabilkan frekuensi jaringan, • Mendukung integrasi energi terbarukan.	• Thn 2016: 100 MW / 129 MWh • Thn 2020: 150 MW / 193.5 MWh • Baterai lithium-ion (<i>Tesla Powerpack & Megapack</i>) • Lokasi: Jamestown, Australia Selatan	• Memberikan cadangan daya dalam hitungan detik saat terjadi gangguan di jaringan. • Merespons fluktuasi V dan f pada <i>grid</i>. • Menyimpan kelebihan energi dari turbin angin dan melepaskannya saat permintaan meningkat. • Mengurangi ketergantungan pembangkit konvensional berbahan bakar gas.	• Sistem dapat menyalurkan energi hampir seketika (respon < 1 detik). • Penghematan biaya operasional sistem grid • Meningkatkan efisiensi dan kompetisi di pasar listrik lokal. • Mempercepat pemulihan jaringan pasca gangguan. • Tidak menghasilkan emisi karbon selama operasi.

Belajar dari kasus tersebut ternyata teknologi baterai lithium-ion terbukti efektif untuk layanan grid skala besar, penstabilan sistem tenaga berbasis energi terbarukan, dan respons cepat terhadap dinamika permintaan dan gangguan. Sehingga perlu adanya peran pemerintah dalam mendukung proyek awal sangat penting untuk mengurangi risiko investasi kemudiandiperlukan kolaborasi antara sektor publik dan swasta dapat mempercepat transisi energi bersih. Studi kasus Hornsdale menunjukkan bahwa baterai lithium-ion sangat ideal untuk kebutuhan penyimpanan energi cepat dan responsif di sistem kelistrikan modern yang mengandalkan energi terbarukan intermiten. Meskipun memiliki keterbatasan dalam hal daya tahan jangka panjang dan isu limbah, keunggulan dalam fleksibilitas, efisiensi, dan kecepatan menjadikannya pilihan utama untuk ancillary services dan stabilisasi frekuensi. Sementara itu, PHES tetap unggul untuk penyimpanan energi skala besar dan jangka panjang, namun menghadapi tantangan besar dari sisi infrastruktur dan dampak lingkungan.

B. POTENSI PENERAPAN DI INDONESIA

Seiring dengan upaya global untuk mengurangi emisi karbon dan memperluas penggunaan energi terbarukan, Indonesia dihadapkan pada kebutuhan mendesak untuk mengembangkan sistem penyimpanan energi yang andal, efisien, dan sesuai dengan karakteristik geografis serta kebutuhan lokal. Teknologi penyimpanan energi seperti baterai lithium-ion dan *pumped hydro energy storage* (PHES) muncul sebagai solusi penting dalam mendukung transisi energi nasional.

Secara geografis, Indonesia memiliki karakteristik yang sangat potensial untuk penerapan kedua teknologi ini. Ribuan pulau dengan tingkat elektrifikasi yang belum merata membutuhkan solusi desentralisasi energi, di mana sistem penyimpanan seperti baterai lithium-ion dapat dimanfaatkan untuk microgrid di wilayah terpencil atau daerah 3T (Tertinggal, Terdepan, dan Terluar). Teknologi ini memungkinkan energi dari sumber terbarukan seperti surya dan angin dapat disimpan dan digunakan saat dibutuhkan, tanpa ketergantungan pada jaringan listrik utama.

Sementara itu, dengan kontur wilayah yang kaya akan perbukitan dan sumber daya air, Indonesia juga memiliki peluang besar untuk membangun sistem PHES, khususnya di daerah yang telah memiliki infrastruktur PLTA. PHES dapat dimanfaatkan untuk menyimpan kelebihan energi dari pembangkit terbarukan saat permintaan rendah dan melepaskannya kembali saat beban puncak. Hal ini sangat relevan dalam konteks sistem kelistrikan berskala besar seperti di Jawa-Bali atau Sumatera.

Meski potensi teknologinya besar, penerapannya di Indonesia tidak lepas dari berbagai tantangan. Dari sisi teknis, baterai lithium-ion masih menghadapi isu daya tahan di iklim tropis serta kebutuhan akan sistem manajemen baterai yang canggih. PHES, di sisi lain memerlukan studi kelayakan yang kompleks dan pembangunan infrastruktur besar yang memakan waktu panjang. Tantangan ekonomi juga menjadi hambatan signifikan, terutama karena biaya investasi awal yang tinggi dan keterbatasan akses pembiayaan hijau yang kompetitif. Di samping itu, tantangan regulasi seperti belum adanya kerangka kebijakan yang secara spesifik mendukung sistem penyimpanan energi, baik dari sisi tarif, insentif fiskal, maupun standar teknis nasional, turut menghambat percepatan adopsi teknologi ini.

Namun demikian, peluang untuk mengatasi tantangan-tantangan tersebut terbuka lebar. Pemerintah Indonesia telah menunjukkan komitmen dalam mendorong transisi energi melalui berbagai inisiatif, termasuk pengembangan *Renewable Energy Based Industry Development (REBID)*, penguatan target energi terbarukan dalam Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), dan pembukaan peluang investasi melalui skema *Public-Private Partnership (PPP)*. Di samping itu, potensi cadangan nikel Indonesia yang sangat besar memberikan peluang strategis untuk mendukung industri baterai domestik, yang sekaligus bisa mengurangi ketergantungan impor dan memperkuat kemandirian teknologi energi.

Dengan pendekatan yang terintegrasi antara teknologi, kebijakan, dan investasi, serta kolaborasi antara pemerintah, akademisi, dan sektor swasta, Indonesia memiliki peluang besar

untuk menjadikan penyimpanan energi sebagai komponen vital dalam sistem energi masa depan yang lebih bersih, tangguh, dan inklusif.

Jika kita gambarkan potensi teknologi diatas untuk Indonesia bisa kita gambarkan sebagai berikut:

1) Baterai Lithium-Ion

Potensi di Indonesia:

- Integrasi energi surya dan angin: **Sangat cocok untuk menyimpan energi dari PLTS atap, PLTB, dan hybrid system di wilayah terpencil.**
- Mendukung elektrifikasi daerah 3T: Bisa digunakan untuk microgrid off-grid di daerah yang belum terjangkau jaringan PLN.
- *Smart grid* dan *demand response*: Cocok untuk aplikasi penyimpanan berbasis IoT di kota besar.
- Transportasi listrik: Dapat mendukung *charging station* kendaraan listrik dan *fleet* kendaraan publik.

Tabel 5. Tantangan Li-ion

Aspek	Tantangan
Teknis	- Ketersediaan SDM dan infrastruktur untuk instalasi dan pemeliharaan. - Perlu sistem proteksi dan manajemen baterai (BMS) yang andal di iklim tropis.
Ekonomi	- Biaya awal masih relatif tinggi untuk masyarakat umum - Ketergantungan pada impor bahan baku (litium, kobalt).
Regulasi	- Belum ada insentif fiskal khusus untuk battery storage. - Kurangnya standar nasional untuk keamanan dan daur ulang baterai.

2) *Pumped Hydro Energy Storage* (PHES)

Potensi di Indonesia:

- Topografi mendukung: Banyak wilayah perbukitan dan pegunungan dengan potensi ketinggian yang cocok untuk PHES.
- Sumber daya air melimpah: Potensi pembangunan sistem tertutup (*closed-loop*) atau *hybrid* dengan PLTA eksisting.
- Stabilisasi grid Jawa-Bali dan interkoneksi Sumatera-Kalimantan: Cocok untuk mendukung beban dasar dan cadangan energi di sistem tenaga besar.

Tabel 6. Tantangan PHES

Aspek	Tantangan
Teknis	- Pembangunan infrastruktur besar membutuhkan waktu lama dan perencanaan kompleks. - Risiko geoteknik dan dampak pada sistem hidrologi lokal.
Ekonomi	- Investasi awal sangat mahal dan tidak menarik bagi swasta tanpa dukungan jangka panjang. - Return on investment (ROI) lambat.
Regulasi	- Izin lingkungan dan tata ruang kompleks. - Belum ada skema tarif atau insentif khusus untuk penyimpanan skala besar.

Jadi, teknologi penyimpanan energi memiliki **potensi besar untuk diterapkan di Indonesia**, baik dalam skala kecil (baterai lithium-ion) maupun skala besar (PHES). Namun, realisasi teknologi ini memerlukan **sinergi antara teknologi, kebijakan, dan investasi**. Dengan *roadmap* energi nasional yang menargetkan bauran energi terbarukan sebesar 23% pada 2025, sistem penyimpanan akan menjadi kunci keberhasilan transisi energi bersih di Indonesia.

4. Kesimpulan

Dalam rangka mendukung transisi energi nasional menuju sistem kelistrikan yang lebih bersih, andal, dan berkelanjutan, pengembangan dan adopsi teknologi penyimpanan energi (*Energy Storage Systems/ESS*) menjadi salah satu komponen kunci yang tidak dapat diabaikan. Meskipun potensi geografis dan sumber daya Indonesia mendukung pemanfaatan teknologi ini, adopsinya masih terhambat oleh berbagai tantangan struktural, mulai dari regulasi yang belum mendukung hingga kendala teknis dan pembiayaan. Oleh karena itu, diperlukan serangkaian kebijakan dan strategi implementasi yang holistik dan terintegrasi untuk mempercepat pengembangan ESS di Indonesia.

1. Penguatan Regulasi dan Insentif

Langkah pertama yang perlu dilakukan adalah menyusun regulasi nasional yang secara khusus mengatur teknologi penyimpanan energi, baik dalam konteks interkoneksi dengan jaringan listrik maupun penggunaannya secara *off-grid*. Saat ini, belum terdapat regulasi yang secara eksplisit mengatur peran ESS dalam sistem tenaga nasional, baik sebagai bagian dari pembangkit, cadangan daya (*backup*), maupun sebagai penyedia layanan ancillary seperti penstabil frekuensi. Pemerintah juga perlu memberikan insentif fiskal dan non-fiskal bagi pengembang dan pengguna ESS. Insentif fiskal dapat berupa pengurangan pajak, pembebasan bea masuk untuk komponen ESS, dan potongan PPh untuk investasi teknologi ini. Sementara itu, insentif non-fiskal dapat berupa penyusunan skema *feed-in tariff* khusus untuk sistem energi terbarukan yang dilengkapi dengan ESS, serta pemberian subsidi untuk penerapan sistem penyimpanan di wilayah 3T. Selain itu, perlu diterapkan skema tarif penyimpanan energi, seperti *time-of-use tariff*, yang memungkinkan pengguna menyimpan energi saat harga rendah dan menggunakannya saat harga tinggi. Skema ini akan memberikan sinyal ekonomi yang jelas dan mendorong adopsi teknologi penyimpanan, terutama di sektor industri dan rumah tangga urban.

Tabel 7. Penguatan Regulasi dan Insentif

Penyusunan Regulasi Khusus ESS	Insentif Fiskal & Non-Fiskal	Skema Tarif Penyimpanan Energi
- Menyusun regulasi yang secara spesifik mengatur teknologi penyimpanan energi, baik dari aspek teknis, keamanan, integrasi jaringan, hingga keekonomian. - Memasukkan ESS ke dalam perencanaan sistem kelistrikan nasional seperti RUPTL (Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik) dan RUEN (Rencana Umum Energi Nasional).	- Insentif fiskal berupa pengurangan pajak, bea masuk nol untuk impor sistem penyimpanan energi dan komponennya, serta potongan PPh untuk investasi ESS. - Insentif non-fiskal seperti <i>feed-in tariff</i> untuk pengguna PLTS + ESS, dan program subsidi untuk ESS di daerah 3T.	- Menerapkan tarif diferensiasi waktu (<i>time-of-use tariff</i>) untuk mendorong penggunaan ESS pada saat beban rendah dan pelepasan energi saat beban puncak. - Memberlakukan <i>capacity payment</i> bagi operator ESS yang menyediakan cadangan daya atau layanan <i>ancillary</i> (frekuensi, tegangan).

2. Pengembangan Teknologi dan Infrastruktur

Untuk menciptakan ekosistem penyimpanan energi yang mandiri, perlu dilakukan pengembangan industri domestik, mulai dari hulu (bahan baku baterai seperti nikel dan kobalt) hingga hilir (manufaktur baterai, sistem manajemen energi, dan sistem kendali). Indonesia memiliki cadangan nikel terbesar di dunia, yang memberikan peluang strategis untuk mengembangkan industri baterai nasional melalui program hilirisasi.

Tabel 8. Pengembangan Teknologi

Pengembangan Industri Domestik	Pembangunan Proyek Percontohan (<i>Pilot Project</i>)
• Mendorong industri hulu dan hilir baterai nasional melalui hilirisasi nikel, litium, dan bahan pendukung lainnya, sesuai visi Indonesia Battery Corporation (IBC). • Mendukung klaster industri ESS lokal yang memproduksi baterai, inverter, sistem kontrol, dan sistem manajemen baterai (BMS).	• Membangun proyek percontohan ESS dalam skala berbeda (desa terpencil, kawasan industri, pembangkit hybrid) untuk pembelajaran teknis dan manajemen. • Mengembangkan proyek PHES di daerah dengan potensi geospasial tinggi seperti Sulawesi Selatan, Sumatera Barat, atau Papua.

Langkah selanjutnya adalah membangun proyek percontohan (*pilot project*) yang menunjukkan penerapan ESS dalam konteks nyata, seperti *microgrid* di daerah terpencil, *hybrid solar-battery* di pulau-pulau kecil, atau *pumped hydro energy storage* (PHES) pada sistem PLTA eksisting. Proyek-proyek ini berfungsi sebagai laboratorium lapangan untuk menguji kelayakan teknis, ekonomi, dan sosial dari sistem penyimpanan energi.

3. Skema Pembiayaan Inovatif

Menghadapi tantangan investasi awal yang tinggi, pengembangan ESS perlu didukung oleh skema pembiayaan yang inovatif. Pemerintah dapat mendorong green financing melalui kerjasama dengan bank pembangunan nasional dan internasional (seperti ADB, World Bank), serta mengembangkan instrumen pembiayaan seperti green bonds, sukuk hijau, dan blended finance.

Di sisi lain, strategi kemitraan publik-swasta (Public-Private Partnership/PPP) dapat digunakan untuk mempercepat investasi proyek ESS skala besar seperti PHES. Model build-operate-transfer atau lease-to-own dapat digunakan untuk memastikan proyek berjalan efisien dan dapat dipindahtanggankan setelah jangka waktu tertentu.

Tabel 9. Skema Pembiayaan

Green Financing dan Blended Finance	Kemitraan Publik-Swasta (PPP)
• Mendorong lembaga keuangan untuk membuka skema pembiayaan hijau (<i>green loans</i>) bagi ESS, baik melalui bank nasional maupun internasional (ADB, World Bank). • Mengintegrasikan <i>blended finance</i> (kombinasi hibah, pinjaman, dan ekuitas) untuk proyek penyimpanan energi skala besar.	• Mendorong skema PPP untuk investasi PHES atau <i>battery storage</i> di sistem tenaga PLN melalui skema <i>build-operate-transfer</i> atau <i>lease-to-own</i>.

4. Peningkatan Kapasitas dan Riset Lokal

Pengembangan ESS juga memerlukan peningkatan kapasitas sumber daya manusia dan dukungan terhadap kegiatan penelitian dan pengembangan (litbang). Pemerintah perlu mendorong penguatan riset di perguruan tinggi dan lembaga litbang nasional dalam bidang material baterai, sistem manajemen energi, serta integrasi ESS dengan energi terbarukan. Selain itu, diperlukan program pelatihan bersertifikat bagi teknisi dan insinyur yang akan mengelola dan memelihara sistem ESS. Kurikulum pendidikan vokasi dan universitas juga perlu diperbarui agar mencakup keterampilan teknis ESS, termasuk penggunaan kecerdasan buatan dan Internet of Things (IoT) dalam sistem kontrol energi.

Tabel 10. Peningkatan Kapasitas

Dukungan Riset dan Prototipe	Pengembangan Kapasitas SDM
• Mendukung riset perguruan tinggi dan pusat teknologi untuk pengembangan baterai lokal (misalnya berbasis natrium atau limbah biomassa). • Menyediakan dana riset khusus untuk sistem manajemen energi dan penyimpanan berbasis AI/IoT.	• Mengembangkan kurikulum ESS di SMK, politeknik, dan universitas. • Menyediakan pelatihan bersertifikat untuk instalasi dan perawatan sistem ESS.

Penerapan teknologi penyimpanan energi di Indonesia memerlukan pendekatan lintas sektor yang melibatkan aspek teknis, kebijakan, ekonomi, dan sosial. Tanpa kerangka kebijakan yang mendukung dan strategi implementasi yang konkret, peluang besar yang dimiliki Indonesia dalam transisi energi bersih akan sulit tercapai. Oleh karena itu, sinergi antara pemerintah, pelaku industri, lembaga riset, dan masyarakat menjadi sangat penting untuk mendorong adopsi ESS sebagai pilar penting dalam sistem energi masa depan Indonesia.

Penerapan teknologi ESS di Indonesia akan menjadi pilar penting dalam mewujudkan transisi energi yang andal, bersih, dan inklusif. Namun, tanpa dukungan kebijakan yang holistik dan integratif, adopsi teknologi ini akan berjalan lambat. Oleh karena itu, diperlukan kerangka kebijakan nasional yang mendorong regulasi progresif, iklim investasi yang menarik, dan ekosistem teknologi dalam negeri.

Daftar Pustaka

- ADB. (2023). *Blended Finance for Renewable Energy Storage Projects in Southeast Asia*. Asian Development Bank. <https://adb.org>
- ASEAN Centre for Energy. (2022). *Energy Storage in ASEAN: Policy, Market and Technology Developments*. <https://aseanenergy.org>
- BloombergNEF. (2023). *Battery Price Survey*. Bloomberg New Energy Finance. <https://about.bnef.com>
- Clean Energy Ministerial. (2020). *Energy Storage Initiative: Global Status and Recommendations*. <https://cleanenergyministerial.org>
- CSIRO & Australian Energy Market Operator. (2018). *Initial Operation of the Hornsdale Power Reserve Battery Energy Storage System*. <https://aemo.com.au>
- Dunn, B., Kamath, H., & Tarascon, J. M. (2011). Electrical energy storage for the grid: A battery of choices. *Science*, 334(6058), 928–935. <https://doi.org/10.1126/science.1212741>
- Hornsdale Power Reserve. (2020). *The world's largest lithium-ion battery*. Neoen Australia. <https://hornsdalepowerreserve.com.au>
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2017). *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*. Abu Dhabi: IRENA. <https://www.irena.org/publications>
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). *Innovation Outlook: Smart Charging for Electric Vehicles*. Abu Dhabi: IRENA.
- Institute for Essential Services Reform (IESR). (2023). *Indonesia Energy Transition Outlook 2024*. <https://iesr.or.id>
- Indonesia Battery Corporation (IBC). (2021). *Strategi Pengembangan Industri Baterai Nasional*. Presentasi internal.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). (2022). *Peta Jalan Transisi Energi Nasional 2021–2060*. Jakarta: Direktorat Jenderal EBTKE.
- Koohi-Fayegh, S., & Rosen, M. A. (2020). A review of energy storage types, applications and recent developments. *Journal of Energy Storage*, 27, 101047. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101047>
- Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI). (2020). *Kajian Teknologi dan Potensi Energi Terbarukan di Wilayah 3T*. Jakarta: LIPI.

- Luo, X., Wang, J., Dooner, M., & Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 137, 511–536. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>
- Oxford Institute for Energy Studies. (2019). *Energy Storage and Balancing Services in Future Electricity Markets*. <https://oxfordenergy.org>
- Pemerintah Indonesia. (2017). *Peraturan Presiden No. 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional (RUEN)*.
- Pemerintah Indonesia. (2022). *Peraturan Presiden No. 112 Tahun 2022 tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik*.
- PT PLN (Persero). (2021). *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021–2030*. <https://pln.co.id>
- World Bank. (2022). *Scaling Battery Energy Storage Systems: A World Bank Guide*. Washington, D.C.: World Bank.