

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Lingkungan alam yang bersih memiliki peran yang krusial dalam membentuk masyarakat modern dan meningkatkan standar hidup. Para pembuat kebijakan di seluruh dunia telah menunjukkan minat yang kuat dalam mengelola dan menjaga ekosistem. Namun, penggunaan bahan bakar fosil yang semakin meningkat telah mempercepat emisi karbon dioksida ke atmosfer, menyebabkan dampak negatif pada kualitas lingkungan. Emisi karbon dioksida global telah dianggap sebagai penyebab utama perubahan iklim selama dekade terakhir [1]. Ketidakseimbangan antara pasokan dan kebutuhan energi, terutama di sektor minyak dan gas, merupakan masalah utama yang dihadapi Indonesia. Oleh karena itu, diperlukan upaya strategis dalam mengembangkan energi baru dan terbarukan untuk mendukung keamanan energi nasional [2].

Rida Mulyana, Sekretaris Jenderal Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), menyoroti kekayaan potensial Indonesia dalam sumber energi terbarukan. Di antara berbagai jenisnya seperti energi surya, angin, air, biomassa, panas bumi, dan energi laut, potensi totalnya mencapai 3.686 GW [3]. Namun, data terbaru dari Badan Energi Baru Terbarukan dan Konversi Energi [4] menunjukkan bahwa pada tahun 2022, penggunaan Energi Baru Terbarukan di Indonesia masih hanya mencapai 12,3% dari total konsumsi energi. Ini mengindikasikan bahwa lebih dari 87,7% dari total konsumsi energi di Indonesia masih bersumber dari energi tidak terbarukan, menggarisbawahi pentingnya upaya lebih lanjut untuk beralih ke sumber energi yang lebih berkelanjutan.

Energi listrik merupakan kebutuhan esensial bagi masyarakat dan merupakan sumber daya ekonomi yang krusial untuk berbagai aktivitas. Diperkirakan permintaan listrik akan terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi, investasi, dan kemajuan teknologi di masa depan [5]. Dalam usaha untuk memastikan kelancaran fungsi jaringan listrik, perlu dibuat keseimbangan antara produksi energi dan permintaan.

Fluktuasi antara permintaan dan pasokan energi dapat berbahaya bagi jaringan listrik dan kepuasan konsumen secara keseluruhan. Oleh karena itu, generasi yang fleksibel yang dikombinasikan dengan penyimpanan energi cenderung menjadi solusi optimal untuk memastikan stabilitas jaringan [6].

Saat ini, jumlah proyek penyimpanan energi yang beroperasi paling tinggi dimiliki oleh *Battery Energy Storage* (lebih dari 350 proyek). *Pumped Hydro Energy Storage* menempati peringkat kedua dengan sekitar 300 proyek. Ini diikuti oleh sistem *Thermal Energy Storage* [7]. Diantara berbagai macam jenis *Battery Energy Storage*, yang paling mendominasi yaitu baterai lithium-ion yang kini telah berkembang dengan cepat dan banyak digunakan sebagai sistem penyimpanan energi karena memiliki kapasitas energi yang tinggi dan fleksibilitas yang besar. Namun, kekhawatiran besar muncul karena seringnya terjadi kecelakaan kebakaran dan ledakan, yang mengancam keselamatan penggunaan sistem-sistem ini [8]. Selain itu, baterai memiliki potensi untuk merusak bumi melalui proses produksi, penggunaan, penyimpanan, pengolahan, pembuangan, serta daur ulang. Karena jumlah baterai yang diproduksi di seluruh dunia sangat besar, menyebabkan berbagai masalah kesehatan dan lingkungan [9].

Selain baterai juga ada *Pumped Hydro Storage* (PHS) yang merupakan salah satu teknologi penyimpanan energi yang memiliki sejarah panjang dan kapasitas besar. Dengan kapasitas terpasang sekitar 127–129 GW pada tahun 2012, PHS mendominasi kapasitas penyimpanan energi besar di seluruh dunia, menyumbang sekitar 3% dari total pembangkitan global [10]. Dibalik kapasitasnya yang besar, terdapat sejumlah tantangan yang harus dipertimbangkan, seperti kebutuhan akan sumber air yang memadai, kondisi topografi, dan karakteristik geologi yang mendukung untuk penyimpanan air dengan variasi ketinggian yang mencukupi. Ini karena area datar dapat meningkatkan biaya investasi. Kendala ini mencakup aspek lingkungan dan sosial, keterbatasan teknis dalam perancangan dan operasional, serta kebutuhan akan investasi awal yang signifikan [11].

Disamping itu, sistem *Compressed Air Energy Storage* (CAES) atau penyimpanan energi udara terkompresi menawarkan potensi besar untuk aplikasi skala besar dan stasioner karena memiliki kapasitas energi yang tinggi, daya rating yang besar, dan umur pakai yang panjang. Hambatan utama dalam menerapkan pembangkit CAES skala besar adalah menemukan lokasi geografis yang sesuai, yang akan menentukan biaya investasi utama pembangkit. Selain lokasi, efisiensi energi yang cenderung rendah yaitu hanya berkisar antara 40 hingga 70 persen menjadi hambatan lain bagi CAES dibandingkan dengan teknologi PHS dan baterai [10], [12].

Dikarenakan beberapa kendala persyaratan pada teknologi penyimpanan energi, pengembangan serta penelitian sudah banyak dilakukan. Diantaranya yaitu Penelitian Hoffstaedt et al. [13] yang memberikan wawasan tentang teknologi *Low Head-Pumped Hydro Storage* (ketinggian 2-30 m), termasuk desain, integrasi grid, kontrol, dan pemodelan. Kemudian penelitian tentang pengembangan sistem penyimpanan energi inovatif yang disusulkan oleh Yao et al. [14] yaitu menggabungkan *Constant-Pressure Energy Storage system* dengan *Pumped Hydro combined with Compressed Air Energy Storage system* (PHCA) untuk mengatasi tantangan volatilitas sumber energi terbarukan di daerah-daerah kering di China. Dengan menganalisis kinerja termodinamika, penelitian ini mengevaluasi potensi sistem PHCA dalam meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan. Hasilnya menunjukkan prospek aplikasi luas di masa depan dengan kemampuannya meningkatkan tingkat pemanfaatan energi secara keseluruhan.

Biao Yang et al. [15] juga melakukan penelitian untuk mengatasi masalah variasi *head* dalam sistem *Pumped Hydro Compressed Air Energy Storage*. Penelitian ini mengusulkan sistem baru yang menggunakan modul transfer energi potensial tekanan air. Melalui pengembangan model energi dan eksergi serta simulasi proses pengisian dan pengosongan, penelitian berhasil mengurangi variasi tekanan udara tinggi menjadi variasi kepala yang lebih rendah dalam mesin hidrolis. Namun, tingkat kerugian energi listrik dan eksergi dari modul ini tetap tinggi. Hasil penelitian ini menyoroti potensi sistem PHCAES untuk meningkatkan efisiensi operasional keseluruhan, sambil menekankan perlunya pengembangan solusi yang lebih sederhana dan ekonomis dalam menghadapi tantangan teknis.

Berrada et al. [6] melakukan penelitian dan pengembangan teknologi penyimpanan baru yaitu teknologi *Gravity Energy Storage* (GES). Saat ini, hanya ada prototipe kecil dan laboratorium dari sistem ini. Serupa dengan PHS, konsep penyimpanan ini bergantung pada gravitasi untuk menyimpan listrik. Beberapa kendala yang dihadapi oleh PHS telah diatasi oleh GES, seperti kebutuhan air yang besar dan keterbatasan geologis. Kemudian Berrada et al. [16] juga menganalisis ekonomi penyimpanan energi gravitasi (GES) dibandingkan dengan opsi lain seperti *Pumped Hydro Energy Storage* (PHES) dan *Compressed Air Energy Storage* (CAES). Analisis mencakup biaya siklus hidup dan *levelized cost of electricity* (LCOE) untuk memberikan wawasan kepada para ahli, produsen energi, dan operator grid. Hasilnya menunjukkan GES kompetitif dengan PHES dan CAES. Ini menunjukkan potensi ekonomi dari teknologi penyimpanan energi gravitasi untuk layanan grid. Penelitian Loudiyi & Berrada [17] memvalidasi model matematis sistem penyimpanan energi gravitasi (GES) melalui eksperimen. Model dibuat menggunakan perangkat lunak Simulink dan divalidasi dengan data empiris. Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh ukuran katup terhadap sistem. Hasilnya menunjukkan model mampu mensimulasikan operasi sistem dengan baik dan mengidentifikasi parameter penting. Kesalahan antara hasil simulasi dan eksperimen kecil, dan ukuran katup memiliki dampak signifikan pada sistem. Model ini dapat digunakan untuk mensimulasikan respons hidrolis sistem secara akurat.

Penggunaan GES memiliki potensi besar sebagai alternatif BES, namun GES sering menghadapi kendala dalam hal biaya infrastruktur yang tinggi dan kebutuhan akan lokasi yang memiliki perbedaan ketinggian yang signifikan untuk berfungsi secara optimal. Sistem *Compressed Air Energy Storage* (CAES) menawarkan solusi dengan lokasi dan dimensi yang lebih fleksibel dan sering kali lebih kecil, namun CAES menghadapi tantangan dalam hal efisiensi energi yang lebih rendah dan ketergantungan pada keberadaan formasi geologis yang sesuai untuk menyimpan udara terkompresi. Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan dikembangkan sistem penyimpanan energi yang menggabungkan kelebihan dari GES dan CAES untuk menciptakan solusi yang lebih efisien dan adaptif dalam menyimpan energi terbarukan.

Oleh karena itu, penelitian ini akan difokuskan pada optimasi parametrik untuk memprediksi kinerja sistem *Compressed Air-Gravity Energy Storage* (CA-GES) dengan parameter yang telah ditentukan. Pendekatan ini memungkinkan analisis mengenai bagaimana berbagai parameter mempengaruhi kinerja sistem CA-GES di bawah kondisi operasional yang berbeda. Beberapa penelitian dengan tema optimasi parametrik pada penyimpanan energi sudah beberapa kali dilakukan seperti yang tercantum pada tabel 1.1.

Tabel 1.1 Penelitian Optimasi Parametrik Penyimpanan Energi

Ref.	Jenis Penyimpanan Energi	Parameter	Metode Optimasi	Hasil
[18]	<i>Gravity Energy Storages</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Diameter piston • Tinggi piston • Massa jenis piston • Panjang dan diameter pipa balik • Waktu pengisian/pengosongan 	<i>Numerical Modeling, Taguchi Method, ANOVA</i>	Diameter dan tinggi piston adalah parameter signifikan dengan kontribusi masing-masing 35.11% dan 30.28%. Nilai optimal untuk diameter piston adalah 0,25 kali tinggi kontainer, tinggi piston adalah 0,5 kali tinggi kontainer, dan diameter pipa return adalah 0,01 kali tinggi kontainer.
[19]	<i>Pumped Hydro Energy Storages</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Orifice height <i>Ratio</i> • Diffuser semi-axis <i>Ratio</i> • Cover plate radius <i>Ratio</i> 	<i>CFD, Response Surface Methodology (RSM), Genetic Algorithm</i>	Optimasi intake-outlet menghasilkan pengurangan koefisien head loss sebesar 4.687%, peningkatan distribusi aliran, dengan pengurangan negatif velocity pada mode aliran masuk dan output aliran yang lebih baik.
[20]	<i>Pumped Hydro Energy Storages</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Ketinggian air • Diameter dam • Kecepatan putar CR-RPT • Konfigurasi paralel 	<i>Operation Simulation Code, Smart Site Identification Algorithm</i>	Efisiensi tinggi dengan variasi head hidrolis melalui desain CR-RPT berkecepatan variabel; penggunaan konfigurasi paralel meningkatkan efisiensi dan respons cepat; output stabil pada situs offshore di Greater North Sea.

Ref.	Jenis Penyimpanan Energi	Parameter	Metode Optimasi	Hasil
[21]	<i>Pumped-Hydro Carbon Dioxide Transcritical Cycles</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Tekanan karbon dioksida • Ukuran tangki air • Suhu fluida panas • Kapasitas penyimpanan termal 	<i>Numerical Modeling</i>	Sistem menghasilkan round-trip efficiency (RTE) optimal sebesar 71.2% melalui kombinasi siklus panas (HPC) dan siklus transkritik organik (OTC); efisiensi ditingkatkan dengan mengurangi kerugian termal, memungkinkan integrasi dengan kebutuhan pemanasan dan pendinginan industri.
[22]	<i>Compressed Air Energy Storage</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Suhu penyimpanan energi panas • Tekanan penyimpanan maksimum 	<i>Thermodynamic Modeling, MATLAB</i>	Tekanan penyimpanan maksimum berperan penting dalam meningkatkan densitas energi, yang naik secara linier seiring tekanan hingga 200 bar. Namun, efisiensi listrik turun tajam dari 30 hingga 130 bar, mencapai 23%, sementara efisiensi komprehensif menurun ke 32,6%. Pada skala mikro, efisiensi rendah disebabkan oleh kinerja mesin, dengan efisiensi turbin hanya 62% dan motor udara 30%

Dari Tabel 1.1 terlihat bahwa setiap jenis sistem penyimpanan energi memiliki fokus optimasi yang spesifik pada parameter tertentu untuk mencapai kinerja yang optimal. Pada sistem *Gravity Energy Storage*, analisis menunjukkan bahwa dimensi piston, khususnya diameter dan tingginya, menjadi faktor utama yang memengaruhi performa, dengan kontribusi signifikan lebih dari 30% untuk masing-masing parameter. Sistem *Pumped Hydro Energy Storage* menunjukkan hasil yang menjanjikan melalui optimasi geometri komponen seperti rasio ketinggian *orifice* dan radius *diffuser*, yang berhasil meningkatkan distribusi aliran dan mengurangi hambatan hidrolis. Sementara itu, *Compressed Air Energy Storage* (CAES) menyoroti pentingnya tekanan penyimpanan maksimum dalam meningkatkan densitas energi, meskipun tantangan efisiensi listrik tetap menjadi kendala pada aplikasi skala mikro. Temuan-temuan ini menunjukkan bahwa pendekatan optimasi parametrik sangat penting untuk meningkatkan kinerja dan efisiensi berbagai sistem penyimpanan energi.

Melalui penerapan optimasi parametrik, parameter-parameter seperti tekanan, volume, dan temperatur dapat dianalisis untuk menemukan konfigurasi ideal yang mendukung efisiensi tinggi dan performa optimal. Proses ini memberikan wawasan mendalam tentang hubungan antara parameter-parameter tersebut dan kinerja sistem secara keseluruhan. Dalam konteks CA-GES, pendekatan ini menjadi kunci untuk mengembangkan strategi yang efektif dalam meningkatkan efisiensi, sekaligus memastikan adaptabilitas sistem untuk memenuhi kebutuhan penyimpanan energi terbarukan secara berkelanjutan.

1.2 Identifikasi Masalah

Dari latar belakang masalah diatas dapat diambil beberapa identifikasi masalah sebagai berikut:

1. Penggunaan bahan bakar fosil yang meningkat menyebabkan emisi karbon dioksida tinggi, berdampak negatif pada lingkungan dan perubahan iklim.
2. Penggunaan energi terbarukan di Indonesia masih rendah, hanya 12,3% dari total konsumsi energi pada tahun 2022, menunjukkan ketergantungan tinggi pada energi tidak terbarukan.
3. Pertumbuhan populasi, investasi, dan teknologi meningkatkan permintaan listrik, menuntut keseimbangan antara produksi dan konsumsi energi.
4. Ketidakseimbangan pasokan dan kebutuhan energi, terutama di sektor minyak dan gas, menjadi masalah utama, memerlukan solusi penyimpanan energi yang efektif untuk stabilitas jaringan listrik.
5. Pengembangan teknologi penyimpanan energi menghadapi tantangan teknis, lingkungan, dan biaya yang signifikan.
6. Diperlukan pengembangan sistem penyimpanan energi yang lebih efisien dan adaptif.

1.3 Pembatasan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan identifikasi masalah diatas, objek permasalahan pada penelitian dibatasi dengan poin-poin berikut:

1. Penelitian ini berfokus pada optimasi parameter desain dalam sistem *Compressed Air-Gravity Energy Storage* (CA-GES) dengan lima parameter utama: diameter piston, tinggi silinder, tinggi piston, massa jenis piston, dan volume bejana tekan.
2. Variasi parameter hanya dilakukan pada lima level yang telah ditentukan untuk masing-masing faktor, menggunakan metode desain percobaan *orthogonal array*.
3. Penelitian ini tidak mempertimbangkan faktor kehilangan energi, efisiensi sistem, atau faktor operasional lainnya yang mungkin mempengaruhi performa CA-GES.
4. Analisis hanya dilakukan berdasarkan perhitungan kapasitas energi yang dihasilkan oleh sistem, tanpa mempertimbangkan aspek lain seperti biaya atau dampak lingkungan.
5. Optimasi yang dilakukan hanya pendekatan statistik menggunakan bantuan perangkat lunak Minitab Statistical Software untuk analisis ANOVA serta *Signal to Noise Ratio*, sehingga nilai optimal yang didapat hanya berdasarkan jangkauan data yang diuji.

1.4 Perumusan Masalah

Untuk memudahkan proses penelitian, terdapat beberapa rumusan masalah yang dinyatakan dalam bentuk pertanyaan sebagai berikut.

- 1 Bagaimana efisiensi sistem CA-GES dapat ditingkatkan melalui optimasi parametrik dari berbagai parameter desain sistem?
- 2 Apa saja parameter kunci yang mempengaruhi kinerja sistem CA-GES dan bagaimana cara mengidentifikasi nilai optimal dari parameter-parameter tersebut untuk mencapai performa terbaik?
- 3 Sejauh mana optimasi parametrik dapat memberikan wawasan mendalam tentang hubungan antara berbagai parameter sistem CA-GES dan bagaimana hal tersebut berkontribusi pada pengembangan sistem yang lebih efisien?

1.5 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi parameter yang signifikan terhadap kapasitas energi pada sistem Compressed Air – Gravity Energy Storage.
2. Mengidentifikasi parameter yang berpengaruh positif dan negatif serta persentase kontribusi terhadap kapasitas energi sistem Compressed Air – Gravity Energy Storage.
3. Melakukan optimasi parametrik untuk menentukan konfigurasi variabel desain yang optimal untuk memaksimalkan kapasitas energi sistem.

1.6 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan berbagai manfaat, baik dalam konteks akademis maupun praktis, sebagai berikut:

1. Memberikan pemahaman yang lebih dalam mengenai pengaruh parameter desain terhadap kapasitas energi dalam sistem *Compressed Air-Gravity Energy Storage* (CA-GES).
2. Memberikan informasi yang berguna bagi pengembangan desain sistem CA-GES dengan memfokuskan pada parameter yang berpengaruh besar terhadap kapasitas energi.
3. Menjadi acuan dalam pengambilan keputusan optimasi parameter untuk meningkatkan kinerja sistem CA-GES pada berbagai skala aplikasi.
4. Memberikan kontribusi pada riset terkait dengan energi terbarukan dan penyimpanan energi, khususnya dalam penerapan teknologi CA-GES.