

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Meningkatnya kebutuhan energi akibat pertumbuhan penduduk dan kemajuan teknologi mendorong perlunya pengembangan teknologi penyimpanan energi yang efisien dan ramah lingkungan, mengingat energi fosil memiliki keterbatasan serta berdampak negatif terhadap lingkungan (Li Xu, 2022).

Peningkatan jumlah penduduk, elektrifikasi, serta perkembangan industri dan rumah tangga menyebabkan konsumsi listrik di Indonesia terus bertambah setiap tahun. Menurut data yang dilaporkan dalam (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2024), pembangkitan listrik di Indonesia masih bergantung pada bahan bakar fosil. Sementara itu, cadangan minyak dan gas bumi terus menurun, sehingga transisi menuju energi terbarukan menjadi langkah yang sangat semakin penting.

Teknologi penyimpanan energi, seperti baterai lithium-ion, penyimpanan termal, dan *flywheel*, berperan penting dalam mendukung energi terbarukan. Baterai lithium-ion menjadi pilihan utama karena memiliki efisiensi dan densitas energi yang tinggi serta mampu mengurangi ketergantungan pada energi fosil (Tedla et al., 2017).

Selain *Battery Energy Storage*, teknologi penyimpanan energi lainnya adalah *Compressed Air Energy Storage* (CAES), yaitu sistem yang menyimpan energi dalam bentuk udara bertekanan. Teknologi ini telah diterapkan di Huntorf, Jerman (290 MW) dan McIntosh, Alabama, Amerika Serikat (110 MW). Meskipun terbukti mendukung integrasi energi terbarukan, pengembangannya masih berfokus pada peningkatan efisiensi kompresor, turbin, dan material penyusun sistem (Zhang et al., 2024).

Selanjutnya, ada teknologi sistem penyimpanan energi gravitasi yakni, *Gravity Energy Storage* (GES) adalah teknologi penyimpanan energi berbasis gaya gravitasi yang telah diterapkan pada *Energy Vault* di Swiss dan *Gravity Power Station* di Inggris. Teknologi ini berpotensi mendukung energi terbarukan, namun masih memerlukan pengembangan untuk meningkatkan efisiensi sistem (Huggins, 2016).

Selain GES, terdapat teknologi *Pumped Hydro Storage* (PHS) yang menyimpan energi dengan memompa air ke reservoir yang lebih tinggi dan melepaskannya saat dibutuhkan. PHS merupakan teknologi penyimpanan energi terbesar dan paling matang dengan kapasitas terpasang sekitar 127-129 GW secara global. Meskipun memiliki efisiensi tinggi dan cocok untuk skala besar, penerapannya masih dibatasi oleh kebutuhan topografi dan sumber air yang sesuai, serta memerlukan investasi awal yang besar (Luo et al., 2015).

Salah satu teknologi penyimpanan energi yang berpotensi dikembangkan adalah *Compressed Air Gravity Energy Storage* (CA-GES), yaitu sistem yang menggabungkan konsep *Pumped Hydro Storage* (PHS), *Gravity Energy Storage* (GES), dan *Compressed Air Energy Storage* (CAES). Energi disimpan dalam bentuk energi potensial air dan udara terkompresi, kemudian pada proses pelepasan energi, udara bertekanan mendorong air menuju turbin untuk menghasilkan energi listrik. Penelitian sebelumnya oleh (Fawwaz et al., 2025; Ismawan et al., 2025; E. Saputra et al., 2025) memiliki potensi yang baik, penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kinerja sistem CA-GES masih memerlukan optimasi agar daya dan efisiensinya dapat ditingkatkan.

Maka dari itu, penelitian ini berfokus pada pengembangan sistem *Compressed Air-Gravity Energy Storage* (CA-GES) dengan mengubah posisi pipa dari konfigurasi horizontal pada penelitian terdahulu menjadi vertikal pada penelitian ini. Perubahan posisi pipa tersebut dilakukan untuk mengurangi kehilangan energi akibat *head loss* selama proses *discharging*. Selain itu, penelitian ini memvariasikan jumlah *blade* turbin crossflow sebanyak 21, 23, dan 25 *blade* untuk mengetahui pengaruh jumlah *blade* terhadap kinerja turbin. Pengujian dilakukan untuk menganalisis pengaruh perubahan posisi pipa dan variasi jumlah *blade* terhadap daya keluaran serta efisiensi sistem. Hasil penelitian diharapkan dapat menentukan jumlah *blade* yang paling optimal pada konfigurasi pipa vertikal sehingga mampu meningkatkan kinerja turbin dalam menghasilkan energi listrik pada sistem CA-GES.

1.2 Identifikasi Masalah

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

1. Menipisnya ketersediaan energi fosil serta meningkatnya pemanfaatan energi terbarukan mendorong perlunya sistem penyimpanan energi yang mampu menjaga kestabilan sistem kelistrikan.
2. Belum diketahui pengaruh perubahan posisi pipa dari horizontal menjadi vertikal terhadap kinerja proses *discharging* pada sistem *Compressed Air-Gravity Energy Storage* (CA-GES).
3. Belum diketahui pengaruh variasi jumlah *blade* terhadap kinerja turbin crossflow pada proses *discharging* sistem *Compressed Air-Gravity Energy Storage* (CA-GES).

1.3 Pembatasan Masalah

Untuk memfokuskan penelitian, beberapa batasan masalah ditetapkan sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan pada prototipe sistem *Compressed Air-Gravity Energy Storage* (CA-GES) skala laboratorium.
2. Pengujian *discharging* dilakukan untuk membandingkan konfigurasi posisi pipa horizontal pada penelitian terdahulu dengan konfigurasi pipa vertikal pada penelitian ini.
3. Pengujian *discharging* dilakukan menggunakan turbin crossflow dengan variasi jumlah *blade* 21, 23, dan 25.
4. Parameter yang dianalisis meliputi tekanan, laju aliran, tegangan, arus, daya listrik, energi, dan efisiensi sistem.

1.4 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh perubahan konfigurasi posisi pipa dari horizontal menjadi vertikal terhadap kinerja proses *charging* dan *discharging* pada sistem *Compressed Air-Gravity Energy Storage* (CA-GES)?

2. Bagaimana pengaruh variasi jumlah *blade* turbin crossflow sebanyak 21, 23, dan 25 terhadap kinerja proses *discharging* pada sistem *Compressed Air-Gravity Energy Storage* (CA-GES)?

1.5 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh perubahan konfigurasi posisi pipa dari horizontal pada penelitian terdahulu menjadi vertikal pada penelitian ini terhadap kinerja proses *charging* dan *discharging* sistem *Compressed Air-Gravity Energy Storage* (CA-GES).
2. Menganalisis pengaruh variasi jumlah *blade* turbin crossflow sebanyak 21, 23, dan 25 terhadap kinerja proses *discharging* sistem *Compressed Air-Gravity Energy Storage* (CA-GES).

1.6 Manfaat Penelitian

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

1. Memberikan informasi mengenai pengaruh perubahan konfigurasi posisi pipa terhadap kinerja proses *charging* dan *discharging* pada sistem *Compressed Air-Gravity Energy Storage* (CA-GES).
2. Menjadi referensi dalam menentukan jumlah *blade* turbin crossflow yang sesuai untuk meningkatkan kinerja proses *discharging* pada sistem *Compressed Air-Gravity Energy Storage* (CA-GES).
3. Memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem *Compressed Air-Gravity Energy Storage* (CA-GES), khususnya pada desain saluran aliran dan turbin crossflow untuk meningkatkan performa sistem penyimpanan energi.