

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sumber energi utama dunia mengalami evolusi mulai dari batu bara ke minyak sampai gas menjadi energi listrik. Selama masa industri satu abad yang lalu, penggunaan luas bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak, dan gas alam sangat mendukung pertumbuhan ekonomi dan sosial yang pesat. Tetapi, emisi karbon dioksida dari pembakaran bahan bakar fosil memicu efek rumah kaca, yang secara serius mengancam keberlanjutan pembangunan masyarakat [1].

Kekhawatiran yang semakin meningkat terhadap dampak yang ditimbulkan oleh bahan bakar fosil dan sistem produksi konvensional terhadap lingkungan, ekonomi, dan sosial telah menjadi pendorong utama bagi pergeseran menuju proses industri yang berkelanjutan dan menggunakan energi terbarukan. Industri saat ini mempergunakan sekitar 19% dari total konsumsi energi global, dengan sebagian besar berasal dari bahan bakar fosil seperti batu bara 17% dan gas alam 39%, serta energi terbarukan seperti biomassa 9% [2].

Saat ini, pasokan energi global masih didominasi oleh bahan bakar fosil. Namun, untuk mendukung pembangunan berkelanjutan, semakin banyak sumber energi terbarukan, seperti angin, matahari, dan lainnya, yang sedang dikembangkan dan dimanfaatkan. Meskipun energi terbarukan ini menghasilkan emisi karbon dioksida yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar fosil, daya yang dikeluarkan dari pembangkit listrik tenaga angin dan tenaga surya sangat meningkat akibat perubahan kondisi lingkungan. Dampaknya, integrasi skala besar energi angin dan surya ke dalam jaringan listrik menimbulkan tantangan besar terhadap keamanan dan stabilitas operasi sistem tenaga listrik [1].

Indonesia memiliki potensi energi baru terbarukan yang sangat besar. Mulai dari energi surya, angin, air, bio, panas bumi, dan kelautan, total potensinya mencapai 3.686 GW. Indonesia mempunyai banyak sekali lautan, maka arus laut,

ombak, bahkan pasang surut juga dapat diubah menjadi energi listrik. Pada tahun 2023 besar potensi energi yang diubah menjadi listrik sebesar 3.700 GW [3].

Indonesia telah mengalami kelebihan pasokan listrik sejak tahun 2015, dan diperkirakan kelebihan pasokan ini akan terus berlanjut di masa depan. Hal ini disebabkan adanya ketidaksesuaian antara perkiraan permintaan dan realisasi. Di satu sisi, jaminan ketersediaan energi sangat melimpah, namun dari sisi ekonomi, situasi kelebihan pasokan ini menimbulkan kerugian pada keuangan pemerintah. Kecukupan pasokan energi listrik juga mempengaruhi investasi energi baru terbarukan, karena secara otomatis menutup ruang lingkup pembangunan [4]. Energi terbarukan merujuk pada seluruh jenis kebutuhan energi, termasuk panas dan listrik, yang digunakan untuk keperluan masyarakat pedesaan, perkotaan, industri, dan transportasi [2]. Energi tersedia dalam beragam bentuk, antara lain radiasi, kimia, mekanis, potensi listrik, listrik, suhu tinggi, matahari, panas laten dan kinetik [5]. Indonesia memiliki beberapa teknologi penyimpanan energi yang sering diaplikasikan.

Battery energy storage system (BESS) adalah teknologi penyimpanan energi listrik yang paling diketahui oleh publik. Baterai terbuat dari logam litium, selain logam litium baterai juga menggunakan bahan lain seperti grafit untuk elektroda negatif, dan aluminium dan tembaga untuk penghantar listrik. Bahan lainnya seperti elektrolit, separator, dan pelindung juga digunakan dalam konstruksi baterai. Baterai mempunyai berbagai macam jenis seperti *lead-acid*, *nickel-cadmium* (Ni-Cd), *sodium sulphur* (Na-S), *nickel-metal hydride* (Ni-MH), dan *lithium-ion* (Li-ion). Baterai *lithium-ion* sering digunakan sebagai teknologi penyimpanan energi karena kepadatan energi, energi spesifik, dan karakteristik kinerjanya yang unggul dibandingkan dengan teknologi baterai lainnya [6].

Pumped hydroelectric energy storage (PHES) adalah penyimpanan energi hidroelektrik yang digunakan oleh sistem tenaga listrik untuk menyeimbangkan beban. Metode ini menyimpan energi dalam bentuk energi potensial gravitasi air, dipompa dari reservoir elevasi lebih rendah ke elevasi yang lebih tinggi. Teknologi PHES mampu menghasilkan daya tertinggi hingga 5 GW. Teknologi ini termasuk teknologi paling hemat biaya per siklus penyimpanan, namun teknologi PHES juga

memiliki beberapa kelemahan karena dampak sosio ekologisnya bisa lebih signifikan karena kepadatan penyimpanan energi yang rendah sehingga membutuhkan ruang yang sangat luas [7].

Compressed air energy storage (CAES) adalah teknologi penyimpanan energi udara tekan skala besar dan disimpan di bawah tanah atau gua yang dibuat di dalam batuan garam. Teknologi CAES menyimpan energi dengan cara memberikan tekanan pada udara ke dalam tanki reservoir khusus dan mengembangkannya dalam turbin udara yang digabungkan dengan generator listrik. Tanki penyimpanan juga memerlukan lokasi geografis yang sesuai seperti sumur minyak/gas yang sudah habis atau tambang garam. Kekurangannya dari teknologi penyimpanan ini membutuhkan lokasi yang sangat luas [8].

Tetapi dibalik kelebihan yang dimiliki oleh penyimpanan energi terbarukan sebelumnya ada beberapa kekurangan, seperti keamanan penggunaan dan limbahnya. Pada baterai lithium-ion sangat sensitif pada panas dan *overcharge*, suhu tinggi dan *overcharge* dapat menyebabkan menurunnya performa dan terbakarnya baterai. Kebakaran baterai lithium-ion biasanya disertai dengan korban jiwa dan kerusakan properti dikarenakan baterai lithium-ion menghasilkan banyak panas dan gas beracun selama pelarian termal [9]. Baterai lithium-ion memerlukan masa hidup yang panjang untuk pengaplikasiannya, dikarenakan tingkat self-discharge yang rendah, dan toleransi terhadap berbagai kondisi pengoperasian [5].

Pada penyimpanan daya hidroelektrik terpompa memiliki beberapa kelemahan karena dampak sosio-ekologisnya bisa lebih signifikan mengingat kepadatan penyimpanan energi yang rendah sehingga kebutuhan ruang meningkat [10]. Pada penyimpanan energi udara bertekanan memiliki kelemahan efisiensi energinya yang rendah dan terbatasnya lokasi pemasangan sistemnya.

Penyimpanan energi yang ada pada saat ini semua tergolong mahal dan sulit pada pengaplikasiannya. Contohnya seperti baterai, baterai menggunakan komponen logam litium yang dimana cara mendapatkannya sangatlah susah sekali juga dengan penggunaannya yang akan merusak lingkungan alam. Selain dari segi komponennya biaya perolehan sistem penyimpanan energi bisa di atas \$1.000/kWh.

Hal ini terjadi ketika menginginkan kapasitas, efisiensi, dan daya tahan yang tinggi. Walaupun dikatakan bahwa investasi ini diperoleh dari penghematan energi selama masa pakai sistem, banyak sistem penyimpanan energi juga berpengaruh oleh umur pemakaian yang pendek, dan mungkin rentan terhadap penurunan nilai dan efisiensi. Tingginya biaya sistem penyimpanan energi juga berpengaruh terhadap pertumbuhan teknologi energi terbarukan, karena sebagian besar teknologi terbarukan memerlukan baterai untuk menyimpan listrik yang dihasilkan [11].

Topik penelitian ini sudah dilakukan penelitian oleh beberapa peneliti dengan variasi yang berbeda-beda, salah satunya Raggio & Ferrari [12] melakukan penelitian pada analisis dinamis dan hambatan operasional dalam pengembangan *compressed air energy storage* (CAES) generasi kedua menggunakan turbin mikro T100. Dalam penelitian tersebut meningkatkan efisiensi sumber daya terbarukan, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, mengelola biaya energi, serta menyediakan solusi penyimpanan energi yang lebih fleksibel dengan mempertimbangkan kendala operasional untuk mengurangi risiko pada mikroturbin dalam situasi dinamis. Kemudian pada penelitiannya Ma et al [13] melakukan penelitian pada sistem *wave-driven compressed air energy storage* (W-CAES) yang mengkonverter energi gelombang pelampung dengan penyimpanan energi udara terkompresi. Pada penelitian tersebut terdapat penurunan efisiensi dan daya penyimpanan energi. Sedangkan Migliari et al [14] melakukan penelitian pada analisis sistem PV-H₂ CAES yang dapat mengurangi kendala energi fotovoltaik surya hingga 4% per tahun, meningkatkan efisiensi sistem hingga 62%, dan menghasilkan daya inersia hingga 20% lebih banyak di malam hari. Selain itu Bartela melakukan penelitian dengan menggabungkan konsep inovatif sistem penyimpanan energi dengan menggunakan udara bertekanan dan hidrogen sebagai sumber energi, yang dapat diubah menjadi gas alam sintetis. Sistem ini menggunakan poros tambang batu bara yang ditinggalkan sebagai tangki udara bertekanan berkapasitas tinggi hingga 50.000 m³ dan integrasi termal sistem CAHES dengan pembangkit listrik tenaga batu bara. Namun evaluasi komprehensif terhadap sistem ini masih memerlukan analisis ekonomi dan teknis yang lebih rinci termasuk simulasi untuk menilai kinerja sistem CAHES secara keseluruhan [15].

Dari berbagai kekurangan yang dimiliki penyimpanan energi terbarukan sebelumnya sebagai *energy storage system* dibutuhkan alternatif *energy storage system* yang lebih ramah lingkungan dan aman bagi kesehatan manusia, sehingga penggunaan energi terbarukan bisa digunakan secara maksimal dan efisien tanpa harus merusak lingkungan dan kesehatan bagi manusia. Penggunaan *gravity energy storage* memiliki potensi sebagai alternatif *battery energy storage*, namun teknologi penyimpanan ini memiliki kekurangan yaitu karena volume ketinggian yang harus memerlukan lahan yang luas untuk penempatannya. Sistem CAES memberikan solusi terkait lokasi dan dimensi yang lebih kecil untuk penempatannya dikarenakan dengan bantuan sistem udara yang di pompa dengan udara bertekanan tinggi, namun tekanannya akan sangat tinggi karena udara yang terkompresi dan saat fase ekspansi suhu panasnya akan hilang, udara dingin tidak efektif untuk menghasilkan energi sebelum dipanaskan terlebih dahulu, selain itu juga ada potensi kebocoran jika energi disimpan terlalu lama dengan adanya kebocoran itu termasuk kerugian atau biasa disebut energi loss.

Oleh karena itu, pada penelitian ini akan mencoba untuk proses manufaktur dan membangun sistem *discharging* prototipe *compressed air gravity energy storage* (CA-GES) serta mengujinya apakah (CA-GES) mampu digunakan sebagai *energy storage* yang lebih aman dan ramah lingkungan. Yang dimana dalam penelitian ini akan menggabungkan sistem penyimpanan *pumped hydro energy storage* (PHES), *compressed air energy storage* (CAES) dan *gravity energy storage* (GES).

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan di atas, maka identifikasi masalah dari penelitian ini yaitu:

1. Sumber energi fosil dan minyak bumi semakin menipis.
2. Energi terbarukan sudah mulai marak digunakan sehingga kebutuhan sistem penyimpanan energi semakin tinggi.
3. Sistem penyimpanan energi yang sering digunakan kurang ramah bagi lingkungan dan kesehatan manusia.

1.3 Batasan Masalah

Supaya penelitian ini terfokus maka ada beberapa batasan masalah yang diberikan, yaitu:

1. Penggunaan prototipe *compressed air gravity energy storage* sebagai penyimpanan energi solar panel.
2. Proses manufaktur sistem *discharging compressed air gravity energy storage* sebagai jalur output dari penyimpanan energi *compressed air gravity energy storage*.
3. Pengujian sistem *discharging compressed air gravity energy storage*.

1.4 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang sudah disampaikan, rumusan masalah yang dapat disampaikan, adalah:

1. Bagaimana proses manufaktur prototipe *compressed air gravity energy storage*?
2. Apakah prototipe *compressed air gravity energy storage* bisa digunakan menjadi *energy storage system*?
3. Bagaimana sistem kerja *discharging* pada prototipe *compressed air gravity energy storage*?

1.5 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini, adalah:

1. Mengetahui proses manufaktur sistem *discharging* pada prototipe *compressed air gravity energy storage*.
2. Untuk menguji sistem *discharging* pada prototipe *compressed air gravity energy storage*.
3. Untuk mengetahui kelayakan sistem *discharging* pada *prototipe compressed air gravity energy storage* sebagai penyimpanan energi solar panel.

1.6 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat seperti:

1. Memberikan wawasan kepada penulis dan pembaca tentang *energy storage* sistem dan cara kerjanya.
2. Memberikan kesempatan untuk proses manufaktur sistem *discharging* pada prototipe *compressed air gravity energy storage* sebagai media penyimpanan energi solar panel.
3. Melalui penelitian ini diharapkan mampu memberikan salah satu solusi dari permasalahan penyimpanan energi terbarukan yang sudah semakin marak.

