

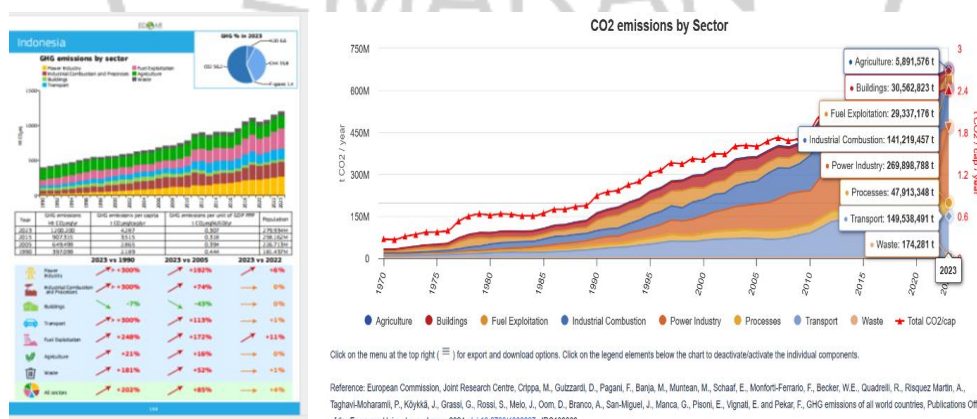
BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

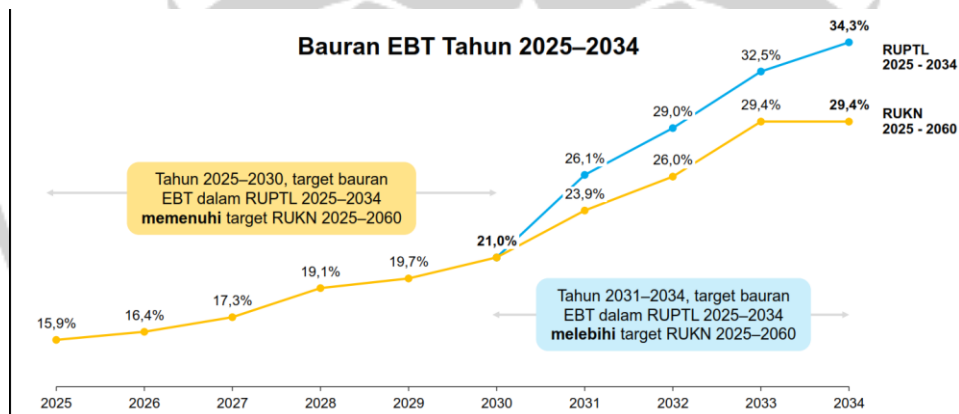
Dalam tiga (3) tahun terakhir, Indonesia telah mengalami pertumbuhan ekonomi yang stabil dan kuat, dengan rata-rata pertumbuhan Produk Domestik Bruto (PDB) tahunan sekitar 5%. Pada tahun 2022, ekonomi tumbuh sebesar 5,31%, diikuti oleh pertumbuhan 5,05% pada tahun 2023, dan 5,03% pada tahun 2024 (Badan Pusat Statistik, 2025; Sekretariat Kabinet Republik Indonesia, 2024). Hal ini tentunya berdampak pada meningkatnya pertumbuhan konsumsi energi listrik. Pada tahun 2022, konsumsi listrik tercatat sebesar 1.173 kWh per kapita, kemudian meningkat menjadi 1.285 kWh per kapita pada tahun 2023 (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2023). Pada tahun 2024, angka ini kembali naik menjadi 1.337 kWh per kapita, menandai tingkat konsumsi tertinggi dalam lima tahun terakhir (*GoodStats*, 2024).

Korelasi antara pertumbuhan ekonomi dan konsumsi listrik sangat jelas. Seiring dengan ekspansi ekonomi, aktivitas industri semakin meningkat, menyebabkan kebutuhan energi yang lebih besar. Pola ini sesuai dengan pemahaman bahwa konsumsi energi tidak hanya menjadi pendorong tetapi juga indikator perkembangan ekonomi. Namun, meskipun peningkatan konsumsi listrik mendukung pertumbuhan ekonomi, hal ini juga menimbulkan tantangan terkait keberlanjutan energi dan dampak lingkungan. Berdasarkan data *European Commission* tahun 2024, emisi gas rumah kaca Indonesia terus meningkat hingga mencapai 1.020 Mt CO₂eq pada tahun 2023, dengan kontribusi terbesar berasal dari sektor pembangkit listrik dan transportasi.



Gambar 1.1 Tren Emisi Gas Rumah Kaca Indonesia per Sektor (1970–2023)
(European Commission, 2024)

Menyadari tantangan tersebut, Indonesia berkomitmen untuk beralih menuju sumber energi yang lebih berkelanjutan dan terbarukan untuk mengurangi emisi Gas Rumah Kaca (GRK) sesuai dengan komitmen global di bawah Kesepakatan Paris (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2021), salah satunya dengan meningkatkan rasio penggunaan Energi Baru dan Terbarukan (EBT) sesuai dengan target Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional tahun 2025 bahwa di tahun 2025 adalah 15,9% dan menjadi 29,4% di tahun 2034, dengan kondisi saat ini rasio penggunaan EBT adalah 16,3% (Kementerian ESDM, 2025). Oleh karena itu, fokus pemerintah saat ini melakukan pembangunan infrastruktur ketenagalistrikan yang berbasis EBT.



Gambar 1.2 Target Rasio penggunaan EBT sesuai dengan RUKN
(Kementerian ESDM, 2023)

Salah satu pembangkit EBT yang didorong pengembangannya adalah PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya), dengan potensi di Indonesia sebesar sekitar 207.898 MW, sementara

kapasitas terpasang saat ini baru sekitar 495 MW (Kementerian ESDM, 2023). Namun demikian Pembangunan PLTS konvensional membutuhkan lahan yang luas, yang berpotensi menggerus pertanian, perkotaan, serta upaya konservasi lingkungan (*International Renewable Energy Agency*, 2023). Untuk menghadapi tantangan tersebut, Pembangkit Listrik Tenaga Surya Terapung (PLTS Apung) muncul sebagai alternatif yang menjanjikan karena menawarkan dua keunggulan utama, yaitu pemanfaatan lahan yang lebih efisien serta peningkatan unjuk kerja. Dengan memanfaatkan badan air seperti waduk, danau, dan bendungan, PLTS Apung dapat mengurangi kebutuhan penggunaan lahan yang luas sekaligus mendapatkan manfaat dari efek pendinginan alami air, sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi panel surya (*Sahu et al.*, 2018). Selain itu, PLTS Apung juga dapat membantu mengurangi evaporasi air dan menekan pertumbuhan alga, sehingga turut mendukung pengelolaan sumber daya air yang lebih berkelanjutan (*Cazzaniga et al.*, 2018).

Perkembangan teknologi modul surya turut memperkuat daya tarik PLTS Apung, khususnya melalui modul surya bifasial (*bifacial*) yang mampu menyerap radiasi dari kedua sisi permukaannya. Pada instalasi terapung di atas permukaan air, pantulan radiasi dari permukaan air menambah perolehan energi sisi belakang modul, sehingga konfigurasi bifasial berpotensi menghasilkan energi lebih tinggi dibandingkan modul monofasial konvensional pada luasan panel yang setara. Di sisi lain, integrasi sistem PLTS dengan penyimpanan energi baterai (*Battery Energy Storage System, BESS*) memungkinkan pergeseran waktu penyaluran daya (*power-shifting*), yaitu menyimpan kelebihan produksi di siang hari kemudian digunakan pada waktu tertentu misalnya pada saat beban puncak.

Selain PLTS, salah satu pembangkit EBT yang memiliki potensi besar adalah PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air). Indonesia memiliki potensi energi hidro sekitar 94,5 GW, namun kapasitas terpasang saat ini baru sekitar 6.688 MW (Kementerian ESDM, 2023). Rencana pengembangan PLTA mencakup proyek-proyek besar seperti PLTA Kayan (9.000 MW) di Kalimantan Utara dan PLTA Mentarang Induk (1.375 MW) yang diharapkan menjadi tulang punggung transisi energi hijau di kawasan tersebut. Di sisi lain daerah seperti Sumatera, Jawa dan Sulawesi juga memiliki potensi tenaga air yang besar berkat sumber daya air yang melimpah dan kondisi topografi yang mendukung, (*International Hydropower Association*, 2021). Di antara berbagai teknologi pembangkit listrik tenaga air tersebut adalah PLTA *Pumped Storage* (PLTA PS) merupakan salah satu pembangkit yang dapat menyimpan energi berskala besar yang relevan dan dapat diandalkan untuk menjaga stabilitas jaringan listrik dengan penetrasi energi terbarukan

yang tinggi (Denholm et al., 2021). *PLTA PS* beroperasi berdasarkan siklus tertutup yang memanfaatkan dua reservoir air pada ketinggian yang berbeda. Selama periode beban listrik rendah, kelebihan daya dari jaringan digunakan untuk memompa air dari reservoir bawah ke reservoir atas. Sebaliknya, ketika terjadi beban puncak, air yang tersimpan dilepaskan melalui turbin untuk menghasilkan listrik (Pérez-Díaz et al., 2015). Mekanisme ini tidak hanya meningkatkan stabilitas jaringan transmisi tetapi juga meningkatkan kelayakan ekonomi investasi energi terbarukan dengan mengurangi kelebihan energi pada siang hari dan ketergantungan pada pembangkit listrik berbasis bahan bakar fosil (Kougias et al., 2019). Selain itu, kemajuan dalam teknologi turbin pompa reversibel serta sistem Sistem jaringan transmisi cerdas (*smart grid*) telah meningkatkan efisiensi dan keandalan operasi *PLTA PS*, menjadikannya lebih kompetitif dibandingkan dengan solusi penyimpanan energi berbasis baterai yang sedang berkembang (Gimeno-Gutiérrez & Lacal-Arántegui, 2013). Secara global, *PLTA PS* telah banyak diadopsi di negara-negara seperti Tiongkok, Amerika Serikat, dan Jepang, yang mana pada sistem *PLTA PS* skala besar berkontribusi secara signifikan terhadap kapasitas penyimpanan energi (Yang et al., 2020).

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan pembahasan tersebut diatas, tantangan utama dalam pemanfaatan *PLTS* adalah terkait ketersediaan lahan. Untuk membangun satu (1) MegaWatts *PLTS* dibutuhkan lahan sekitar satu (1) ha, sebagai perbandingan bahwa membangun Pembangkit Listrik Tenaga Uap (*PLTU*) 1000 MW dibutuhkan lahan sekitar 100 ha. Oleh Karena itu teknologi *PLTS* Apung merupakan solusi dalam mengatasi hal tersebut. Di sisi lain dalam pembangunan *PLTA PS* yang menggunakan reservoir masih memiliki area waduk yang cukup luas untuk dapat dipasang *PLTS* Apung. Atas dasar tersebut pengembangan *PLTS* Apung dalam rencana pembangunan *PLTA PS* di waduk tersebut merupakan upaya strategis untuk menggabungkan kedua sumber daya EBT dalam suatu area. Penelitian ini berhipotesis bahwa *PLTS* Apung yang dibangun di waduk *PLTA PS* dapat menghasilkan energi listrik yang dapat disalurkan ke sistem kelistrikan di Pacitan ataupun digunakan untuk membantu peralatan di *PLTA PS*.

Dalam RUPTL 2025 - 2034 terdapat rencana pengembangan *PLTA PS* Di Jawa Timur dengan kapasitas 1.000 MW (4×250 MW) yang berlokasi di Kabupaten Pacitan dan memanfaatkan Sungai Grindulu, yang direncanakan akan dimulai konstruksinya pada 2028 dengan target

beroperasi pada 2033. Dengan adanya PLTA PS ini maka akan memanfaatkan kelebihan beban di sistem 500 kV Jawa bali yang pada umumnya berlebih pada dini hari sampai siang hari dan dimanfaatkan untuk proses *pumping*, sementara malam harinya pada saat beban puncak akan dimanfaatkan untuk memtura turbin sehingga menghasilkan listrik. PLTA PS ini akan mensuplai Daya ke GITET 500 kV Pedan.

Penelitian ini akan mengkaji dua skenario: pertama PLTS Apung digunakan untuk membantu sistem kelistrikan 20 kV Pacitan (*grid only*), sementara itu pada skenario kedua PLTS akan dilengkapi dengan *BESS* yang mana pada siang hari PLTS Apung ini akan membantu sistem kelistrikan 20 kV Pacitan dan mengisi baterai. Sementara itu pada dini hari baterai akan dilepas untuk mensuplai listrik peralatan bantu PLTA PS pada saat proses *pumping*. Masing-masing skenario dievaluasi dalam varian teknologi modul monofasial dan bifasial, sehingga secara keseluruhan terdapat empat konfigurasi (*monofasial grid-only*, *bifasial grid-only*, *monofasial+BESS*, dan *bifasial+BESS*).

Secara khusus, penelitian ini menduga bahwa konfigurasi bifasial memberikan perolehan energi tahunan tertinggi pada skenario *grid-only*, sedangkan konfigurasi berbaterai (*BESS*) meskipun energi yang disalurkan tidak sebesar skenario *grid only*, namun dapat membantu memasok daya pada alat bantu (*auxilliary*) pada saat proses *pumping*. Di sisi lain, skenario penggunaan *BESS* akan lebih mnearik dari segi finansial karena mengacu pada regulasi terbaru terkait tarif tenaga listrik. Selain itu, keempat konfigurasi diduga dapat mengurangi emisi gas rumah kaca yang signifikan serta manfaat konservasi air melalui pengurangan evaporasi permukaan waduk.

Penelitian ini akan dikaji dari aspek kapasitas, kontribusi energi yang dihasilkan, aspek ekonomi, dan aspek lingkungan. Dari perumusan masalah tersebut, beberapa pertanyaan yang dapat diajukan agar penelitian studi pengembangan PLTS Apung pada rencana pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Air *Pump Storage Jawa Timur* dapat lebih terarah antara lain sebagai berikut :

1. Bagaimana perbandingan produksi energi, performance ratio, dan rugi - rugi dari keempat konfigurasi PLTS Apung (monofasial dan bifasial, masing-masing dengan dan tanpa *BESS*) yang disimulasikan pada lokasi reservoir?

2. Seberapa besar tambahan perolehan energi teknologi bifasial radiasi sisi panel bagian belakang?
3. Bagaimana gambaran aspek finansial (kelayakan investasi) sehingga dapat memenuhi aspek nilai ekonomis?
4. Bagaimana dampak integrasi PV + BESS untuk auxilliary system PLTA PS dari aspek kapasitas, produksi energi dan kelayakan investasi
5. Seberapa besar neraca pengurangan emisi gas rumah kaca (CO_2) siklus hidup yang dihasilkan keempat konfigurasi, dan bagaimana intensitas emisinya dibandingkan pembangkit fosil?
6. Seberapa besar mitigasi evaporasi waduk yang diperoleh dari tutupan permukaan air oleh PLTS Apung, dan bagaimana kontribusi volume air terkonservasi tersebut bagi ketersediaan air PSHP yang berada di lokasi yang sama?

1.3. Tujuan Penelitian.

Penelitian mengenai pengembangan PLTS Apung pada rencana pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Air Pump Storage Jawa Timur mempunyai tujuan sebagai berikut :

1. Melakukan simulasi kinerja produksi energi, *Performance Ratio*, dan rugi rugi dari keempat konfigurasi PLTS Apung (monofasial dan bifasial, masing-masing dengan dan tanpa BESS) yang dipasang pada waduk PLTA PS;
2. Menghitung tambahan energi yang dihasilkan dari proses radiasi di sisi panel bagian belakang modul bifasial;
3. Melakukan simulasi aspek kelayakan finansial dari parameter *Levelized Cost of Energy (LCOE)*, *Net Present Value (NPV)*, *Internal Rate of Return (IRR)*, *Profitability Index (PI)*, dan *Benefit Cost Ratio (BCR)*, dari keempat konfigurasi tersebut;
4. Mengevaluasi dampak integrasi PV + BESS dalam pembangunan PLTA PS dari aspek kapasitas, produksi energi dan kelayakan investasi
5. Mengevaluasi neraca reduksi emisi gas rumah kaca (CO_2) siklus hidup keempat konfigurasi PLTS Apung serta intensitas emisinya dibandingkan dengan pembangkit fosil
6. Mengevaluasi mitigasi evaporasi waduk akibat tutupan permukaan air oleh PLTS Apung serta kontribusi volume air terkonservasi tersebut bagi ketersediaan air PSHP yang berada di lokasi yang sama

1.4. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagi pemerintah, penelitian ini dapat menjadi masukan dalam pengembangan PLTA PS yang masih terdapat potensi pemanfaatan di resevorir sehingga dapat dijadikan acuan dalam pengembangan PLTA PS ke depannya;
2. Bagi dunia akademik, yaitu dapat meningkatkan literatur ilmiah terkait berbagai macam pembangkit EBT dalam satu kawasan;
3. Bagi masyarakat, penelitian ini dapat memberikan gambaran dan informasi terkait pengembangan pembangkit PLTA PS dan PLTS Apung di Jawa Timur;
4. Sebagai gambaran bahwa pembangkit EBT masih memiliki tingkat kelayakan finansial yang menarik.

1.5. Originalitas Penelitian

No.	Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Penelitian
1	Luyao Liu, Qie Sun, Hailong Li, Hongyi Yin, Xiaohan Ren, Ronald Wennerste (2019)	<i>Evaluating the benefits of Integrating Floating Photovoltaic and Pumped Storage Power System</i>	Penelitian berfokus kepada integrasi PLTS Apung berkapasitas 2 GW dengan 1 GW PLTA PS dengan menghasilkan energi listrik yang lebih serta mengurangi energy imbalance sebesar 23 MW. Disisi lain, integrasi PLTS Apung juga berperan dalam mengurangi evaporasi air sebesar 19,06 juta m3.	Penelitian hanya berfokus pada energi yang dihasilkan dalam setahun dan pengurangan evaporasi saja. Belum terdapat kajian terkait desain PLTS Apung yang sesuai serta kajian kelayakan finansial, serta kajian lingkungan terkait dampaknya terhadap pengurangan CO2
2	Mahmud Wasfi (2011)	<i>Solar Energy and Photovoltaic System</i>	Spektrum energi matahari cukup luas dan intensitasnya bervariasi sesuai dengan waktu hari dan lokasi geografis, sehingga ditinjau konversi energi matahari menjadi listrik dengan penekanan khusus pada sistem	Konversi energi matahari menjadi listrik baru ditinjau dari cara penyimpanan energinya saja.

			fotovoltaik, sel surya dan cara menyimpan listrik.	
3	<i>Javier Aparicio-Bermejo, Claudia Rodríguez-Fernández, Arsenio Barbón, Luis Bayón (2024)</i>	<i>Evaluating the Potential of Floating Photovoltaic Plants in Pumped Hydropower Reservoirs in Spain</i>	Penelitian berfokus pada asesmen terkait potensi integrasi PLTS Apung di berbagai lokasi PLTA PS di Spanyol dari segi GHI index, rasio area,asio area pumping, dan volume air yang dipompa dalam sehari.	Penelitian tidak berfokus ke satu lokasi sehingga tidak dapat diketahui secara detail terkait desain PLTS yang optimal, analisa finansial dan lingkungan.
4	Dimas Bangun Fiddiansyah, Dimas Kaharudin (2024)	<i>The Planning Study of 145 MW Grid Connected Cirata's Floating PV to Support the Security of Supply in Jawa Bali Power Systems</i>	Penelitian studi integrasi PLTS Apung pada PLTA Cirata hanya berfokus pada studi terkait desain PLTS yang digunakan, Energi yang dihasilkan dalam setahun serta studi terkait stabilitas sistem jaringan 150 kV maupun 500 kV.	Penelitian ini belum membahas aspek kelayakan finansial, serta aspek lingkungan dari sisi pengurangan CO2 dan pengurangan evaporasi.
5.	<i>Elyas Rakhshani, Kumars Rouzbehi, dkk (2019)</i>	<i>Integration of Large Scale PV-Based Generation into Power Systems: A Survey</i>	Penelitian tentang analisis kontrol jaringan listrik dengan pembangkit listrik PV skala jaringan serta konsekuensi dari integrasi skala jaringan unit PV ke sistem tenaga. Berbagai hasil dari jaringan berdaya tembus tinggi dengan PV seperti kualitas daya, kontrol daya aktif-reaktif, perlindungan dan keandalan dalam berbagai kondisi pembebanan ditinjau dan didiskusikan.	Pembahasan integrasi skala jaringan unit pembangkit PV ke sistem hanya ditinjau dari analisis kontrol saja.

Penilitain ini dilakukan karena penelitian - penelitian sebelumnya belum terdapat evaluasi secara komprehensif terkait dengan pengembangan PLTS Apung. Umumnya para peneliti terdahulu hanya membahas satu atau dua aspek saja, seperti produksi energi-keekonomian atau produksi energi-lingkungan serta keuntungan maupun studi stabilitas kelistrikan jika penterasi PLTS Apung diterapkan. Maka dari itu, dalam penelitian kali ini akan lebih mendalam terkait aspek produksi energi, aspek desain, aspek finansial serta aspek lingkungan seperti pengurangan Gas Rumah Kaca dan Evaporasi