

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perubahan iklim global, yang ditandai dengan meningkatnya suhu rata-rata bumi, intensitas cuaca ekstrem, serta tingginya konsentrasi gas rumah kaca (GRK), mendorong perlunya peralihan sistem energi dari berbasis fosil menuju energi yang lebih bersih dan berkelanjutan. Sektor energi menjadi penyumbang emisi terbesar, terutama dari pembangkit listrik berbahan bakar fosil. Oleh karena itu, pengembangan energi terbarukan menjadi strategi penting untuk mencapai target dekarbonisasi dan mendukung komitmen Indonesia dalam *Paris Agreement* serta target *Net Zero Emission* (NZE) tahun 2060.

Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang paling menjanjikan karena ketersediannya melimpah, modularitas tinggi, serta biaya teknologi yang terus menurun. Menurut *International Energy Agency* (2022), dalam dua dekade terakhir, kapasitas pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) tumbuh secara eksponensial dan menjadi salah satu teknologi energi terbarukan dengan laju pertumbuhan tercepat di dunia (International Energy Agency, 2022).

Di Indonesia, potensi energi surya diperkirakan mencapai lebih dari 200 GWp, namun pemanfaatannya masih di bawah 1% dari total kapasitas terpasang (Kementrian ESDM, 2021). Hal ini menunjukkan adanya peluang besar untuk pengembangan PLTS, baik skala utilitas, komersial, maupun industri. Pemanfaatan PLTS pada sektor industri strategis, seperti *H2 plant*, sangat relevan mengingat kebutuhan energi listrik yang tinggi dan berkelanjutan.

Meskipun demikian, salah satu tantangan utama dari PLTS adalah sifatnya yang *intermittent* atau tidak tetap. Produksi listrik PLTS sangat bergantung pada intensitas radiasi matahari, siklus harian, serta kondisi cuaca yang variatif. Hal ini menyebabkan fluktuasi daya yang dapat mempengaruhi keandalan operasi sistem, terutama jika PLTS

digunakan untuk memasok beban kritis seperti unit produksi hidrogen berbasis elektrolisis.

Untuk mengatasi permasalahan *intermittent* tersebut, teknologi *Battery Energy Storage System* (BESS) menjadi solusi yang sangat penting. BESS berperan sebagai media penyimpanan energi yang dapat menyeimbangkan antara produksi PLTS dengan kebutuhan beban, meningkatkan fleksibilitas, serta menjaga kontinuitas operasi saat terjadi penurunan intensitas matahari. Penelitian oleh (Divya & Østergaard, 2009) menegaskan bahwa integrasi BESS dengan PLTS mampu meningkatkan stabilitas sistem serta mengurangi ketergantungan pada energi fosil. Temuan ini diperkuat oleh (Hasan & Serra Altinoluk, 2023) yang menyoroti prospek kontrol baterai terkini dalam sistem PLTS-BESS, yang dinilai semakin krusial dalam memastikan keandalan sistem di masa depan.

Penggunaan BESS juga memungkinkan strategi optimasi seperti *reserve State of Charge* (SOC), *oversizing* kapasitas PLTS dan manajemen beban agar operasi sistem tetap handal meskipun terjadi cuaca mendung atau penurunan *irradiance*. Hal ini sangat krusial bagi *H2 plant*, dimana kestabilan suplai listrik berhubungan langsung dengan konsistensi produksi gas hidrogen. Studi terbaru oleh (Walichnowska dkk., 2025) bahkan menegaskan bahwa keberadaan penyimpanan energi mampu meningkatkan efisiensi sistem fotovoltaik sekaligus menurunkan jejak karbon rumah tangga, sehingga semakin memperkuat urgensi integrasi PLTS dengan BESS.

Di Indonesia, penelitian mengenai integrasi PLTS dengan BESS telah banyak dilakukan. Misalnya, penelitian oleh (Azahra dkk., 2020) sebuah studi kasus di Indonesia Timur menunjukkan bahwa konfigurasi hibrida disesel-PV-BESS dapat memperbaiki stabilitas serta menurunkan biaya operasi dibandingkan sistem berbasis diesel murni. Laporan resmi (Kementrian ESDM, 2020) juga menekankan bahwa penetrasi PLTS skala besar akan lebih optimal bila dikombinasikan dengan sistem penyimpanan energi. Penelitian mutakhir oleh (Rendroyoko dkk., 2024) turut menegaskan relevansi integrasi PLTS pada sistem kelistrikan di kawasan timur Indonesia, dimana penggunaan optimasi *unit commitment* dapat meningkatkan fleksibilitas *microgrid* berbasis energi terbarukan.

Studi terdahulu oleh (Merei dkk., 2016) menyoroti pentingnya strategi optimasi desain dalam menentukan kapasitas optimal antara PLTS dan BESS agar biaya operasional dapat ditekan sekaligus menjamin keandalan sistem. Walaupun penelitian ini fokus pada aspek ekonomi, pendekatan serupa dapat diadaptasi dalam konteks teknis murni, terutama untuk mencapai target operasi beremisi rendah. Penelitian terbaru oleh (Aydın & Gezegin, 2024) yang melakukan studi kelayakan PLTS-hidro *hybrid* menggunakan PVsyst juga menunjukkan bagaimana peran *software* simulasi dalam menghasilkan rancangan yang optimal dari sisi teknis dan ekonomi.

Software PVsyst menjadi salah satu alat yang banyak digunakan dalam perancangan dan simulasi PLTS. PVsyst mampu melakukan analisis teknis seperti estimasi produksi energi tahunan, pengaruh *shading*, optimalisasi sudut *tilt*, serta simulasi integrasi dengan sistem penyimpanan energi. Menurut (Guerrero dkk., 2025) menunjukkan bahwa hasil simulasi PVsyst memiliki tingkat kesesuaian yang baik dengan data pengukuran dari tiga sistem fotovoltaik berbasis silikon, sehingga mengonfirmasi kredibilitas PVsyst dalam merepresentasikan kinerja nyata PLTS.

Dalam konteks *H2 plant*, integrasi PLTS dengan BESS bukan hanya persoalan teknis kelistrikan, tetapi juga berkaitan dengan strategi transisi energi nasional. Hidrogen dipandang sebagai salah satu *carrier* energi bersih yang dapat digunakan untuk sektor industri, transportasi, maupun pembangkit listrik di masa depan. Oleh karena itu, desain PLTS dengan BESS untuk *H2 plant* diharapkan tidak hanya menurunkan emisi tetapi juga memperkuat *roadmap* hidrogen Indonesia.

Selain urgensi akademis dan nasional tersebut, kondisi aktual di PT. PLN Nusantara Power Unit Pembangkitan Gresik menunjukkan langkah konkret dalam implementasi energi bersih melalui pembangunan *Green Hydrogen Plant*. Fasilitas *H2 plant* di UP Gresik saat ini telah didukung oleh sistem PLTS *On-Grid* berkapasitas 50,6 kWp. PLTS ini dibangun di area *rooftop* dan beroperasi secara paralel dengan sistem jaringan PLN untuk memasok sebagian kebutuhan energi listrik proses elektrolisis hidrogen. Berdasarkan data operasional *H2 plant*, kebutuhan energi listrik rata-rata mencapai sekitar 61,6 MWh per bulan, setara dengan daya ± 165 kW. Dari total kebutuhan tersebut, hanya 50,6 kWp yang secara langsung disuplai dari energi terbarukan (PLTS *On-Grid*).

Sementara itu, kekurangannya pada periode awal operasional ditutup melalui pembelian *Sertifikat Renewable Energy Certificate* (REC) dari PLN untuk memastikan bahwa seluruh proses produksi hidrogen dikategorikan sebagai *green hydrogen*.

Namun, sertifikat REC tersebut hanya berlaku hingga November 2023, sehingga setelah masa berlaku berakhir, suplai listrik dari sumber energi terbarukan berkurang dan status “*green hydrogen*” tidak lagi sepenuhnya terpenuhi tanpa adanya penambahan kapasitas PLTS atau integrasi sistem penyimpanan energi. Kondisi ini memperkuat urgensi penelitian Optimasi Desain PLTS *On-Grid* Terintegrasi BESS untuk Produksi Hidrogen Hijau Berbasis PVsyst di PT. PLN Nusantara Power UP Gresik, agar sistem PLTS yang ada dapat ditingkatkan secara teknis untuk memperbesar porsi energi terbarukan, mengurangi ketergantungan pada sertifikat REC, serta menjaga kontinuitas suplai listrik pada proses elektrolisis hidrogen. Melalui pendekatan simulasi teknis berbasis *software* PVsyst, rancangan sistem PLTS dengan BESS yang optimal diharapkan mampu menghasilkan peningkatan kontribusi energi hijau dan mendukung transisi energi berkelanjutan menuju *net zero emission*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan kondisi aktual *H2 plant* di PT. PLN Nusantara Power UP Gresik yang telah memiliki PLTS *on-grid* berkapasitas 50,6 kWp dan pemanfaatan sertifikat REC dari PLN, maka diperlukan kajian optimasi desain PLTS dengan BESS agar kontribusi energi terbarukan dapat ditingkatkan secara berkelanjutan. Agar penelitian ini terarah, maka dirumuskan permasalahan sebagai berikut :

1. Bagaimana potensi radiasi surya di wilayah PT. PLN Nusantara Power UP Gresik dapat dimanfaatkan secara optimal untuk mendukung kebutuhan energi listrik *H2 plant*?
2. Bagaimana peran integrasi *Battery Energy Storage System* (BESS) dalam menjaga keandalan suplai listrik dari PLTS agar operasi *H2 plant* tetap stabil meskipun terjadi variabilitas cuaca?

3. Bagaimana hasil simulasi teknis menggunakan *software* PVsyst dalam menentukan kapasitas optimal PLTS dan BESS yang sesuai dengan kebutuhan *H2 plant* di PT. PLN Nusantara Power UP Gresik?
4. Bagaimana strategi operasi sistem PLTS dan BESS, termasuk penerapan *reserve State of Charge* (SOC) dan *oversizing* kapasitas PLTS, untuk menjamin kontinuitas suplai listrik dengan kebijakan minimalisir ekspor ke PLN serta impor hanya pada kondisi darurat?

1.3 Tujuan Penelitian

Sejalan dengan rumusan masalah yang telah dipaparkan, penelitian ini bertujuan untuk memberikan jawaban yang sistematis dan terarah terhadap permasalahan yang diidentifikasi. Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis potensi radiasi surya di wilayah PT. PLN Nusantara Power UP Gresik serta menilai kelayakannya untuk mendukung kebutuhan energi listrik *H2 plant*.
2. Mengevaluasi peran integrasi *Battery Energy Storage System* (BESS) dalam menjaga keandalan suplai listrik dari PLTS, khususnya untuk menjamin kestabilan operasi *H2 plant* pada kondisi variabilitas cuaca.
3. Melakukan simulasi teknis menggunakan *software* PVsyst untuk menentukan kapasitas optimal PLTS dan BESS yang sesuai dengan kebutuhan *H2 plant* di PT. PLN Nusantara Power UP Gresik.
4. Merumuskan strategi operasi sistem PLTS dengan BESS, termasuk penerapan *reserve State of Charge* (SOC) dan *oversizing* kapasitas PLTS, untuk menjamin kontinuitas suplai listrik dengan kebijakan minimalisir ekspor ke PLN serta impor hanya pada kondisi darurat.
5. Memberikan alternatif solusi teknis dalam meningkatkan kontribusi energi terbarukan sebagai pengganti penggunaan *Renewable Energy Certificate* (REC).

1.4 Manfaat

Selain memiliki kontribusi pada pengembangan ilmu pengetahuan, penelitian ini juga diharapkan memberikan manfaat yang nyata bagi dunia akademik maupun praktik ketenagalistrikan. Adapun manfaat penelitian ini dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Manfaat Akademis

- Memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan kajian teknis integrasi PLTS dengan BESS untuk aplikasi *H2 plant*, sebuah topik yang masih jarang diteliti di Indonesia.
- Menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya terkait optimasi desain PLTS dengan BESS berbasis simulasi PVsyst, khususnya yang berfokus pada keandalan suplai energi terbarukan dengan meminimalisir ekspor-impor listrik dari jaringan.
- Memperkaya literatur akademik di bidang energi terbarukan dan penyimpanan energi dengan pendekatan teknis murni, bukan hanya aspek ekonomi.

2. Manfaat Praktis

- Memberikan rekomendasi teknis kepada PT. PLN Nusantara Power UP Gresik dalam merancang sistem PLTS dengan BESS yang sesuai dengan kebutuhan operasional *H2 plant*.
- Mendukung upaya PLN dalam mewujudkan program dekarbonisasi dan peningkatan porsi energi terbarukan sebagaimana tercantum dalam RUPTL 2025 – 2034.
- Menjadi masukan praktis bagi pengembangan strategi operasi PLTS dengan BESS di unit pembangkit lain, sehingga dapat memperkuat peran energi surya dan hidrogen dalam mendukung target *Net Zero Emission 2060*.

1.5 Ruang Lingkup Masalah

Untuk menjaga fokus penelitian dan memastikan hasil yang diperoleh sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan, maka penelitian ini dibatasi pada ruang lingkup tertentu. Ruang lingkup tersebut dijelaskan sebagai berikut :

1. Objek Penelitian

Penelitian difokuskan pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang terintegrasi dengan *Battery Energy Storage System* (BESS) untuk aplikasi *H2 plant* di PT. PLN Nusantara Power UP Gresik.

2. Aspek yang Dikaji

Analisis difokuskan pada aspek teknis, meliputi potensi radiasi surya, perhitungan kapasitas optimal PLTS, perhitungan kapasitas optimal BESS, serta strategi operasi sistem (*reserve State of Charge* dan *oversizing* kapasitas PLTS).

3. Batasan Operasional

Sistem yang dikaji dirancang untuk seminimal mungkin melakukan ekspor listrik ke jaringan PLN. Impor listrik dari PLN hanya diperbolehkan dalam kondisi darurat ketika sistem PLTS dengan BESS tidak dapat memenuhi kebutuhan beban.

4. Metoda dan Alat Analisis

Simulasi teknis dilakukan menggunakan *software* PVsyst *Student* Versi 8.0.18, dengan data radiasi surya yang tersedia pada basis data perangkat lunak tersebut maupun data pendukung dari sumber terpercaya.

5. Batasan Non-Teknis

Penelitian ini tidak membahas aspek ekonomi, finansial, ataupun kelayakan investasi (seperti LCOE, NPV, dan payback period). Fokus penelitian murni pada analisis teknis sistem PLTS dengan BESS.

1.6 Kebaharuan

Setiap penelitian perlu memiliki unsur kebaruan (*novelty*) agar memberikan kontribusi nyata terhadap pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi. Kebaruan dalam penelitian ini muncul dari fokus, pendekatan, serta konteks penerapannya yang belum banyak dikaji pada penelitian sebelumnya. Adapun kebaruan penelitian ini dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Fokus pada integrasi PLTS dengan BESS untuk aplikasi *H2 plant* di Indonesia. Penelitian ini secara spesifik menitikberatkan pada penerapan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang terintegrasi dengan *Battery Energy Storage System* (BESS) untuk mendukung kebutuhan listrik *H2 plant* di PT. PLN Nusantara Power UP Gresik. Hingga saat ini, penelitian mengenai integrasi PLTS dengan BESS di Indonesia umumnya berfokus pada sistem *off-grid* atau microgrid konvensional, bukan pada beban kritis industri seperti *H2 plant*.
2. Pendekatan teknis tanpa aspek ekonomi. Sebagian besar penelitian terdahulu mengenai PLTS dan BESS mengutamakan optimasi ekonomi, seperti analisis *Levelized Cost of Energy (LCOE)* atau *payback period*. Penelitian ini berbeda karena secara sadar membatasi kajian hanya pada aspek teknis murni meliputi kapasitas optimal, efisiensi energi dan strategi operasi sehingga memberikan perspektif baru terhadap keandalan sistem energi terbarukan industri.
3. Simulasi terintegrasi menggunakan PVsyst untuk evaluasi operasional *H2 plant*. Penelitian ini menggunakan perangkat lunak PVsyst sebagai alat utama untuk mensimulasikan performa sistem PLTS dengan BESS, termasuk parameter cadangan daya (*reserve State of Charge*), strategi *oversizing*, serta analisis sensitivitas terhadap variabilitas cuaca. Penggunaan PVsyst untuk kasus *H2 plant* merupakan pendekatan baru yang belum banyak diterapkan di konteks pembangkit Indonesia.
4. Konteks nyata pada PT. PLN Nusantara Power UP Gresik. Penelitian ini didasarkan pada kondisi aktual di lapangan, yaitu pada fasilitas *H2 plant* milik PT. PLN Nusantara Power UP Gresik. Dengan mempertimbangkan data teknis

dan kebijakan operasional PLN, penelitian ini memberikan hasil yang aplikatif dan dapat dijadikan dasar pengembangan proyek serupa di unit pembangkit lain.

5. Kontribusi terhadap strategi transisi energi nasional. Melalui desain sistem PLTS dengan BESS yang mendukung produksi hidrogen hijau, penelitian ini turut berkontribusi terhadap implementasi peta jalan (*roadmap*) transisi energi dan target *Net Zero Emission* 2060. Aspek ini memperkuat relevansi kebaruan penelitian, baik secara akademik maupun strategis bagi sektor ketenagalistrikan nasional.

Dengan demikian, kebaruan penelitian ini tidak hanya terletak pada penggunaan metode simulasi berbasis PVsyst, tetapi juga pada penerapan spesifiknya untuk sistem PLTS dengan BESS pada *H2 plant* di lingkungan industri pembangkitan. Pendekatan teknis murni yang diambil diharapkan dapat menjadi dasar bagi penelitian lanjutan dalam pengembangan sistem energi terbarukan yang lebih andal, efisien dan berkelanjutan di Indonesia.

1.7 Hipotesis

Hipotesis dalam penelitian berfungsi sebagai dugaan sementara yang akan diuji kebenarannya melalui analisis dan simulasi. Dalam penelitian ini, hipotesis dirumuskan berdasarkan tinjauan teori, hasil studi terdahulu, serta kondisi aktual sistem kelistrikan di PT. PLN Nusantara Power UP Gresik. Hipotesis yang diajukan mencerminkan hubungan antara variabel teknis sistem PLTS dengan BESS dan keandalan suplai energi listrik untuk *H2 plant*.

Adapun hipotesis penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Hipotesis 1 (H_1)

Integrasi sistem PLTS dengan *Battery Energy Storage System* (BESS) secara signifikan dapat meningkatkan keandalan suplai listrik untuk mendukung operasi *H2 plant* di PT. PLN Nusantara Power UP Gresik.

2. Hipotesis 2 (H_2)

Penerapan strategi operasi BESS dengan pengaturan *reserve State of Charge* (SOC) yang tepat dapat mempertahankan kontinuitas suplai listrik meskipun terjadi fluktuasi radiasi surya.

3. Hipotesis 3 (H_3)

Oversizing kapasitas PLTS dalam batas tertentu mampu meningkatkan performa sistem secara keseluruhan tanpa menyebabkan penurunan efisiensi atau peningkatan kehilangan energi yang signifikan.

4. Hipotesis 4 (H_4)

Sistem PLTS dengan BESS yang dirancang dengan konfigurasi optimal dapat mengoperasikan *H2 plant* secara berkelanjutan dengan meminimalisir impor listrik dari jaringan PLN, kecuali pada kondisi darurat.