

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

A. Kajian Teoritis

1. Energi Baru Terbarukan

Energi merupakan salah satu faktor utama yang mendukung pertumbuhan ekonomi, perkembangan industri, serta peningkatan kualitas hidup masyarakat. Seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk dan berkembangnya berbagai sektor pembangunan, kebutuhan energi listrik di Indonesia juga mengalami peningkatan setiap tahunnya. Sebagian besar kebutuhan energi listrik nasional masih dipenuhi oleh pembangkit listrik berbahan bakar fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam. Meskipun sumber energi tersebut mampu menyediakan energi dalam jumlah besar, penggunaannya secara terus-menerus menimbulkan berbagai permasalahan, antara lain menipisnya cadangan energi fosil, meningkatnya emisi gas rumah kaca, pencemaran lingkungan, serta perubahan iklim global. Kondisi tersebut mendorong berbagai negara termasuk Indonesia, untuk mempercepat transisi menuju pemanfaatan energi yang lebih bersih, berkelanjutan, dan ramah lingkungan (Aditya et al., 2025).

Dalam upaya mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil, pemerintah Indonesia telah menetapkan berbagai kebijakan strategis untuk meningkatkan pemanfaatan Energi Baru Terbarukan (EBT). Energi Baru Terbarukan merupakan energi yang berasal dari sumber daya alam yang dapat diperbarui secara alami sehingga memiliki keberlanjutan yang lebih

baik dibandingkan energi fosil. Berdasarkan UU Nomor 30 Tahun 2007 tentang Energi, energi terbarukan adalah energi yang berasal dari sumber daya alam yang dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan, seperti energi surya, energi angin, energi air, panas bumi, biomassa, bioenergi, energi laut, dan sumber energi terbarukan lainnya. Pemanfaatan energi tersebut diharapkan mampu meningkatkan ketahanan energi nasional sekaligus menekan dampak negatif terhadap lingkungan.

Komitmen pemerintah dalam pengembangan energi terbarukan tercermin dalam Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) Tahun 2021–2030 yang dikenal sebagai *Green RUPTL*. Dokumen tersebut menargetkan peningkatan porsi pembangkit listrik berbasis energi baru terbarukan dalam sistem kelistrikan nasional sebagai bagian dari strategi transisi energi menuju target *Net Zero Emission* (NZE) pada tahun 2060. Dalam RUPTL tersebut dijelaskan bahwa pembangunan pembangkit listrik baru akan lebih diprioritaskan pada sumber energi terbarukan dibandingkan pembangkit berbahan bakar fosil sehingga diharapkan mampu mengurangi emisi karbon serta meningkatkan bauran energi nasional secara bertahap (Kementerian ESDM, 2021).

Pemerintah juga menerbitkan Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 26 Tahun 2021 tentang Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap yang Terhubung pada Jaringan Tenaga Listrik Pemegang Izin Usaha Penyediaan Tenaga Listrik untuk Kepentingan Umum. Peraturan tersebut memberikan landasan hukum bagi masyarakat, instansi pemerintah,

maupun sektor industri untuk memanfaatkan sistem PLTS atap sebagai salah satu sumber energi listrik. Regulasi ini menjadi salah satu bentuk dukungan pemerintah dalam mempercepat pemanfaatan energi surya sebagai bagian dari program transisi energi nasional (ESDM, 2021).

Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi sangat besar di Indonesia adalah energi surya. Secara geografis, Indonesia berada di wilayah khatulistiwa yang menerima penyinaran matahari sepanjang tahun dengan intensitas radiasi rata-rata sekitar 4,5–5,5 kWh/m² per hari. Potensi tersebut menjadikan energi surya sebagai salah satu sumber energi yang paling prospektif untuk dikembangkan melalui teknologi fotovoltaik. Dibandingkan dengan sumber energi terbarukan lainnya, energi surya memiliki beberapa keunggulan, antara lain tersedia dalam jumlah melimpah, tidak menghasilkan emisi selama proses pembangkitan listrik, biaya operasional relatif rendah, serta dapat diterapkan mulai dari skala rumah tangga hingga industri (Tarigan, 2020).

Pemanfaatan energi surya melalui Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) juga semakin berkembang karena adanya peningkatan efisiensi modul fotovoltaik, perkembangan teknologi *inverter*, serta kemudahan dalam sistem pemantauan berbasis digital. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa penerapan PLTS atap (*Rooftop photovoltaic*) mampu mengurangi konsumsi energi listrik dari jaringan konvensional, meningkatkan efisiensi penggunaan energi, serta menurunkan emisi karbon pada bangunan komersial maupun sektor industri (Wardani et al., 2024).

Selain diterapkan pada sektor rumah tangga dan bangunan komersial, energi surya saat ini juga mulai dimanfaatkan sebagai sumber energi pendukung pada berbagai proses industri, salah satunya adalah produksi *hydrogen* (*Green Hydrogen*). *Hydrogen* merupakan salah satu media pembawa energi (*energy carrier*) yang dipandang memiliki potensi besar dalam mendukung sistem energi masa depan karena tidak menghasilkan emisi karbon ketika digunakan. Akan tetapi, proses produksi *hydrogen* melalui metode elektrolisis memerlukan energi listrik dalam jumlah besar sehingga penggunaan listrik yang berasal dari energi terbarukan menjadi syarat utama dalam menghasilkan *hydrogen* hijau (*Green Hydrogen*) (Falcão, 2023).

Perkembangan teknologi energi terbarukan juga didukung oleh berbagai penelitian mengenai integrasi PLTS dengan sistem produksi *hydrogen*. (Firdaus & Sudarti, 2022) menjelaskan bahwa kombinasi antara PLTS dan teknologi elektrolisis air mampu menghasilkan *hydrogen* tanpa menghasilkan emisi karbon sehingga berpotensi menjadi salah satu solusi dalam mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Integrasi tersebut juga memberikan peluang dalam meningkatkan pemanfaatan energi surya yang selama ini masih belum optimal pada beberapa wilayah di Indonesia.

Implementasi konsep tersebut telah mulai diterapkan oleh PT PLN (Persero) melalui PT PLN Nusantara Power yang mengembangkan fasilitas *Hydrogen Plant* pada beberapa unit pembangkit. Salah satu

implementasinya adalah di PT PLN Nusantara Power UP Pacitan yang memanfaatkan sistem PLTS *Rooftop* sebagai sumber energi pendukung proses produksi *hydrogen*. Penerapan teknologi ini menjadi salah satu contoh pemanfaatan energi baru terbarukan pada sektor industri sekaligus mendukung kebijakan dekarbonisasi sektor ketenagalistrikan nasional.

Meskipun memiliki potensi yang besar, pemanfaatan energi baru terbarukan juga menghadapi berbagai tantangan. Produksi energi listrik dari sumber energi terbarukan sangat dipengaruhi oleh kondisi alam, seperti intensitas radiasi matahari, kecepatan angin, maupun debit air. Pada sistem PLTS, variasi irradiansi matahari, temperatur modul, kondisi cuaca, serta rugi-rugi pada sistem dapat menyebabkan produksi energi listrik berubah-ubah. Diperlukan sistem pemantauan dan evaluasi performa secara berkala agar energi yang dihasilkan tetap optimal serta mampu memenuhi kebutuhan beban secara andal (Govindarajan et al., 2024).

Pengembangan energi baru terbarukan juga memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan. Penggunaan energi terbarukan dapat mengurangi konsumsi bahan bakar fosil, menekan biaya operasional dalam jangka panjang, meningkatkan ketahanan energi nasional, serta mengurangi emisi karbon yang menjadi penyebab utama pemanasan global. Dengan demikian, pemanfaatan energi baru terbarukan tidak hanya berkontribusi terhadap penyediaan energi yang berkelanjutan, tetapi juga mendukung pencapaian target pembangunan berkelanjutan (*Sustainable Development Goals*) dan

target *Net Zero Emission* yang telah dicanangkan oleh pemerintah Indonesia.

Berdasarkan uraian tersebut dapat disimpulkan bahwa energi baru terbarukan merupakan solusi strategis dalam menghadapi tantangan kebutuhan energi di masa depan. Di antara berbagai sumber energi terbarukan yang tersedia, energi surya memiliki potensi yang sangat besar untuk dikembangkan di Indonesia. Penelitian mengenai evaluasi kinerja sistem PLTS, khususnya yang dimanfaatkan sebagai suplai energi pada *Hydrogen Plant*, menjadi penting untuk dilakukan guna mengetahui tingkat efisiensi, keandalan, serta kontribusinya dalam mendukung pengembangan energi bersih di Indonesia.

2. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan energi radiasi matahari sebagai sumber energi utama untuk menghasilkan energi listrik melalui teknologi fotovoltaik (*photovoltaic*). Sistem ini bekerja berdasarkan efek fotovoltaik (*photovoltaic effect*), yaitu proses konversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik arus searah (*Direct Current*) ketika foton dari sinar matahari mengenai material semikonduktor yang terdapat pada sel surya. Energi listrik yang dihasilkan kemudian dapat dimanfaatkan secara langsung, disimpan dalam sistem penyimpanan energi (*battery energy storage system*), maupun dikonversi menjadi arus bolak-balik (*Alternating Current*)

menggunakan *inverter* agar dapat digunakan oleh peralatan listrik atau dihubungkan dengan jaringan tenaga listrik (Tarigan, 2020).

PLTS menjadi salah satu teknologi energi terbarukan yang berkembang paling pesat di dunia karena memiliki berbagai keunggulan, antara lain tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca selama proses pembangkitan listrik, memanfaatkan sumber energi yang tersedia secara alami, memiliki biaya operasional yang relatif rendah, serta dapat diaplikasikan mulai dari skala kecil hingga skala utilitas. Perkembangan teknologi modul fotovoltaik, *inverter*, dan sistem monitoring juga menyebabkan efisiensi PLTS terus meningkat sehingga semakin banyak diterapkan pada sektor rumah tangga, komersial, maupun industri (Wardani et al., 2024).

Di Indonesia, pengembangan PLTS didukung oleh kondisi geografis yang berada di wilayah khatulistiwa sehingga menerima radiasi matahari sepanjang tahun dengan rata-rata intensitas penyinaran sekitar 4,5–5,5 kWh/m² per hari. Potensi tersebut menjadikan energi surya sebagai salah satu sumber energi baru terbarukan yang paling prospektif untuk dikembangkan. Oleh karena itu, pemerintah terus mendorong pembangunan PLTS melalui berbagai kebijakan, salah satunya melalui Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 26 Tahun 2021 mengenai PLTS Atap yang terhubung dengan jaringan tenaga listrik. Regulasi tersebut memberikan kemudahan bagi pelanggan untuk memasang sistem PLTS atap

sehingga diharapkan dapat meningkatkan bauran energi baru terbarukan nasional (ESDM, 2021).

Selain dukungan regulasi, PT PLN (Persero) melalui Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021–2030 juga menetapkan peningkatan kapasitas pembangkit berbasis energi terbarukan sebagai bagian dari strategi transisi energi nasional. Dalam dokumen tersebut, PLTS menjadi salah satu teknologi yang diprioritaskan karena memiliki waktu pembangunan yang relatif singkat, biaya investasi yang semakin kompetitif, serta mampu diterapkan pada berbagai kondisi geografis di Indonesia (Kementerian ESDM, 2021).

a. Prinsip Kerja PLTS

Prinsip kerja PLTS didasarkan pada efek fotovoltaiik yang pertama kali dijelaskan oleh Edmond Becquerel pada tahun 1839. Ketika cahaya matahari mengenai permukaan sel surya, energi foton akan diserap oleh material semikonduktor sehingga menghasilkan pasangan elektron dan hole. Medan listrik internal pada sambungan p-n *junction* menyebabkan elektron bergerak menuju sisi negatif dan *hole* menuju sisi positif, sehingga menghasilkan aliran arus listrik searah (DC). Besarnya energi listrik yang dihasilkan bergantung pada intensitas radiasi matahari, luas permukaan modul, efisiensi sel surya, temperatur modul, serta kondisi lingkungan sekitar (Govindarajan et al., 2024).

Energi listrik DC yang dihasilkan oleh modul surya selanjutnya dialirkan menuju *inverter*. *Inverter* mengubah arus searah menjadi arus

bolak-balik (AC) dengan frekuensi dan tegangan yang sesuai dengan sistem kelistrikan. Pada sistem yang terhubung ke jaringan (*grid-connected system*), *inverter* juga berfungsi melakukan sinkronisasi dengan jaringan listrik sehingga energi yang dihasilkan PLTS dapat dimanfaatkan secara langsung oleh beban maupun disalurkan ke jaringan listrik apabila terjadi kelebihan produksi energi.

b. Jenis-Jenis Sistem PLTS

Berdasarkan konfigurasi sistem, PLTS dapat dibedakan menjadi tiga jenis utama, yaitu sistem *off-grid*, *on-grid*, dan *hybrid*.

1) PLTS *Off-grid*

PLTS *off-grid* merupakan sistem yang beroperasi secara mandiri tanpa terhubung dengan jaringan listrik PLN. Sistem ini umumnya digunakan pada daerah terpencil yang belum memiliki akses jaringan listrik. Energi listrik yang dihasilkan modul surya disimpan dalam baterai sehingga dapat digunakan pada malam hari maupun ketika intensitas matahari rendah. Meskipun memiliki tingkat kemandirian yang tinggi, biaya investasi sistem *off-grid* relatif lebih besar karena memerlukan baterai dan perangkat pengendali pengisian (*charge controller*).

2) PLTS *On-grid*

PLTS *on-grid* merupakan sistem yang dihubungkan secara langsung dengan jaringan tenaga listrik. Pada sistem ini, energi listrik yang dihasilkan PLTS digunakan terlebih dahulu untuk memenuhi kebutuhan beban. Apabila produksi energi lebih besar

dibandingkan kebutuhan beban, kelebihan energi dapat disalurkan ke jaringan listrik. Sebaliknya, apabila produksi energi dari PLTS tidak mencukupi, kebutuhan energi akan dipenuhi oleh jaringan PLN. Sistem ini tidak memerlukan baterai sehingga biaya investasi dan pemeliharaannya lebih rendah dibandingkan sistem *off-grid*.

Penelitian ini menggunakan sistem PLTS *Rooftop on-grid* berkapasitas 87,4 kWp yang terpasang di PT PLN Nusantara Power Unit Pembangkitan Pacitan sebagai suplai energi pada *Hydrogen Plant*. Sistem tersebut dirancang untuk mengurangi konsumsi energi listrik dari jaringan konvensional serta mendukung pemanfaatan energi baru terbarukan pada sektor industri.

3) PLTS *Hybrid*

PLTS *hybrid* merupakan kombinasi antara sistem *on-grid* dan *off-grid*. Sistem ini mengintegrasikan modul surya, baterai, dan jaringan listrik sehingga mampu menjaga kontinuitas suplai energi ketika terjadi gangguan pada jaringan maupun ketika produksi energi surya menurun. Sistem *hybrid* umumnya diterapkan pada fasilitas yang memerlukan tingkat keandalan pasokan listrik yang tinggi.

c. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kinerja PLTS

Kinerja sistem PLTS dipengaruhi oleh berbagai faktor teknis maupun lingkungan. Faktor yang paling dominan adalah intensitas radiasi matahari (*irradiance*). Semakin tinggi intensitas radiasi yang

diterima modul surya, semakin besar energi listrik yang dapat dihasilkan. Sebaliknya, penurunan irradiansi akibat cuaca mendung, hujan, atau bayangan (*shading*) akan menurunkan produksi energi listrik. Selain irradiansi, temperatur modul juga berpengaruh terhadap efisiensi konversi energi. Meskipun intensitas radiasi tinggi meningkatkan produksi energi, kenaikan temperatur modul di atas kondisi standar (*Standard Test Condition*) justru menyebabkan penurunan tegangan keluaran sehingga efisiensi modul menjadi lebih rendah (Govindarajan et al., 2024).

Faktor lain yang memengaruhi performa PLTS adalah orientasi dan sudut kemiringan modul, efisiensi *inverter*, rugi-rugi kabel, kualitas instalasi, penumpukan debu (*soiling*), serta degradasi modul akibat usia pemakaian. Oleh karena itu, evaluasi performa sistem perlu dilakukan secara berkala menggunakan parameter yang telah distandarkan secara internasional agar tingkat efisiensi sistem dapat diketahui secara objektif.

d. Implementasi PLTS pada Sektor Industri

Dalam beberapa tahun terakhir, pemanfaatan PLTS tidak hanya terbatas pada bangunan rumah tangga maupun komersial, tetapi juga mulai diterapkan pada sektor industri. Salah satu implementasi yang berkembang adalah penggunaan PLTS sebagai sumber energi untuk mendukung proses produksi *hydrogen* (*Green Hydrogen*). Produksi *hydrogen* melalui metode elektrolisis membutuhkan energi listrik dalam

jumlah besar sehingga penggunaan energi surya dapat mengurangi konsumsi listrik dari pembangkit berbahan bakar fosil dan mendukung proses dekarbonisasi industri (Falcão, 2023; Firdaus & Sudarti, 2022).

Implementasi tersebut telah diterapkan di PT PLN Nusantara Power Unit Pembangkitan Pacitan melalui pemasangan PLTS *Rooftop* berkapasitas 87,4 kWp yang dimanfaatkan sebagai sumber energi pendukung *Hydrogen Plant*. Agar sistem dapat beroperasi secara optimal, diperlukan evaluasi kinerja berdasarkan parameter *Reference Yield* (YR), *Final Yield* (YF), dan *Performance Ratio* (PR) sesuai standar IEC 61724-1. Evaluasi tersebut bertujuan untuk mengetahui tingkat efisiensi sistem serta mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi perbedaan antara performa aktual dan performa hasil simulasi.

3. Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan suatu sistem yang terdiri atas beberapa komponen yang saling terintegrasi sehingga mampu mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik yang dapat dimanfaatkan oleh beban maupun disalurkan ke jaringan tenaga listrik. Kinerja suatu sistem PLTS tidak hanya ditentukan oleh kemampuan modul surya dalam menghasilkan energi listrik, tetapi juga dipengaruhi oleh kualitas setiap komponen penyusun sistem, mulai dari modul fotovoltaik, *inverter*, sistem proteksi, struktur penyangga, kabel, hingga sistem pemantauan (*monitoring system*). Oleh karena itu, pemilihan komponen yang sesuai dengan karakteristik sistem menjadi faktor penting dalam

memperoleh efisiensi konversi energi yang optimal (Govindarajan et al., 2024).

Pada penelitian ini, sistem PLTS yang digunakan merupakan PLTS *Rooftop* berkapasitas 87,4 kWp yang beroperasi menggunakan sistem *on-grid* sebagai suplai energi bagi *Hydrogen Plant* di PT PLN Nusantara Power Unit Pembangkitan Pacitan. Secara umum sistem tersebut terdiri atas beberapa komponen utama sebagaimana dijelaskan dibawah ini

a. Modul Fotovoltaik (*Photovoltaic Module*)

Modul fotovoltaik (*Photovoltaic Module/PV Module*) merupakan komponen utama pada sistem PLTS yang berfungsi mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik arus searah (*Direct Current/DC*) melalui proses fotovoltaik. Modul surya tersusun atas sejumlah sel surya (*solar cell*) yang dirangkai secara seri maupun paralel sehingga menghasilkan tegangan dan arus sesuai kebutuhan sistem.

Sel surya umumnya menggunakan material semikonduktor silikon yang terdiri atas tipe monokristalin (*monocrystalline silicon*) maupun polikristalin (*polycrystalline silicon*). Modul monokristalin memiliki efisiensi konversi energi yang lebih tinggi sehingga banyak digunakan pada sistem PLTS skala industri, sedangkan modul polikristalin memiliki biaya produksi yang lebih rendah namun efisiensinya sedikit lebih kecil (Tarigan, 2020). Semakin tinggi intensitas irradiansi yang diterima modul maka semakin besar energi

listrik yang dihasilkan. Sebaliknya, peningkatan temperatur modul di atas kondisi standar (*Standard Test Condition/STC*) akan menurunkan tegangan keluaran sehingga efisiensi modul menjadi lebih rendah (Govindarajan et al., 2024). Pada sistem PLTS yang digunakan dalam penelitian ini, modul fotovoltaik memiliki kapasitas total 87,4 kWp yang dipasang pada atap bangunan (*Rooftop photovoltaic system*) untuk memanfaatkan radiasi matahari secara maksimal sebagai sumber energi *Hydrogen Plant*.

b. Inverter

Inverter merupakan komponen elektronik daya yang berfungsi mengubah energi listrik arus searah (*Direct Current/DC*) yang dihasilkan modul fotovoltaik menjadi energi listrik arus bolak-balik (*Alternating Current/AC*) sehingga dapat digunakan oleh beban maupun dihubungkan dengan jaringan listrik. Efisiensi *inverter* sangat berpengaruh terhadap produksi energi listrik sistem PLTS karena seluruh energi DC harus melewati *inverter* sebelum dimanfaatkan sebagai energi AC. Oleh karena itu, *inverter* dengan efisiensi tinggi mampu meningkatkan nilai *Performance Ratio* (PR) sistem secara keseluruhan (Irwan Mahmudi et al., 2024).

c. Struktur Penyangga (Mounting Structure)

Struktur penyangga merupakan komponen mekanik yang digunakan untuk menopang modul fotovoltaik pada posisi tertentu sehingga memperoleh paparan sinar matahari secara optimal. Struktur ini umumnya terbuat dari aluminium atau baja galvanis yang memiliki

ketahanan terhadap korosi serta mampu menahan beban angin dan hujan dalam jangka waktu yang panjang. Kesalahan dalam menentukan sudut kemiringan maupun orientasi pemasangan dapat menyebabkan penurunan produksi energi listrik karena irradiansi yang diterima modul menjadi tidak optimal (Yuniahastuti et al., 2025).

d. Combiner Box

Combiner Box merupakan perangkat yang berfungsi menggabungkan beberapa rangkaian (*string*) modul surya menjadi satu jalur utama menuju *inverter*. Penggunaan *Combiner Box* mempermudah proses instalasi, pemeliharaan, dan identifikasi gangguan pada sistem PLTS.

e. Kabel DC dan Kabel AC

Kabel merupakan media penghantar energi listrik yang menghubungkan seluruh komponen sistem PLTS. Kabel dibedakan menjadi dua jenis, yaitu kabel DC yang menghubungkan modul surya dengan *inverter*, serta kabel AC yang menghubungkan *inverter* dengan panel distribusi maupun jaringan PLN. Pemilihan ukuran kabel harus mempertimbangkan kapasitas arus, panjang penghantar, dan rugi-rugi tegangan (*voltage drop*). Rugi-rugi kabel yang terlalu besar dapat menyebabkan penurunan efisiensi sistem sehingga memengaruhi nilai *Performance Ratio* (PR) (*International Electrotechnical Commission*, 2021).

f. Sistem Proteksi

Sistem proteksi berfungsi menjaga keamanan instalasi PLTS dari berbagai gangguan listrik maupun gangguan lingkungan. Proteksi tersebut bertujuan untuk mengurangi risiko kerusakan akibat hubung singkat, arus lebih, tegangan lebih, maupun sambaran petir.

g. Smart Meter

Smart Meter merupakan alat ukur digital yang digunakan untuk mencatat energi listrik yang dihasilkan maupun energi yang disalurkan ke jaringan listrik. Pada sistem PLTS *on-grid*, *Smart Meter* juga digunakan untuk mengukur energi listrik yang diimpor dari jaringan PLN maupun energi yang diekspor ke jaringan. Data yang diperoleh dari *Smart Meter* menjadi salah satu sumber utama dalam evaluasi performa sistem PLTS.

h. Sistem Monitoring

Perkembangan teknologi digital memungkinkan sistem PLTS dilengkapi dengan perangkat monitoring berbasis internet (*Internet of Things/IoT*). Sistem monitoring berfungsi mengumpulkan data operasi secara *real-time* sehingga kondisi sistem dapat dipantau setiap saat.

Menurut (Yuniahastuti et al., 2025), sistem monitoring sangat membantu proses evaluasi performa PLTS karena seluruh parameter operasi dapat direkam secara otomatis dan digunakan sebagai dasar analisis menggunakan perangkat lunak *Pvsyst*. Pada penelitian ini, data hasil monitoring digunakan sebagai data aktual untuk dibandingkan dengan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak *Pvsyst* sehingga

dapat diketahui tingkat kesesuaian antara kondisi operasi di lapangan dengan hasil simulasi.

i. Sistem PLTS *Rooftop* 87,4 kWp pada *Hydrogen Plant*

Sistem PLTS yang menjadi objek penelitian merupakan PLTS *Rooftop* berkapasitas 87,4 kWp yang dipasang di PT PLN Nusantara Power Unit Pembangkitan Pacitan. Sistem ini menggunakan konfigurasi *on-grid* sehingga energi listrik yang dihasilkan dimanfaatkan sebagai suplai energi bagi *Hydrogen Plant* dan dapat berinteraksi dengan jaringan listrik sesuai kebutuhan operasional.

Komponen utama yang digunakan meliputi modul fotovoltaik, *inverter*, struktur penyangga, *combiner box*, sistem proteksi, kabel DC dan AC, *Smart Meter*, serta sistem monitoring berbasis digital. Integrasi seluruh komponen tersebut memungkinkan sistem menghasilkan energi listrik secara optimal, namun performanya tetap dipengaruhi oleh kondisi cuaca, temperatur, dan rugi-rugi sistem. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi menggunakan parameter *Reference Yield* (YR), *Final Yield* (YF), dan *Performance Ratio* (PR).

4. Hydrogen Plant

Hydrogen Plant merupakan fasilitas industri yang dirancang untuk memproduksi gas *hydrogen* (H_2) melalui berbagai metode produksi, seperti *Steam Methane Reforming* (SMR), gasifikasi biomassa, maupun elektrolisis air (*water electrolysis*). Di antara berbagai metode tersebut, elektrolisis air menjadi teknologi yang paling banyak dikembangkan dalam konsep *Green Hydrogen* karena tidak menghasilkan emisi karbon apabila energi listrik

yang digunakan berasal dari sumber energi terbarukan seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), maupun Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) (Falcão, 2023). *Hydrogen* merupakan unsur kimia paling ringan dan paling melimpah di alam. Akan tetapi, *hydrogen* hampir tidak pernah ditemukan dalam bentuk bebas sehingga harus diproduksi melalui proses kimia atau elektrokimia. Saat ini *hydrogen* banyak dimanfaatkan sebagai bahan baku industri pupuk, industri petrokimia, industri logam, pembangkit listrik berbasis *fuel cell*, hingga bahan bakar kendaraan berbasis *hydrogen*. Seiring meningkatnya perhatian dunia terhadap isu perubahan iklim, *hydrogen* mulai dipandang sebagai salah satu media pembawa energi (*energy carrier*) yang berperan penting dalam mendukung sistem energi rendah karbon.

Menurut *Green Hydrogen* Indonesia, *hydrogen* hijau (*Green Hydrogen*) merupakan *hydrogen* yang diproduksi melalui proses elektrolisis menggunakan energi listrik yang berasal dari sumber energi terbarukan sehingga proses produksinya tidak menghasilkan emisi karbon. Pengembangan teknologi *Green Hydrogen* diharapkan mampu menjadi solusi dalam mendukung transisi energi sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil.

Menurut (Foundations & Scale, n.d.), pengembangan *Green Hydrogen* di Indonesia masih berada pada tahap awal, namun memiliki prospek yang sangat besar seiring meningkatnya pemanfaatan energi baru terbarukan. Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan adalah

integrasi PLTS dengan *Hydrogen Plant* untuk menghasilkan *hydrogen* hijau yang bebas emisi karbon. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa evaluasi performa PLTS menjadi aspek penting dalam menjamin kontinuitas pasokan energi bagi proses produksi *hydrogen*.

a. Prinsip Kerja *Hydrogen Plant*

Pada penelitian ini, *Hydrogen Plant* menggunakan metode elektrolisis air sebagai proses utama pembentukan *hydrogen*. Elektrolisis merupakan proses pemecahan molekul air (H_2O) menjadi gas *hydrogen* (H_2) dan gas oksigen (O_2) menggunakan energi listrik. Energi listrik merupakan komponen utama dalam proses elektrolisis. Oleh karena itu, penggunaan energi listrik dari PLTS menjadi salah satu solusi untuk menghasilkan *hydrogen* hijau yang ramah lingkungan (Firdaus & Sudarti, 2022).

b. Klasifikasi *Hydrogen* Berdasarkan Metode Produksi

Berdasarkan sumber energi dan metode produksinya, *hydrogen* dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis.

1) Grey Hydrogen

Grey Hydrogen diproduksi menggunakan bahan bakar fosil, terutama gas alam melalui proses *Steam Methane Reforming* (SMR). Metode ini masih menghasilkan emisi karbon dalam jumlah besar sehingga kurang ramah lingkungan.

2) *Blue Hydrogen*

Blue Hydrogen diproduksi menggunakan metode yang sama dengan *Grey Hydrogen*, namun emisi karbon yang dihasilkan ditangkap dan disimpan menggunakan teknologi *Carbon Capture Storage* (CCS).

3) *Green Hydrogen*

Green Hydrogen diproduksi melalui proses elektrolisis air menggunakan energi listrik yang berasal dari sumber energi terbarukan. Karena tidak menghasilkan emisi karbon selama proses produksinya, *Green Hydrogen* menjadi salah satu teknologi yang diprioritaskan dalam pengembangan sistem energi masa depan (Falcão, 2023).

c. Komponen Utama *Hydrogen Plant*

Sebuah *Hydrogen Plant* terdiri atas beberapa komponen utama yang saling terintegrasi agar proses produksi *hydrogen* dapat berlangsung secara kontinu.

1) *Water Treatment System*

Water Treatment System berfungsi mengolah air baku menjadi deionized water atau air dengan tingkat kemurnian tinggi. Air dengan kandungan mineral yang tinggi dapat menyebabkan penurunan efisiensi bahkan kerusakan pada membran elektroliser.



Gambar 2.1 Water Treatment System
Sumber : www.dreamstime.com

2) Electrolyzer

Electrolyzer merupakan komponen utama *Hydrogen Plant* yang berfungsi menguraikan air menjadi gas *hydrogen* dan oksigen menggunakan energi listrik. Menurut (Sangian et al., 2023), sekitar 70–80% konsumsi energi pada *Hydrogen Plant* digunakan oleh *Electrolyzer*, sehingga efisiensi alat ini sangat menentukan biaya produksi *hydrogen*.



Gambar 2.2 Electrolyzer
Sumber : johncockerill.com

3) Gas Separator

Gas separator digunakan untuk memisahkan gas *hydrogen* dan gas oksigen hasil proses elektrolisis sehingga kedua gas tidak bercampur.



Gambar 2.3 Gas separator
Sumber : anpamengineering.com

4) *Hydrogen Dryer*

Gas *hydrogen* yang keluar dari *Electrolyzer* masih mengandung uap air sehingga perlu dikeringkan menggunakan *hydrogen dryer* agar memenuhi standar kemurnian.



Gambar 2.1 Hydrogen Dryer
Sumber : storage.googleapis.com

5) *Hydrogen Compressor*

Hydrogen compressor digunakan untuk meningkatkan tekanan gas *hydrogen* sebelum disimpan di dalam tabung penyimpanan.



Gambar 2.2 Hydrogen Compressor
Sumber : dswgascylinder.en.made-in-china.com

6) *Storage Tank*

Storage tank merupakan tempat penyimpanan *hydrogen* bertekanan tinggi sebelum digunakan maupun didistribusikan.



Gambar 2.3 *Storage Tank*

Sumber : dreamstime.com

7) Integrasi PLTS dengan *Hydrogen Plant*

Integrasi antara Pembangkit Listrik Tenaga Surya dan *Hydrogen Plant* merupakan salah satu bentuk pemanfaatan energi baru terbarukan yang saat ini berkembang di berbagai negara. Pada sistem ini, energi listrik yang dihasilkan PLTS dimanfaatkan sebagai sumber energi utama untuk mengoperasikan *Electrolyzer*. Menurut (Aditya et al., 2025), integrasi energi terbarukan dengan sistem produksi *hydrogen* merupakan salah satu strategi utama dalam mencapai target *Net Zero Emission* Indonesia.

8) *Hydrogen Plant* PT PLN Nusantara Power Unit Pembangkitan Pacitan

Sebagai bagian dari program dekarbonisasi sektor ketenagalistrikan, PT PLN (Persero) melalui PT PLN Nusantara Power telah mengembangkan beberapa fasilitas *Hydrogen Plant* di Indonesia. Salah satunya berada di Unit Pembangkitan Pacitan, yang memanfaatkan sistem PLTS *Roof top* berkapasitas 87,4 kWp sebagai sumber energi pendukung proses produksi *hydrogen*.

PLTS menghasilkan energi listrik pada siang hari yang kemudian digunakan untuk menyuplai kebutuhan energi *Electrolyzer*. Dengan demikian, konsumsi energi listrik dari jaringan dapat dikurangi sehingga proses produksi *hydrogen* menjadi lebih ramah lingkungan.

Walaupun demikian, energi listrik yang dihasilkan PLTS sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca, irradiansi matahari, temperatur modul, efisiensi *inverter*, serta rugi-rugi sistem. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi terhadap performa sistem PLTS menggunakan parameter *Reference Yield* (YR), *Final Yield* (YF), dan *Performance Ratio* (PR) sesuai standar IEC 61724-1. Evaluasi tersebut bertujuan untuk mengetahui tingkat efisiensi sistem sekaligus menilai kelayakan PLTS sebagai suplai energi pada *Hydrogen Plant*.

9) Reference Yield (YR)

Reference Yield (YR) merupakan parameter yang menunjukkan jumlah jam penyinaran matahari ekuivalen (*Peak Sun Hours*) berdasarkan besarnya radiasi matahari yang diterima modul surya. Nilai ini menggambarkan potensi energi matahari yang tersedia pada suatu lokasi tanpa mempertimbangkan rugi-rugi sistem PLTS. Dengan demikian, *Reference Yield* menjadi indikator sumber daya energi surya yang dapat dimanfaatkan oleh sistem fotovoltaik

(Rafhel Panjaitan et al., 2023). Menurut standar IEC 61724-1, nilai *Reference Yield* dihitung menggunakan Persamaan (2.1).

$$Y_r = \frac{H_T}{G_{STC}} \left(\frac{kWh/m^2}{kW/m^2} \right) \dots\dots\dots \text{Persamaan (2.1)}$$

Keterangan:

YR = *Reference Yield* (jam atau kWh/kWp/hari)

Ht= Total irradiansi pada bidang modul (kWh/m²)

Gstc= Irradiansi referensi pada *Standard Test Condition* (1 kW/m²)

Sumber: (*International Electrotechnical Commission*, 2021).

Nilai *Reference Yield* hanya dipengaruhi oleh besarnya energi radiasi matahari yang diterima modul. Oleh karena itu, parameter ini tidak dipengaruhi oleh efisiensi *inverter*, rugi-rugi kabel, temperatur modul, maupun faktor teknis lainnya. Semakin tinggi nilai irradiansi harian maka semakin besar pula nilai *Reference Yield* yang diperoleh.

10) *Final Yield* (YF)

Final Yield (YF) merupakan parameter yang menunjukkan energi listrik AC bersih yang berhasil dihasilkan oleh sistem PLTS setelah memperhitungkan seluruh rugi-rugi sistem. Nilai ini diperoleh dari perbandingan antara energi listrik AC yang dihasilkan sistem dengan kapasitas terpasang modul surya. *Final Yield* menjadi salah satu indikator utama untuk mengetahui produktivitas aktual

sistem fotovoltaik (Rafhel Panjaitan et al., 2023). Persamaan *Final Yield* diberikan sebagai berikut.

$$Y_f = \frac{E_{AC}}{P_{PV}} (kWh_{AC}/kWp_{DC}) \dots\dots\dots \text{Persamaan (2.2)}$$

Keterangan:

YF= *Final Yield* (kWh/kWp)

EAC = Energi listrik AC yang dihasilkan sistem (kWh)

P0 = Kapasitas terpasang PLTS (kWp)

Sumber: (*International Electrotechnical Commission*, 2021).

11) Performance Ratio (PR)

Performance Ratio (PR) merupakan parameter yang paling banyak digunakan dalam evaluasi performa sistem PLTS. PR menunjukkan tingkat efisiensi keseluruhan sistem dengan membandingkan energi aktual yang dihasilkan terhadap energi teoritis berdasarkan kondisi irradiansi matahari. Parameter ini bersifat independen terhadap ukuran sistem sehingga dapat digunakan untuk membandingkan performa berbagai instalasi PLTS dengan kapasitas yang berbeda (Khalid et al., 2016). Menurut (*International Electrotechnical Commission*, 2021), nilai *Performance Ratio* dihitung menggunakan Persamaan (2.4).

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} \times 100\% \dots\dots\dots \text{Persamaan (2.3)}$$

Keterangan:

PR = *Performance Ratio* (%)

YF = *Final Yield* (kWh/kWp)

YR = *Reference Yield* (kWh/kWp)

Sumber: (*International Electrotechnical Commission*, 2021).

Semakin tinggi nilai *Performance Ratio* maka semakin baik kualitas operasi sistem PLTS. Menurut (Khalid et al., 2016), sistem PLTS dengan nilai PR di atas 75% umumnya menunjukkan performa yang baik, sedangkan nilai yang lebih rendah mengindikasikan adanya rugi-rugi yang cukup besar sehingga diperlukan evaluasi lebih lanjut.

12) Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Nilai PR

Performance Ratio dipengaruhi oleh berbagai faktor teknis maupun lingkungan, antara lain:

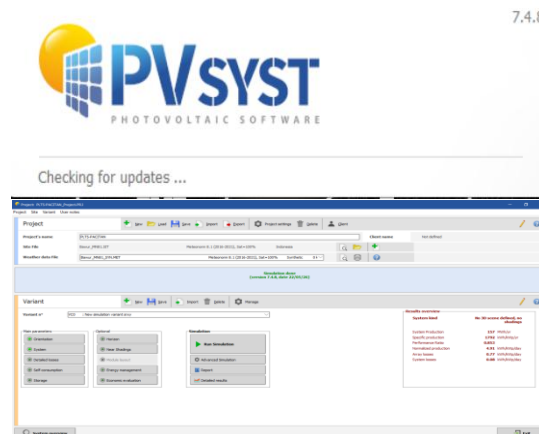
- a) Temperatur modul surya, yang meningkatkan rugi-rugi termal dan menurunkan efisiensi modul.
- b) Irradiansi matahari, yang menentukan potensi energi yang tersedia.
- c) Efisiensi *inverter*, yang memengaruhi konversi energi DC menjadi AC.
- d) *Shading*, baik permanen maupun sementara, yang mengurangi produksi energi.

- e) *Soiling*, yaitu penumpukan debu atau kotoran pada permukaan modul.
- f) Rugi-rugi kabel dan koneksi, akibat hambatan penghantar.
- g) Degradasi modul, yang menyebabkan penurunan kemampuan konversi energi seiring bertambahnya usia modul.

(Govindarajan et al., 2024) menjelaskan bahwa pemeliharaan berkala seperti pembersihan modul, inspeksi *inverter*, dan pemeriksaan koneksi listrik dapat meningkatkan nilai *Performance Ratio* sehingga produksi energi listrik tetap optimal.

5. Perangkat Lunak *Pvsyst*

Pvsyst merupakan perangkat lunak (*software*) simulasi sistem fotovoltaik yang banyak digunakan dalam perencanaan (*design*), analisis, optimasi, dan evaluasi kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Perangkat lunak ini dikembangkan oleh André Mermoud sejak tahun 1992 di *University of Geneva*, Swiss, dan hingga saat ini telah menjadi salah satu perangkat lunak standar yang digunakan oleh akademisi, konsultan, maupun industri dalam melakukan studi kelayakan dan analisis performa sistem PLTS (Mermoud & Wittmer, 2014).



Gambar 2.4 PVsyst
Sumber : Dokumen pribadi

Pvsyst mampu melakukan simulasi berdasarkan berbagai parameter teknis, seperti kondisi meteorologi, spesifikasi modul fotovoltaik, karakteristik *inverter*, konfigurasi rangkaian modul, orientasi pemasangan, sudut kemiringan (*tilt angle*), posisi geografis, serta berbagai rugi-rugi (*losses*) yang terjadi selama sistem beroperasi. Dengan mempertimbangkan parameter-parameter tersebut, *Pvsyst* dapat memperkirakan produksi energi listrik, efisiensi sistem, dan indikator performa lainnya secara lebih akurat dibandingkan perhitungan teoritis sederhana (Mermoud & Wittmer, 2014).

Dalam penelitian ini, *Pvsyst* digunakan sebagai perangkat lunak utama untuk melakukan simulasi performa PLTS *Rooftop* berkapasitas 87,4 kWp yang berfungsi sebagai suplai energi bagi *Hydrogen Plant* di PT PLN Nusantara Power Unit Pembangkitan Pacitan. Hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan data operasional aktual sehingga dapat diketahui tingkat kesesuaian antara kondisi teoritis dan kondisi nyata di lapangan.

a. Fungsi *Pvsyst* dalam Analisis Sistem PLTS

Pvsyst memiliki berbagai fungsi yang mendukung proses perencanaan maupun evaluasi sistem PLTS. Fungsi utama perangkat lunak ini meliputi:

- 1) Mendesain konfigurasi sistem PLTS sesuai kapasitas yang diinginkan.
- 2) Memilih jenis modul fotovoltaik dan *inverter* berdasarkan basis data pabrikan.
- 3) Mensimulasikan produksi energi listrik harian, bulanan, dan tahunan.
- 4) Menghitung berbagai rugi-rugi sistem (*loss diagram*).
- 5) Menghitung parameter performa seperti *Reference Yield* (YR), *Final Yield* (YF), dan *Performance Ratio* (PR).
- 6) Mengevaluasi pengaruh orientasi modul, sudut kemiringan, dan *shading*.
- 7) Menyusun laporan simulasi yang dapat digunakan sebagai dasar analisis teknis maupun ekonomi.

Kemampuan tersebut menjadikan *Pvsyst* sebagai salah satu perangkat lunak yang banyak digunakan dalam penelitian maupun proyek pembangunan PLTS karena mampu memberikan gambaran performa sistem sebelum implementasi maupun setelah sistem beroperasi.

b. Langkah-langkah *Pvsyst*

Pvsyst yang digunakan saat ini menggunakan tipe 7.4.8. Secara umum, tahapan simulasi menggunakan *Pvsyst* terdiri atas beberapa langkah yaitu menentukan lokasi proyek >> memasukkan data meteorologi >> memilih jenis modul fotovoltaik >> memilih *inverter* >> menentukan konfigurasi *string* >> menentukan orientasi dan sudut kemiringan modul >> memasukkan berbagai rugi-rugi *system* >> menjalankan simulasi >> menganalisis laporan hasil simulasi. Setelah proses simulasi selesai, *Pvsyst* menghasilkan laporan yang berisi berbagai parameter teknis sistem sehingga dapat digunakan sebagai dasar evaluasi performa. Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh (Yuniahastuti et al., 2025) menggunakan *Pvsyst* untuk menganalisis potensi daya listrik PLTS atap di Laboratorium Terpadu Universitas PGRI Madiun. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Pvsyst* mampu memperkirakan produksi energi listrik serta mengevaluasi kelayakan sistem sebelum proses implementasi. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa hasil simulasi dapat dijadikan acuan dalam proses perancangan maupun optimasi sistem PLTS.

Penelitian lainnya (Irwan Mahmudi et al., 2024) memanfaatkan *Pvsyst* untuk mengevaluasi performa sistem PLTS dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data aktual. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa perbedaan antara hasil simulasi dan kondisi nyata dipengaruhi oleh temperatur modul, kondisi cuaca, efisiensi *inverter*,

serta rugi-rugi sistem yang terjadi selama operasi. Penelitian lainnya (Amin & Nurtiyanto, 2024) juga menggunakan *Pvsyst* sebagai alat analisis dalam mengevaluasi desain sistem PLTS. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan perangkat lunak tersebut dapat membantu menentukan konfigurasi sistem yang optimal sehingga produksi energi listrik menjadi lebih efisien. Berbagai penelitian tersebut menunjukkan bahwa *Pvsyst* merupakan perangkat lunak yang andal untuk melakukan simulasi maupun evaluasi performa sistem fotovoltaik sehingga hasil analisis dapat dijadikan dasar dalam pengambilan keputusan teknis.

B. Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu dapat dilihat pada table dibawah ini :

No	Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Perbedaan dengan Penelitian Ini
1	(Yuniahastuti et al., 2025)	Analisis Potensi Daya Listrik Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Atap Menggunakan Perangkat Lunak <i>Pvsyst</i> di Laboratorium Terpadu UNIPMA	Penelitian menggunakan <i>Pvsyst</i> untuk menganalisis potensi produksi energi PLTS atap. Hasil simulasi menunjukkan bahwa <i>Pvsyst</i> mampu memperkirakan produksi energi listrik dan membantu proses perencanaan sistem.	Penelitian tersebut berfokus pada tahap perencanaan dan simulasi, sedangkan penelitian ini mengevaluasi kinerja sistem yang telah beroperasi menggunakan data aktual dan membandingkannya dengan hasil simulasi <i>Pvsyst</i> .
2	(Irwan Mahmudi et al., 2024)	Evaluasi performa PLTS	Menunjukkan adanya perbedaan antara hasil simulasi dan	Penelitian ini menggunakan objek berbeda, yaitu PLTS

No	Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Perbedaan dengan Penelitian Ini
		menggunakan <i>Pvsyst</i>	data aktual akibat pengaruh temperatur, irradiansi, dan rugi-rugi sistem.	<i>Rooftop</i> 87,4 kWp yang menyuplai <i>Hydrogen Plant</i> .
3	(Amin & Nurtiyanto, 2024)	Analisis desain PLTS menggunakan <i>Pvsyst</i>	Membuktikan bahwa <i>Pvsyst</i> dapat digunakan untuk menentukan konfigurasi sistem yang optimal dan meningkatkan estimasi produksi energi.	Penelitian ini lebih menitikberatkan pada evaluasi performa aktual dibandingkan optimasi desain.
4	(Govindarajan et al., 2024)	Analisis performa sistem fotovoltaik	Menjelaskan bahwa temperatur modul, bayangan, efisiensi <i>inverter</i> , dan kondisi cuaca sangat memengaruhi nilai <i>Performance Ratio</i> sistem PLTS.	Penelitian ini menghubungkan faktor-faktor tersebut dengan sistem PLTS yang digunakan sebagai suplai <i>Hydrogen Plant</i> .
5	(Rafhel Panjaitan et al., 2023)	Evaluasi kinerja PLTS berdasarkan IEC 61724	Menggunakan parameter Reference Yield, <i>Final Yield</i> , dan <i>Performance Ratio</i> untuk mengevaluasi performa sistem fotovoltaik.	Penelitian ini menggunakan parameter yang sama, tetapi objek dan lokasi penelitian berbeda.