

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Relevan

Dalam penyusunan proposal skripsi ini, dilakukan terlebih dahulu kajian penelitian yang dapat dijadikan acuan bagi penulis dalam merancang proposal, khususnya terkait dengan *Rancang Bangun PLTS untuk Optimasi dan Efisiensi Baterai pada Prototipe Green Hydrogen*. Oleh karena itu, hasil penelitian sebelumnya menjadi sangat penting sebagai dasar analisis dan perbandingan dalam penelitian ini. Beberapa penelitian yang relevan, baik berupa artikel maupun jurnal, dapat dipaparkan sebagai berikut:

1. (Idjanarko, 2021) Dalam penelitian yang berjudul “Implementasi Small PLTS Off Grid Berbasis Baterai LiFePO₄ pada Rumah Tinggal Daya Tenaga Surya 200 W”, Widjanarko mengembangkan sebuah sistem PLTS skala kecil yang menggunakan baterai LiFePO₄ sebagai media penyimpanan energi. Sistem ini dilengkapi dengan modul BMS untuk memantau parameter utama seperti tegangan, arus, dan suhu baterai. Hasil penelitian menunjukkan bahwa BMS mampu menjaga proses pengisian dan pengosongan agar tetap dalam batas aman sehingga memperpanjang umur baterai. Selain itu, penelitian ini menekankan bahwa pemanfaatan baterai LiFePO₄ pada sistem PLTS rumah tangga dapat memberikan solusi yang lebih stabil, ramah lingkungan, dan berkelanjutan dibandingkan dengan baterai konvensional.
2. (Widiatmoko, 2020) Dalam Penelitian ini yang berjudul “Pemanfaatan Sistem Hibrid Fotovoltaik – PLN pada Elektrolisis Kontinyu untuk Menghasilkan Hidrogen” membahas pengoperasian sistem energi berbasis PV yang dipadukan dengan sumber energi PLN untuk menjaga kesinambungan suplai listrik. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk memastikan produksi hidrogen melalui elektrolisis dapat berlangsung secara kontinyu meskipun intensitas cahaya matahari berfluktuasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi energi hibrid mampu menekan downtime produksi hidrogen, serta meningkatkan efisiensi sistem dengan mengurangi ketergantungan pada satu sumber energi.

3. (Sundari, n.d.) Dalam penelitian yang berjudul *“Green hydrogen production from solar-powered electrolysis: techno-economic feasibility”*, Sivagama Sundari mengevaluasi kelayakan teknis dan ekonomi produksi hidrogen hijau menggunakan tenaga surya. Hasil kajian menunjukkan bahwa salah satu tantangan utama adalah intermitensi daya PV yang menyebabkan operasi elektroliser tidak stabil. Oleh karena itu, penelitian ini merekomendasikan penggunaan sistem penyimpanan energi sebagai solusi untuk menjaga kontinuitas suplai daya, meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi surya, serta memperpanjang umur komponen sistem melalui operasi yang lebih terkendali dan tidak fluktuatif.
4. (Rania S. Nada et al., 2024) Dalam penelitian yang berjudul *“Standalone green hydrogen production powered by photovoltaic panels and solar atmospheric water harvesting hybrid system: Experimental investigation”*, Nada dan rekan-rekan mengembangkan sistem produksi hidrogen hijau mandiri yang ditenagai panel surya dan diuji secara eksperimen pada kondisi lingkungan nyata. Sistem terdiri dari modul PV, unit elektroliser, dan pengelolaan air sebagai sumber bahan baku elektrolisis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kestabilan suplai daya dari PV sangat menentukan laju dan kontinuitas produksi hidrogen, serta bahwa variasi kondisi operasi (misalnya konsentrasi elektrolit dan intensitas radiasi matahari) berpengaruh langsung terhadap efisiensi sistem. Penelitian ini menegaskan pentingnya integrasi penyimpanan energi untuk meredam fluktuasi daya PV agar proses elektrolisis dapat berlangsung lebih stabil dan efisien.
5. (Rahman, 2021) dalam penelitiannya yang berjudul *“Manajemen Energi pada Sistem Penyimpanan Baterai Berbasis BMS”* meneliti secara rinci peran BMS dalam mengatur arus pengisian, pengosongan, serta proteksi terhadap over-voltage dan under-voltage. Penelitian ini menunjukkan bahwa keberadaan BMS mampu memperpanjang umur baterai hingga 30–40% dibandingkan sistem tanpa manajemen baterai. Selain itu, data log dari BMS juga dapat digunakan untuk menganalisis pola degradasi baterai, yang memberikan nilai tambah dalam konteks penelitian ini, terutama untuk menjawab pertanyaan tentang hubungan siklus pengisian-pengosongan dengan degradasi performa.

6. (Antonio Sánchez-Squella et al., 2024) Dalam penelitian berjudul “*99.6% efficiency DC-DC coupling for green hydrogen production using PEM electrolyzer, photovoltaic generation and battery storage*”, Sánchez-Squella dan tim mengembangkan konfigurasi kopling DC-DC antara PV, baterai, dan elektroliser PEM untuk meminimalkan rugi-rugi konversi energi. Sistem penyimpanan baterai digunakan sebagai penyangga daya sehingga elektroliser dapat beroperasi pada titik kerja optimal meskipun iradiasi matahari berubah-ubah. Hasil pengujian menunjukkan peningkatan efisiensi konversi energi hingga mendekati 99,6% pada tahap pengkondisian daya, serta penurunan waktu henti operasi elektroliser. Penelitian ini menekankan bahwa manajemen energi berbasis baterai sangat penting untuk meningkatkan efisiensi total sistem PV–hidrogen.
7. (Ramadhan dkk., 2023) Dalam penelitiannya yang berjudul “Potensi Pengembangan Grafit untuk Proses Elektrifikasi sebagai Bahan Baku Baterai Guna Mendukung Industri Pertahanan Strategis”, Ramadhan dan rekan-rekan membahas potensi grafit sebagai material utama dalam pembuatan baterai karena memiliki konduktivitas listrik tinggi, stabilitas termal yang baik, serta kemampuan menyimpan energi yang cukup besar. Penelitian ini juga menyoroti bahwa Indonesia memiliki cadangan grafit alam yang melimpah sehingga berpeluang besar untuk mengurangi ketergantungan impor bahan baku baterai. Hasil penelitian tersebut relevan dengan topik ini karena menegaskan pentingnya pengembangan material baterai dengan konduktivitas tinggi dan stabilitas termal yang baik untuk meningkatkan efisiensi dan daya tahan sistem penyimpanan energi, sejalan dengan upaya optimasi performa baterai melalui pengendalian Depth of Discharge (DoD) dan manajemen suhu pada sistem energi surya–hidrogen.
8. (Wong & Li, 2025) Dalam penelitian yang berjudul “*Enhancing efficiency in photovoltaic hydrogen production: comparative analysis of MPPT and electrolysis control strategies*”, Wong dan Li membandingkan beberapa strategi kontrol daya antara sistem PV dan elektroliser, termasuk penggunaan Maximum Power Point Tracking (MPPT) dan pengaturan arus elektrolisis. Hasil studi menunjukkan bahwa kontrol yang mampu menjaga suplai daya

tetap stabil menghasilkan produksi hidrogen yang lebih kontinu dan efisien dibandingkan kontrol konvensional yang mengikuti fluktuasi daya PV secara langsung. Penelitian ini menegaskan perlunya elemen penyimpanan atau penyangga energi agar strategi kontrol dapat bekerja optimal tanpa mengganggu stabilitas elektroliser.

9. (Irawati dkk., 2023) Dalam penelitiannya yang berjudul “Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dengan Sistem Kontrol Automatic Transfer Switch (ATS) dan Optimalisasi Kapasitas Baterai”, Irawati dan rekan-rekan merancang sistem PLTS yang dilengkapi dengan kontrol otomatis untuk mengatur perpindahan sumber daya antara PLN dan PLTS secara efisien. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem ATS mampu melakukan perpindahan daya otomatis antara dua sumber dengan mode prioritas yang dapat diatur, baik PLN sebagai sumber utama maupun PLTS sebagai cadangan. Selain itu, pengujian Low Voltage Disconnect (LVD) dan Auto Cut Charging Protection menunjukkan sistem dapat melindungi baterai dari kondisi overdischarge dan overcharge dengan batas kerja masing-masing pada 10,8V dan 13,8V. Penelitian ini relevan karena menegaskan pentingnya sistem kontrol otomatis dan manajemen baterai untuk menjaga efisiensi serta memperpanjang umur baterai, sejalan dengan penelitian ini yang fokus pada peningkatan daya tahan dan efisiensi sistem penyimpanan energi melalui pengendalian Depth of Discharge (DoD) dan manajemen suhu pada sistem energi surya–hidrogen.
10. (Hafiz Ali Muhammad et al., 2024) Dalam penelitian berjudul “*Solar hydrogen production: techno-economic analysis of a concentrated solar-powered high-temperature electrolysis system*”, Muhammad dan rekan-rekan menganalisis kinerja teknis dan ekonomi sistem produksi hidrogen berbasis energi surya. Hasil analisis menunjukkan bahwa efisiensi sistem sangat dipengaruhi oleh kestabilan suplai energi listrik ke elektroliser, karena fluktuasi daya meningkatkan rugi-rugi dan menurunkan produktivitas hidrogen. Studi ini menyoroti bahwa integrasi sistem penyimpanan energi dapat menurunkan biaya produksi hidrogen jangka panjang dengan cara meningkatkan faktor kapasitas operasi elektroliser.

Berdasarkan berbagai penelitian terdahulu yang telah diuraikan, terdapat keterkaitan yang kuat dengan penelitian yang penulis lakukan berjudul “Rancang Bangun PLTS untuk Optimasi dan Efisiensi Baterai pada Prototipe *Green Hydrogen Plant*.” Meskipun penelitian mengenai energi surya dan teknologi produksi hidrogen telah banyak dilakukan, kajian yang secara khusus menitikberatkan pada peran baterai sebagai penyangga energi dalam menjaga kestabilan suplai daya pada sistem green hydrogen masih tergolong terbatas. Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih berfokus pada peningkatan performa panel surya atau efisiensi elektroliser secara terpisah, sedangkan penelitian ini diarahkan pada perancangan sistem PLTS yang terintegrasi dengan strategi optimasi baterai guna meningkatkan efisiensi penyimpanan energi, menjaga kestabilan suplai daya, serta memperpanjang umur pakai baterai. Melalui pendekatan tersebut, prototipe green hydrogen yang dikembangkan diharapkan dapat beroperasi lebih stabil, efisien, dan berkelanjutan sebagai bagian dari pengembangan teknologi energi terbarukan yang ramah lingkungan.

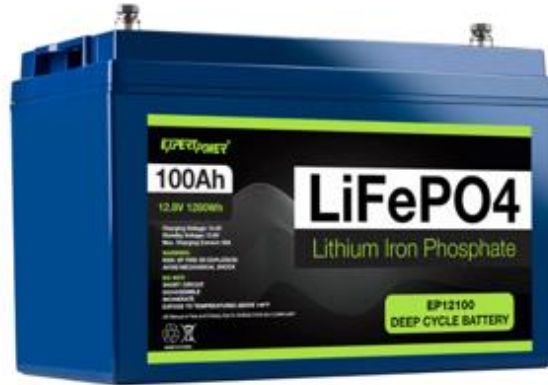
2.2 Landasan Teori

2.2.1 Baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄)

Baterai merupakan komponen penting dalam sistem PLTS yang berfungsi sebagai media penyimpanan energi listrik cadangan. Energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya dalam bentuk arus searah (DC) tidak selalu langsung digunakan oleh beban, tetapi terlebih dahulu disimpan di dalam baterai. Energi yang tersimpan ini kemudian dapat digunakan kembali saat panel surya tidak mampu menghasilkan daya yang cukup, misalnya pada malam hari atau ketika kondisi cuaca mendung (Aita Diantari et al., n.d.).

Baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) merupakan salah satu jenis baterai lithium-ion modern yang banyak digunakan saat ini. Keunggulan utama baterai LiFePO₄ terletak pada kestabilan termalnya yang tinggi, memiliki umur pakai yang panjang dengan siklus pengisian lebih dari 2000 hingga 5000 kali, bobot yang relatif ringan, efisiensi energi mencapai lebih dari 95%, serta tingkat keamanan yang lebih baik karena risiko panas berlebih maupun kebakaran sangat

rendah. Hal tersebut membuat baterai ini semakin banyak dimanfaatkan pada sistem energi terbarukan, terutama dalam penyimpanan energi dari panel surya.



Gambar 2. 1 Baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4)

Sumber : [Baterai Lithium Iron Phosphate \(\$\text{LiFePO}_4\$ \)](#)

Baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4) dengan material LiFePO_4 sebagai katoda dan grafit karbon sebagai anoda. Teknologi ini dikembangkan untuk mengatasi kekurangan baterai konvensional seperti baterai timbal-asam yang cenderung lebih berat, memiliki umur lebih singkat, dan terbatas dalam jumlah siklus pengisian. Dalam penerapannya pada sistem energi surya untuk produksi hidrogen ramah lingkungan, baterai LiFePO_4 berfungsi sebagai media penyimpanan energi listrik yang lebih stabil dan efisien dibandingkan baterai timbal-asam. Energi yang tersimpan di dalamnya kemudian digunakan untuk mengoperasikan sistem elektroliser, yaitu perangkat yang memecah air menjadi hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2). Keandalan baterai sangat berperan penting, sebab proses elektrolisis membutuhkan suplai energi yang konsisten dan berkesinambungan.

Prinsip kerjanya didasarkan pada reaksi redoks. Selama proses pengosongan (discharge), elektron mengalir dari anoda ke katoda melalui sirkuit eksternal, menghasilkan arus listrik yang dapat dimanfaatkan. Sebaliknya, pada baterai isi ulang (rechargeable), proses ini dapat dibalik dengan mengalirkan arus listrik dari sumber eksternal untuk mengembalikan komposisi kimia sel, sehingga energi dapat disimpan kembali.

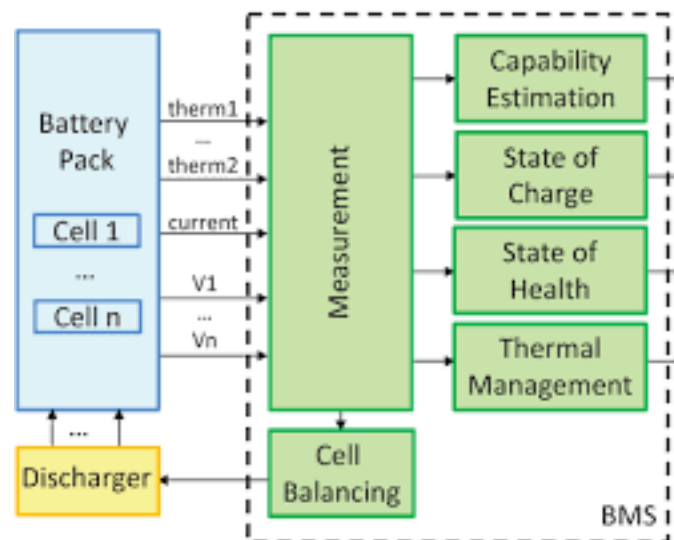
Dalam sistem energi surya, baterai memainkan peran krusial sebagai media penyimpanan energi. Energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya tidak

selalu stabil dan ketersediaannya bergantung pada kondisi cuaca. Oleh karena itu, baterai berfungsi untuk menampung kelebihan energi yang dihasilkan pada siang hari, yang kemudian dapat dilepaskan untuk memenuhi kebutuhan listrik pada malam hari atau saat kondisi mendung. Penggunaan baterai memastikan pasokan energi yang konsisten dan stabil.

2.2.2 Metode Peningkatan Daya Tahan Baterai

1. Batteray Management System (BMS)

Battery Management System (BMS) merupakan sebuah rangkaian elektronik yang dirancang khusus untuk mengelola, mengawasi, dan menjaga kinerja baterai agar dapat berfungsi secara optimal. Keberadaan BMS sangat penting karena baterai, terutama jenis lithium-ion, memiliki karakteristik yang sensitif terhadap kondisi operasional seperti tegangan, arus, serta suhu. Tanpa adanya sistem pengendali yang baik, baterai berisiko mengalami kerusakan, penurunan kapasitas lebih cepat, hingga potensi bahaya seperti kebakaran akibat overheating. Oleh karena itu, fungsi utama BMS bukan hanya memastikan baterai bekerja dengan efisien, tetapi juga memberikan jaminan keamanan, meningkatkan keandalan sistem, serta memperpanjang umur pemakaian baterai.



Gambar 2. 2 Batteray Management System (BMS)

Sumber : <https://evreporter.com/battery-management-system-for-electric-vehicles/>

BMS melakukan pemantauan terhadap parameter utama baterai, di antaranya tegangan, arus, dan suhu. Pemantauan ini diperlukan agar kondisi baterai selalu berada dalam batas aman sesuai spesifikasi. Selain itu, BMS juga menjalankan fungsi penting berupa cell balancing. Proses cell balancing ini bertujuan untuk menjaga agar tingkat muatan atau State of Charge (SOC) pada setiap sel baterai tetap seimbang. Tanpa cell balancing, perbedaan kecil pada kapasitas antar sel dapat menimbulkan ketidakseragaman pengisian maupun pengosongan, sehingga menurunkan efisiensi sistem dan berpotensi memperpendek umur baterai secara keseluruhan.

BMS berfungsi sebagai sistem proteksi terhadap kondisi berbahaya yang dapat terjadi selama proses pengisian dan pengosongan. Kondisi berbahaya yang dimaksud antara lain overcharge (tegangan berlebih pada baterai), overdischarge (tegangan terlalu rendah akibat pengosongan berlebih), serta overtemperature (kenaikan suhu berlebihan yang dapat memicu degradasi baterai). Dengan adanya sistem perlindungan ini, baterai dapat beroperasi dalam rentang kerja yang aman sehingga risiko kerusakan dapat diminimalisir.

Menurut hasil penelitian yang dilakukan oleh Lu et al. (2013), penerapan Battery Management System dengan desain yang baik terbukti mampu memperpanjang umur siklus baterai sekitar 30–40%. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan BMS bukan sekadar perangkat tambahan, melainkan bagian integral dari sistem penyimpanan energi modern. Khususnya pada aplikasi energi terbarukan seperti penyimpanan energi panel surya maupun kendaraan listrik, BMS berperan penting dalam menjaga kestabilan suplai daya dan memastikan baterai dapat digunakan dalam jangka waktu lebih lama dengan performa yang tetap optimal.

2. Strategi Kontrol Pengisian dan Pengosongan

Proses pengisian dan pengosongan baterai tidak bisa dilakukan secara sembarangan, melainkan harus diatur dengan strategi tertentu agar umur pakai atau cycle life baterai dapat bertahan lebih lama, efisiensi energi tetap terjaga, serta risiko terjadinya degradasi pada sel baterai dapat diminimalisir. Hal ini menjadi sangat penting terutama pada sistem energi surya yang digunakan

untuk produksi hidrogen, sebab kestabilan suplai listrik berpengaruh langsung terhadap kinerja elektroliser dalam memecah air menjadi hidrogen dan oksigen.

a. Metode Constant Current–Constant Voltage (CC-CV)

Metode ini merupakan strategi standar yang paling banyak digunakan dalam pengisian baterai. Pada tahap awal proses, arus dijaga dalam kondisi konstan hingga baterai mencapai tegangan maksimumnya. Setelah itu, pengisian dilanjutkan dengan menjaga tegangan tetap konstan sampai arus berangsur-angsur menurun. Dengan mekanisme tersebut, proses pengisian berlangsung lebih cepat, kondisi sel baterai tetap stabil, dan risiko kerusakan akibat stres pada baterai dapat dikurangi (Chen & Rincón-Mora, 2006).

b. Pulse Charging

Strategi ini menggunakan arus berbentuk pulsa selama proses pengisian. Teknik ini memiliki tujuan utama untuk mengurangi polarisasi pada elektroda serta mencegah terjadinya penumpukan ion yang berpotensi merusak sel baterai. Berdasarkan hasil penelitian, metode pulse charging mampu memperpanjang umur pakai baterai hingga 25% lebih lama dibandingkan metode pengisian konvensional (Amanor-Boadu et al., 2018).

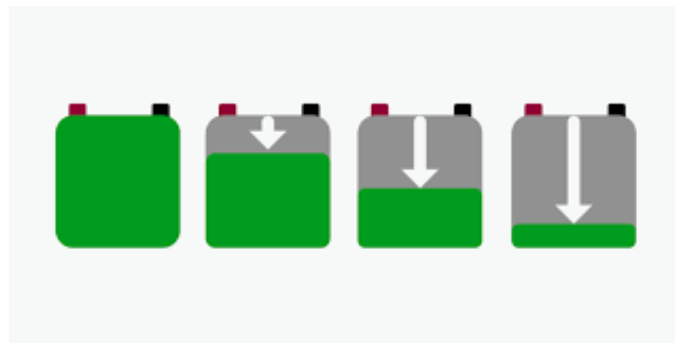
c. Temperature Management

Suhu merupakan salah satu faktor paling berpengaruh terhadap kinerja dan daya tahan baterai. Proses pengisian akan lebih aman dan efisien apabila dilakukan pada rentang suhu optimal, yaitu sekitar 20–25°C. Sebaliknya, jika suhu meningkat hingga 10°C di atas batas normal, maka cycle life baterai dapat menurun hingga 50% (Wang et al., 2016). Oleh sebab itu, Battery Management System (BMS) perlu dilengkapi dengan sistem pendingin atau mekanisme kontrol suhu untuk menjaga stabilitas termal baterai agar tetap berada pada kondisi ideal.

A. Optimasi Kedalaman Pengisian-Pengosongan (Depth of Discharge/DOD)

Kedalaman pengosongan atau Depth of Discharge (DoD) merupakan parameter yang menunjukkan seberapa besar energi yang dikeluarkan dari

baterai dalam satu siklus penggunaan, dan faktor ini sangat berpengaruh terhadap umur pemakaian baterai. Semakin rendah DoD yang diterapkan, maka semakin panjang pula umur siklus yang bisa dicapai. Sebagai contoh, jika baterai hanya digunakan hingga DoD sekitar 20%, jumlah siklus hidupnya akan jauh lebih banyak dibandingkan baterai yang dioperasikan dengan DoD tinggi, misalnya 80%. Oleh karena itu, menjaga baterai agar tetap berada pada kondisi DoD dangkal menjadi salah satu strategi yang efektif untuk memperpanjang masa pakai. Meski demikian, strategi ini menuntut kapasitas baterai yang lebih besar sejak awal agar kebutuhan energi tetap dapat terpenuhi.



Gambar 2. 3 Pengisian-Pengosongan (Depth of Discharge/DOD)

Sumber : <https://holobattery.com/ko/blog/page/3/>

Pembatasan DoD terbukti menjadi salah satu strategi penting dalam upaya menjaga keawetan baterai. Jika baterai digunakan hingga pengosongan penuh (DoD 100%), maka umur siklusnya hanya dapat bertahan sekitar 500–1000 kali. Namun, apabila pengosongan dibatasi pada kisaran 50%, baterai dapat mencapai usia pakai hingga 3000–5000 siklus (Peterson et al., 2010). Dengan demikian, menjaga DoD pada level moderat mampu memberikan dampak signifikan dalam memperpanjang umur baterai sekaligus meningkatkan keandalan sistem penyimpanan energi.

2.2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan energi matahari untuk diubah menjadi energi listrik melalui modul fotovoltaik (photovoltaic module). PLTS termasuk dalam kategori energi hijau karena menggunakan sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan dan tidak menghasilkan emisi selama proses pembangkitan. Selain itu, PLTS memiliki beberapa keunggulan seperti sumber energi yang melimpah, biaya operasional yang relatif rendah, serta sistem yang semakin andal seiring perkembangan teknologi. Dengan memanfaatkan energi matahari, PLTS dapat menjadi salah satu solusi alternatif dalam memenuhi kebutuhan energi listrik secara lebih efisien dan berkelanjutan, baik untuk penggunaan skala kecil maupun skala yang lebih besar (Gifson et al., n.d.).

Perencanaan pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), aspek efisiensi menjadi tantangan utama karena berkaitan dengan kemampuan mengoptimalkan konversi radiasi harian menjadi energi listrik. Pemanfaatan energi baru terbarukan dapat menjadi solusi untuk menambah dan menjamin ketersediaan energi listrik secara berkelanjutan (Christiono et al., 2023). Salah satu sumber energi yang paling potensial adalah pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) yang mengubah energi cahaya matahari menjadi energi Listrik (Purwanto et al., 2022). Pada penelitian ini, konsep tersebut tidak hanya diterapkan untuk kebutuhan listrik umum, tetapi dikembangkan lebih lanjut sebagai sumber energi utama yang digunakan untuk mengisi baterai dan mendukung proses produksi hidrogen melalui elektrolisis.

Dengan memanfaatkan PLTS, energi matahari yang bersifat bersih dan melimpah dapat dipanen pada siang hari, kemudian disimpan di dalam baterai agar dapat digunakan secara stabil kapan pun dibutuhkan. Pendekatan ini membuat sistem tidak bergantung langsung pada fluktuasi sinar matahari, karena baterai berfungsi sebagai penyimpan sekaligus penstabil energi sebelum disalurkan ke elektroliser. Oleh karena itu, integrasi PLTS dan baterai pada penelitian ini menjadi dasar dalam membangun sistem produksi hidrogen yang lebih efisien, berkelanjutan, dan ramah lingkungan sebagai bagian dari pengembangan teknologi energi masa depan.



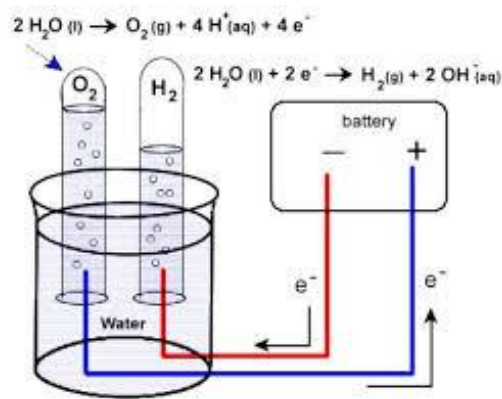
Gambar 2. 4 Pembangkit Tenaga Listrik

Sumber : [Pembangkit Tenaga Listrik](#)

Dalam pengoperasiannya, Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) perlu memperhatikan beberapa faktor agar konversi energi matahari menjadi energi listrik dapat berlangsung secara maksimal. Faktor-faktor tersebut antara lain kondisi cuaca, tingkat kelembaban, temperatur pada permukaan sel surya, serta arah dan aliran angin di sekitar panel surya, karena semuanya dapat memengaruhi kinerja dan efisiensi panel dalam menghasilkan daya Listrik (Makkulau et al., 2020).

2.2.4 Elektrolisis Air

Elektrolisis air merupakan suatu proses yang memanfaatkan energi listrik untuk memisahkan molekul air menjadi hampir 100% hidrogen murni. Pada proses ini, molekul air (H_2O) diuraikan menjadi gas hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2) dengan bantuan arus listrik. Prinsip kerjanya didasarkan pada aliran arus searah (DC) yang dialirkan melalui dua elektroda, yaitu katoda bermuatan negatif dan anoda bermuatan positif, yang ditempatkan di dalam air dengan tambahan zat elektrolit guna meningkatkan konduktivitas. Melalui elektroda tersebut berlangsung reaksi redoks yang menyebabkan air terurai menjadi hidrogen pada katoda dan oksigen pada anoda.



Gambar 2. 5 Elektrolisis Air

Sumber : [*Elektrolisis Air*](#)

Efisiensi dari proses elektrolisis sangat dipengaruhi oleh kestabilan pasokan listrik. Mengingat energi surya memiliki sifat fluktuatif karena dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari, maka keberadaan baterai menjadi sangat penting dalam sistem ini. Baterai berfungsi untuk menyimpan energi terlebih dahulu, kemudian menyalurkannya secara stabil dan terkontrol ke elektroliser sehingga proses pemisahan air dapat berlangsung dengan efisiensi tinggi.

Dengan demikian, peningkatan kualitas, efisiensi, serta daya tahan baterai akan memberikan pengaruh langsung terhadap kinerja sistem produksi hidrogen hijau (green hydrogen plant). Baterai yang andal mampu menjaga suplai listrik tetap stabil sehingga produksi hidrogen dari energi surya dapat berlangsung lebih optimal, efisien, dan berkelanjutan.

2.2.5 Buck Converter

Buck converter merupakan salah satu jenis konverter arus searah (DC-DC converter) yang berfungsi untuk menurunkan tingkat tegangan DC dari sumber menjadi tegangan yang lebih rendah sesuai kebutuhan beban (Teknik Elektro et al., n.d.). Prinsip kerja buck converter memanfaatkan proses switching menggunakan komponen seperti MOSFET, dioda, induktor, dan kapasitor untuk mengatur rata-rata tegangan keluaran secara efisien. Dibandingkan dengan metode penurunan tegangan secara linear, buck converter memiliki efisiensi yang lebih tinggi karena energi tidak banyak terbuang dalam bentuk panas.



Gambar 2. 6 Buck Converter

Sumber : [Buck Converter](#)

Salah satu jenis konverter penurun tegangan DC yang bekerja menggunakan prinsip Switching Mode Power Supply (SMPS). Dibandingkan dengan power supply linier, buck converter memiliki tingkat efisiensi yang jauh lebih tinggi, bahkan dapat mencapai lebih dari 90%, karena proses pengaturan tegangannya dilakukan melalui teknik switching, bukan dengan membuang energi dalam bentuk panas. Prinsip kerjanya memanfaatkan karakteristik induktor dalam merespons perubahan arus berfrekuensi tinggi serta penggunaan pulsa tegangan untuk mengatur nilai keluaran.

2.2.6 Solar Charge Controller

Solar Charge Controller (SCC) merupakan perangkat elektronika daya yang berfungsi untuk mengatur proses pengisian dan pengosongan baterai pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Perangkat ini bekerja dengan mengontrol arus dan tegangan DC yang berasal dari panel surya sebelum disalurkan ke baterai, sehingga proses pengisian dapat berlangsung secara optimal dan aman. SCC dilengkapi dengan sistem proteksi seperti *overcharge protection* untuk mencegah baterai menerima arus berlebih ketika kapasitas sudah penuh, serta *overdischarge protection* yang berfungsi memutus beban saat tegangan baterai turun di bawah batas aman. Selain itu, SCC juga berperan dalam menjaga

kestabilan tegangan keluaran menuju beban dengan meminimalkan fluktuasi daya dari panel surya.

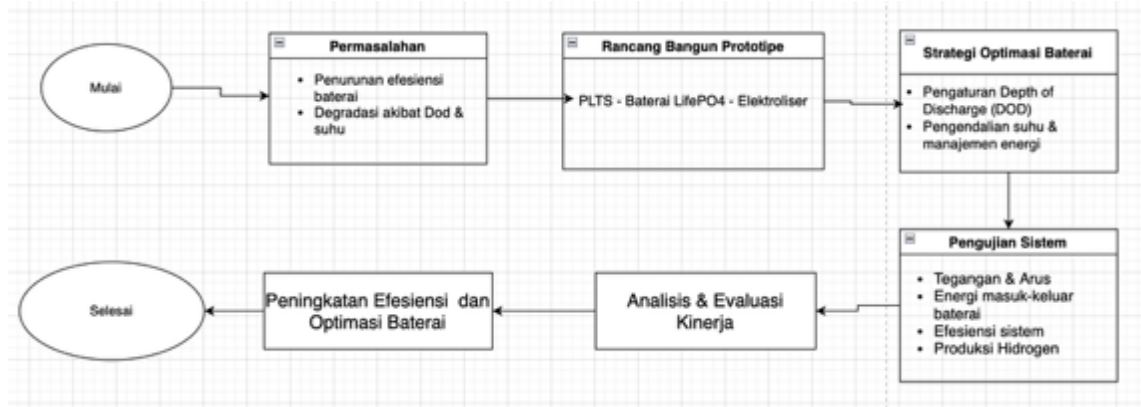


Gambar 3. 1 Solar Charge Controller

Sumber : [Solar Charge Controller](#)

Secara umum, Solar Charge Controller terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu Pulse Width Modulation (PWM) dan Maximum Power Point Tracking (MPPT). SCC tipe PWM bekerja dengan metode pensaklaran sederhana untuk mengatur tegangan pengisian, sedangkan SCC tipe MPPT menggunakan algoritma pelacakan titik daya maksimum sehingga mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi panel surya. Pada sistem PLTS berbasis penyimpanan energi, penggunaan SCC sangat penting karena tidak hanya melindungi baterai dari kerusakan akibat tegangan berlebih, tetapi juga membantu meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan melalui pengaturan manajemen energi yang lebih stabil.

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2. 7 Kerangka Pemikiran

1. Mulai

Penelitian diawali dengan tahap Mulai, yang menandai dimulainya seluruh rangkaian proses penelitian.

2. Permasalahan

Pada tahap ini diidentifikasi permasalahan utama yang menjadi fokus penelitian, yaitu penurunan efisiensi baterai serta degradasi baterai akibat pengaturan Depth of Discharge (DoD) dan suhu operasi yang tidak optimal. Permasalahan ini berdampak langsung pada kestabilan suplai daya ke elektroliser dan menurunkan efisiensi produksi hidrogen.

3. Rancang Bangun Prototipe

Pada tahap ini dirancang dan direalisasikan sebuah prototipe sistem yang terdiri dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄), dan elektroliser. Prototipe ini bertujuan untuk mensimulasikan sistem produksi hidrogen berbasis energi surya dalam skala laboratorium, sehingga memungkinkan pengujian dan evaluasi kinerja sistem secara terkontrol.

4. Strategi Optimasi Baterai

Pada tahap ini diterapkan strategi pengelolaan baterai untuk meningkatkan efisiensi dan optimasi. Strategi yang digunakan meliputi pengaturan kedalaman pengosongan baterai (Depth of Discharge/DoD) dan manajemen energi. Pengaturan ini bertujuan untuk mengurangi stres kerja baterai selama proses pengisian dan pengosongan, sehingga degradasi baterai dapat diminimalkan.

5. Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan untuk memperoleh data kinerja sistem secara kuantitatif. Parameter yang diukur meliputi tegangan dan arus listrik, energi masuk dan keluar baterai, efisiensi sistem, serta produksi hidrogen yang dihasilkan oleh elektroliser. Data ini digunakan untuk menilai pengaruh strategi optimasi baterai terhadap performa sistem secara keseluruhan.

6. Analisis dan Evaluasi Kinerja

Pada tahap ini dilakukan pengolahan dan interpretasi data untuk mengevaluasi kinerja baterai dan sistem PLTS–hidrogen, serta membandingkan hasil sebelum dan sesudah penerapan strategi optimasi baterai.

7. Peningkatan Efisiensi Sistem

Berdasarkan hasil analisis dan evaluasi, diperoleh gambaran mengenai peningkatan efisiensi pemanfaatan energi akibat penerapan strategi optimasi yang dilakukan. Tahap ini menunjukkan ketercapaian tujuan utama penelitian.

8. Selesai

Tahap dari akhir penelitian ini Setelah kesimpulan ditarik, penelitian dinyatakan Selesai.