

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

2.1.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pemanfaatan sumber energi terbarukan menjadi salah satu upaya untuk mendukung penyediaan energi listrik yang berkelanjutan. Salah satu teknologi yang banyak diterapkan adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), yaitu sistem yang mengonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik melalui modul *photovoltaic* (PV). Energi cahaya matahari akan dikonversi menjadi energi listrik melalui proses efek fotovoltaiik yang terjadi pada material semikonduktor di dalam sel surya. PLTS menjadi salah satu teknologi energi terbarukan yang banyak dikembangkan karena ramah lingkungan dan mampu mengurangi penggunaan bahan bakar fosil (Hendi Bagja Nurjaman dan Trisna Purnama, 2022)

Perkembangan teknologi PLTS saat ini mengalami peningkatan yang cukup signifikan terutama pada efisiensi konversi energi panel surya. Efisiensi panel surya yang semakin tinggi menyebabkan sistem PLTS lebih optimal dalam menghasilkan energi listrik sehingga penggunaannya semakin luas baik pada sektor rumah tangga, industri, maupun pembangkit listrik skala besar. Selain itu, penggunaan PLTS juga dinilai mampu mendukung program pengurangan emisi karbon dan transisi energi bersih di berbagai negara (Green et al., 2023).

Sistem PLTS terdiri dari beberapa komponen utama seperti panel surya, solar charge controller, inverter, dan baterai. Panel surya berfungsi mengubah

energi cahaya matahari menjadi energi listrik arus searah (DC), sedangkan inverter digunakan untuk mengubah arus DC menjadi arus bolak-balik (AC) agar dapat digunakan oleh peralatan listrik. Pada sistem off-grid, baterai digunakan sebagai media penyimpanan energi sehingga suplai listrik tetap tersedia saat malam hari atau ketika intensitas cahaya matahari rendah (Power et al., 2021).

2.1.2 Prinsip Kerja PLTS

Prinsip kerja PLTS dimulai ketika cahaya matahari mengenai permukaan panel surya yang tersusun dari sel fotovoltaik berbahan semikonduktor. Foton dari cahaya matahari akan memindahkan elektron pada material semikonduktor sehingga menghasilkan arus listrik searah (DC). Besarnya energi listrik yang dihasilkan panel surya dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari, suhu lingkungan, serta luas permukaan panel surya yang digunakan (Julian et al., 2023)

Energi listrik DC yang dihasilkan panel surya selanjutnya dialirkan menuju solar charge controller untuk mengatur proses pengisian baterai. Solar charge controller berfungsi menjaga kestabilan tegangan dan arus agar baterai tidak mengalami overcharging maupun overdischarging. Penggunaan metode Maximum Power Point Tracking (MPPT) pada solar charge controller mampu meningkatkan efisiensi pengisian energi karena dapat menyesuaikan titik daya maksimum panel surya secara otomatis (Samuel et al., 2022)

Energi listrik yang tersimpan di dalam baterai kemudian diubah oleh inverter menjadi arus bolak-balik (AC) sehingga dapat digunakan oleh

berbagai peralatan listrik rumah tangga maupun industri. Pada sistem PLTS off-grid, baterai memiliki peranan penting sebagai penyimpan energi cadangan untuk menjaga kontinuitas suplai listrik ketika panel surya tidak menghasilkan energi secara optimal. Oleh karena itu, pemilihan kapasitas baterai dan inverter sangat mempengaruhi kinerja dan efisiensi sistem PLTS secara keseluruhan (Lestari et al., 2024).

2.1.3 Komponen Utama PLTS

Pada sistem PLTS terdiri dari beberapa komponen utama yang saling terintegrasi, yaitu:

a. Panel Surya (Photovoltaic/PV)

Panel surya merupakan komponen utama dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang berfungsi mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui proses fotovoltaiik. Panel surya tersusun dari beberapa sel surya berbahan semikonduktor yang mampu menghasilkan arus listrik searah (DC) ketika terkena paparan sinar matahari. Energi listrik yang dihasilkan panel surya sangat dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari, suhu lingkungan, serta kondisi pemasangan panel. Semakin besar intensitas cahaya yang diterima, maka semakin besar pula daya listrik yang dapat dihasilkan oleh panel surya (Lestari et al., 2024).

Selain sebagai sumber energi utama, panel surya juga menentukan kapasitas pembangkitan pada sistem PLTS. Pemilihan kapasitas panel harus disesuaikan dengan kebutuhan energi beban agar sistem dapat beroperasi secara optimal. Kinerja panel surya dapat mengalami penurunan akibat peningkatan suhu

permukaan panel, penumpukan debu, maupun perubahan arah datangnya sinar matahari. Oleh karena itu, perencanaan dan pemasangan panel surya yang tepat sangat diperlukan untuk meningkatkan efisiensi sistem PLTS secara keseluruhan (Ebhotu & Tabakov, 2022).



Gambar 2. 1Panel Surya

b. Solar Charge Controller (SCC)

Solar Charge Controller (SCC) merupakan perangkat elektronik yang berfungsi mengatur proses pengisian energi dari panel surya menuju baterai. SCC berperan dalam menjaga kestabilan tegangan dan arus sehingga baterai dapat terisi dengan aman tanpa mengalami pengisian berlebih (overcharge). Selain itu, SCC juga melindungi baterai dari kondisi pengosongan berlebih (overdischarge) yang dapat menyebabkan penurunan kapasitas dan umur pakai baterai (Ghaeminezhad, 2022).

Pada sistem PLTS, SCC umumnya terdiri dari dua jenis yaitu Pulse Width Modulation (PWM) dan Maximum Power Point Tracking (MPPT). SCC tipe MPPT memiliki efisiensi yang lebih tinggi karena mampu menyesuaikan titik

daya maksimum yang dihasilkan panel surya sehingga energi yang diserap baterai menjadi lebih optimal. Penggunaan SCC sangat penting untuk meningkatkan keandalan sistem PLTS sekaligus menjaga performa baterai dalam jangka panjang (Gayungan, 2022).



Gambar 2. 2 Solar Charge Controller

Sumber : <https://share.google/TJuTEPrOA6laOFqK1>

c. Baterai

Baterai merupakan komponen penyimpanan energi pada sistem PLTS yang berfungsi menyimpan energi listrik hasil konversi panel surya pada siang hari untuk digunakan kembali saat malam hari atau ketika intensitas cahaya matahari rendah. Energi yang tersimpan dalam baterai berbentuk energi kimia dan akan dikonversi kembali menjadi energi listrik ketika dibutuhkan oleh beban. Pada sistem PLTS off-grid, baterai menjadi komponen yang sangat penting karena berperan sebagai sumber cadangan energi utama (Noor Hidayati dan Arifia Ekayuliana, 2021).

Jenis baterai yang banyak digunakan pada sistem PLTS antara lain baterai VRLA, AGM, Gel, dan Lithium-ion. Pemilihan baterai harus mempertimbangkan kapasitas penyimpanan, efisiensi, umur pakai, serta nilai

Depth of Discharge (DOD). Pengelolaan pengisian dan pengosongan baterai yang baik dapat meningkatkan umur pemakaian serta menjaga stabilitas suplai energi pada sistem PLTS. Oleh karena itu, penggunaan baterai yang sesuai dengan kebutuhan beban sangat menentukan keberhasilan operasi sistem surya (Julian et al., 2023).



Gambar 2. 3 Baterai

<https://share.google/pC9N5Lh6geLk2Kp71>

d. Inverter

Inverter merupakan perangkat yang berfungsi mengubah energi listrik arus searah (DC) dari panel surya atau baterai menjadi energi listrik arus bolak-balik (AC). Proses konversi ini diperlukan karena sebagian besar peralatan rumah tangga dan industri menggunakan sumber listrik AC. Dengan adanya inverter, energi yang tersimpan pada baterai dapat digunakan untuk mengoperasikan berbagai peralatan listrik secara langsung (Power et al., 2021).

Selain melakukan konversi daya, inverter modern juga dilengkapi berbagai fitur proteksi seperti perlindungan terhadap beban berlebih, hubung singkat, serta pemantauan kondisi sistem secara real-time. Efisiensi inverter menjadi

salah satu faktor penting dalam sistem PLTS karena rugi-rugi daya selama proses konversi dapat mempengaruhi kinerja keseluruhan sistem. Inverter dengan efisiensi tinggi mampu mengurangi kehilangan energi sehingga daya yang disalurkan ke beban menjadi lebih optimal (Qu et al., 2021).



Gambar 2. 4 Inverter

Sumber : <https://share.google/D4XlxfqtCxIMTQtGe>

2.2 Jenis -Jenis PLTS

Berdasarkan konfigurasi dan cara operasinya, sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis utama, yaitu:

a. PLTS On-Grid (Grid-Tied System)

PLTS On-Grid merupakan sistem pembangkit listrik tenaga surya yang terhubung langsung dengan jaringan listrik PLN. Sistem ini bekerja dengan memanfaatkan energi listrik yang dihasilkan panel surya untuk menyuplai kebutuhan beban, sedangkan kekurangan energi akan dipenuhi oleh jaringan PLN. Pada kondisi tertentu, energi listrik yang berlebih dapat disalurkan kembali ke jaringan listrik sesuai dengan kebijakan yang berlaku. PLTS On-Grid banyak digunakan pada perumahan, gedung perkantoran, maupun sektor industri karena tidak memerlukan baterai sebagai media penyimpanan energi sehingga biaya investasi awal relatif lebih rendah dibandingkan sistem lainnya

(Cacuci, 2022).

Keunggulan utama PLTS On-Grid adalah efisiensi sistem yang lebih tinggi karena energi yang dihasilkan panel surya dapat langsung digunakan oleh beban tanpa melalui proses penyimpanan baterai. Selain itu, biaya perawatan sistem juga lebih rendah karena jumlah komponen yang digunakan lebih sedikit. Namun, sistem ini memiliki kelemahan yaitu tidak dapat beroperasi saat terjadi pemadaman listrik PLN karena inverter akan otomatis berhenti bekerja demi menjaga keamanan jaringan listrik. Oleh sebab itu, PLTS On-Grid lebih cocok digunakan pada daerah yang memiliki pasokan listrik PLN yang stabil (Julian et al., 2023).

b. PLTS Off-Grid (Stand-Alone System)

PLTS Off-Grid merupakan sistem pembangkit listrik tenaga surya yang bekerja secara mandiri tanpa terhubung ke jaringan listrik PLN. Sistem ini menggunakan baterai sebagai media penyimpanan energi sehingga listrik yang dihasilkan panel surya pada siang hari dapat digunakan kembali pada malam hari atau saat cuaca mendung. PLTS Off-Grid umumnya diterapkan pada daerah terpencil yang belum mendapatkan akses jaringan listrik atau lokasi yang sulit dijangkau oleh infrastruktur kelistrikan konvensional (Noor Hidayati dan Arifia Ekayuliana, 2021).

Pada sistem Off-Grid, kapasitas panel surya dan baterai harus dirancang dengan baik agar mampu memenuhi kebutuhan energi beban selama periode tertentu. Keunggulan sistem ini adalah mampu menyediakan energi listrik secara mandiri tanpa ketergantungan pada PLN. Namun, biaya investasi yang

diperlukan relatif lebih besar karena membutuhkan baterai dengan kapasitas penyimpanan yang cukup besar. Selain itu, umur baterai menjadi salah satu faktor penting yang mempengaruhi keandalan dan biaya operasional sistem PLTS Off-Grid (Noor Hidayati dan Arifia Ekayuliana, 2021)

c. PLTS Hybrid

PLTS Hybrid merupakan sistem pembangkit listrik tenaga surya yang menggabungkan lebih dari satu sumber energi, seperti panel surya, baterai, jaringan PLN, maupun generator set (genset). Sistem ini dirancang untuk meningkatkan keandalan pasokan listrik dengan memanfaatkan energi surya sebagai sumber utama dan sumber energi lainnya sebagai cadangan ketika produksi energi surya tidak mencukupi kebutuhan beban. Kombinasi tersebut membuat sistem Hybrid mampu memberikan kontinuitas suplai energi yang lebih baik dibandingkan sistem On-Grid maupun Off-Grid secara terpisah (Hayusman & Saputera, 2022).

Penggunaan PLTS Hybrid saat ini semakin berkembang karena mampu mengoptimalkan pemanfaatan energi terbarukan sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Sistem ini memungkinkan energi yang dihasilkan panel surya disimpan ke dalam baterai dan digunakan kembali ketika produksi energi menurun. Meskipun memiliki biaya investasi yang lebih tinggi akibat penggunaan baterai dan sistem kontrol yang lebih kompleks, PLTS Hybrid dinilai lebih fleksibel serta memiliki tingkat keandalan yang tinggi untuk memenuhi kebutuhan energi pada berbagai kondisi operasi (Steyadi tri yoga, 2022).

2.3 Sistem PLTS Off-Grid

2.3.1 Defensi dan Karakteristik PLTS Off-Grid

PLTS Off-Grid merupakan sistem pembangkit listrik tenaga surya yang bekerja secara mandiri tanpa terhubung dengan jaringan listrik PLN. Sistem ini memanfaatkan panel surya sebagai sumber utama energi listrik yang kemudian disimpan ke dalam baterai untuk digunakan saat malam hari atau ketika intensitas cahaya matahari menurun. Pada sistem Off-Grid, seluruh kebutuhan energi beban dipenuhi oleh sistem PLTS sehingga diperlukan perencanaan kapasitas panel surya, baterai, Solar Charge Controller (SCC), dan inverter yang sesuai dengan kebutuhan energi harian. Sistem ini banyak diterapkan pada daerah terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik konvensional karena mampu menyediakan energi listrik secara independen dan berkelanjutan (Noor Hidayati dan Arifia Ekayuliana, 2021).

Karakteristik utama PLTS Off-Grid adalah penggunaan baterai sebagai media penyimpanan energi sehingga sistem tetap dapat menyuplai listrik meskipun tidak ada radiasi matahari. Selain itu, sistem ini tidak bergantung pada jaringan PLN sehingga lebih cocok digunakan pada wilayah pedesaan, pulau terpencil, daerah pegunungan, maupun lokasi yang sering mengalami gangguan pasokan listrik. Namun demikian, biaya investasi PLTS Off-Grid relatif lebih tinggi dibandingkan sistem On-Grid karena memerlukan baterai dengan kapasitas besar serta sistem pengendalian yang lebih kompleks. Keandalan sistem sangat dipengaruhi oleh kapasitas penyimpanan energi, kondisi baterai, serta kesesuaian perancangan komponen utama yang digunakan dalam sistem PLTS tersebut (Green et al., 2023).

Selain memiliki kemandirian energi yang tinggi, PLTS Off-Grid juga memiliki karakteristik berupa kemampuan beroperasi tanpa sinkronisasi dengan jaringan listrik eksternal. Energi yang dihasilkan panel surya akan diatur oleh SCC sebelum disimpan ke baterai dan kemudian dikonversi menjadi arus bolak-balik (AC) menggunakan inverter untuk memenuhi kebutuhan beban. Sistem ini memerlukan pengelolaan energi yang baik karena kapasitas baterai menentukan lama waktu suplai listrik dapat bertahan ketika tidak terdapat sinar matahari. Oleh karena itu, analisis kebutuhan energi, otonomi baterai, dan efisiensi sistem menjadi faktor penting dalam perancangan PLTS Off-Grid agar sistem dapat bekerja secara optimal dan memiliki umur operasi yang panjang (Hendi Bagja Nurjaman dan Trisna Purnama, 2022).

2.3.2 Kelebihan dan Kekurangan PLTS Off-Grid

PLTS Off-Grid memiliki beberapa kelebihan, salah satunya adalah mampu beroperasi secara mandiri tanpa bergantung pada jaringan listrik PLN. Sistem ini sangat cocok diterapkan pada daerah terpencil, wilayah kepulauan, maupun lokasi yang belum terjangkau infrastruktur kelistrikan. Selain itu, PLTS Off-Grid dapat meningkatkan kemandirian energi karena seluruh kebutuhan listrik dipenuhi oleh energi surya yang tersimpan pada baterai. Penggunaan sistem ini juga mampu mengurangi konsumsi energi berbasis bahan bakar fosil sehingga lebih ramah lingkungan dan mendukung pemanfaatan energi terbarukan secara berkelanjutan (Noor Hidayati dan Arifia Ekayuliana, 2021).

Kelebihan lainnya adalah sistem tetap dapat menyuplai energi listrik saat terjadi pemadaman jaringan listrik karena tidak memerlukan sinkronisasi

dengan PLN. Energi yang dihasilkan panel surya pada siang hari dapat disimpan ke dalam baterai dan digunakan kembali ketika malam hari atau saat cuaca mendung. Karakteristik ini membuat PLTS Off-Grid memiliki tingkat keandalan yang cukup baik untuk daerah dengan kualitas pasokan listrik yang rendah. Selain itu, sistem Off-Grid dapat dirancang sesuai kebutuhan beban sehingga lebih fleksibel dalam penerapannya pada rumah tinggal, fasilitas umum, maupun industri skala kecil (Negara, 2025).

Di samping berbagai kelebihanannya, PLTS Off-Grid juga memiliki beberapa kekurangan. Biaya investasi awal relatif tinggi karena membutuhkan baterai sebagai media penyimpanan energi serta komponen pendukung lainnya seperti SCC dan inverter. Umur baterai yang terbatas menyebabkan adanya biaya penggantian dan perawatan secara berkala sehingga meningkatkan biaya operasional sistem. Selain itu, kinerja PLTS Off-Grid sangat bergantung pada intensitas cahaya matahari sehingga produksi energi dapat menurun saat musim hujan atau cuaca mendung. Oleh karena itu, perencanaan kapasitas panel surya dan baterai harus dilakukan secara tepat agar sistem mampu memenuhi kebutuhan energi secara optimal (Hayusman & Saputera, 2022).

2.3.3 Aplikasi pada Daerah Pertanian

PLTS Off-Grid banyak diterapkan pada sektor pertanian karena mampu menyediakan sumber energi listrik secara mandiri di daerah yang belum terjangkau jaringan listrik PLN. Pada kawasan pertanian yang berada jauh dari pusat distribusi listrik, sistem ini dapat digunakan untuk mengoperasikan pompa irigasi, sistem penyemprotan otomatis, penerangan area pertanian, serta

berbagai peralatan pendukung lainnya. Pemanfaatan energi surya pada sektor pertanian dinilai lebih ekonomis dalam jangka panjang karena menggunakan sumber energi yang tersedia secara alami dan berkelanjutan. Selain itu, penggunaan PLTS Off-Grid juga dapat membantu meningkatkan produktivitas pertanian melalui ketersediaan energi yang lebih stabil untuk mendukung kegiatan operasional lahan pertanian (Lapinangga, 2024).

Salah satu penerapan PLTS Off-Grid pada bidang pertanian adalah pada sistem hidroponik dan smart farming. Energi listrik yang dihasilkan panel surya digunakan untuk mengoperasikan pompa sirkulasi air, sensor pemantauan tanaman, serta sistem kontrol otomatis yang mendukung proses budidaya. Penggunaan PLTS Off-Grid pada sistem pertanian modern mampu mengurangi ketergantungan terhadap energi konvensional sekaligus mendukung konsep pertanian ramah lingkungan. Implementasi smart farming berbasis PLTS Off-Grid juga menunjukkan bahwa sistem dapat tetap beroperasi pada malam hari melalui energi yang tersimpan di dalam baterai sehingga kontinuitas operasional pertanian tetap terjaga (Lapinangga, 2024).

Pada sektor perkebunan, PLTS Off-Grid juga digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik di lokasi yang sulit dijangkau jaringan distribusi listrik, seperti perkebunan kelapa sawit dan kawasan pertanian terpencil. Sistem ini mampu menyuplai kebutuhan listrik untuk penerangan, pompa air, sistem monitoring lahan, hingga peralatan operasional lainnya. Meskipun memerlukan investasi awal yang cukup besar, PLTS Off-Grid dinilai layak digunakan karena

biaya operasionalnya relatif rendah serta mampu menyediakan pasokan energi secara berkelanjutan tanpa ketergantungan pada bahan bakar fosil. Oleh karena itu, penerapan PLTS Off-Grid menjadi salah satu solusi yang efektif dalam mendukung pengembangan sektor pertanian modern dan berkelanjutan di Indonesia (Noor Hidayati dan Arifia Ekayuliana, 2021).

2.4 Konsep Pertanian Zero Farming

2.4.1 Pengertian Zero Farming

Zero Farming merupakan konsep pertanian berkelanjutan yang menerapkan prinsip pemanfaatan seluruh sumber daya pertanian secara optimal sehingga limbah yang dihasilkan dapat diminimalkan atau dimanfaatkan kembali menjadi produk yang bernilai guna. Sistem ini mengintegrasikan berbagai kegiatan pertanian seperti budidaya tanaman, peternakan, perikanan, dan pengolahan limbah dalam satu kesatuan yang saling mendukung. Melalui konsep tersebut, sisa hasil pertanian maupun limbah organik dapat diolah menjadi pupuk kompos, pakan ternak, maupun sumber energi alternatif sehingga mampu meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya dan mengurangi pencemaran lingkungan (Kewa et al., 2024).

Konsep Zero Farming juga bertujuan menciptakan sistem pertanian yang ramah lingkungan, efisien, dan berkelanjutan dengan mengurangi ketergantungan terhadap bahan kimia sintetis. Dalam penerapannya, sistem ini menekankan prinsip daur ulang sumber daya, penggunaan bahan organik, serta pengelolaan limbah secara terpadu agar seluruh komponen pertanian dapat dimanfaatkan secara maksimal. Dengan demikian, Zero Farming tidak hanya berfokus pada peningkatan hasil produksi pertanian, tetapi juga menjaga

keseimbangan ekosistem dan keberlanjutan usaha tani dalam jangka Panjang (Nirawati, Hidiya, 2024).

2.4.2 Prinsip dan Teknologi Pendukung

Prinsip utama Zero Farming adalah mengelola seluruh sumber daya pertanian secara terpadu sehingga limbah yang dihasilkan dapat dimanfaatkan kembali dan tidak menjadi sumber pencemaran lingkungan. Konsep ini menerapkan sistem integrasi antara tanaman, peternakan, perikanan, dan pengolahan limbah dalam satu kesatuan yang saling mendukung. Melalui sistem tersebut, limbah organik seperti sisa tanaman dan kotoran ternak dapat diolah menjadi pupuk organik, pakan ternak, maupun sumber energi alternatif. Pendekatan ini bertujuan meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya, mengurangi biaya produksi, serta mendukung keberlanjutan sistem pertanian dalam jangka panjang (Kewa et al., 2024).

Penerapan teknologi pendukung pada Zero Farming tidak hanya berfokus pada peningkatan hasil produksi, tetapi juga pada efisiensi energi dan keberlanjutan ekosistem pertanian. Sistem pertanian terpadu modern saat ini mulai memanfaatkan teknologi monitoring, pengelolaan limbah organik, serta integrasi energi terbarukan untuk mendukung aktivitas budidaya secara lebih efektif. Dengan penerapan teknologi yang tepat, sistem Zero Farming mampu menciptakan pertanian yang produktif, ekonomis, dan ramah lingkungan sehingga dapat menjadi solusi dalam menghadapi tantangan pertanian di masa depan (FAO, 2021).

2.5 Baterai Pada PLTS

2.5.1 Fungsi dan Peran Baterai

Baterai merupakan salah satu komponen utama dalam sistem PLTS, khususnya pada sistem off-grid, yang berfungsi sebagai media penyimpanan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya, energi yang tersimpan di dalam baterai akan digunakan pada saat tidak terdapat radiasi matahari, seperti pada malam hari atau kondisi cuaca mendung, sehingga baterai berperan penting dalam menjaga kontinuitas suplai energi listrik (Iskandar et al., 2021).

Selain berfungsi sebagai penyimpan energi, baterai juga berperan dalam menjaga kestabilan sistem PLTS dengan membantu mengurangi fluktuasi daya yang dihasilkan panel surya akibat perubahan intensitas radiasi matahari. Penggunaan baterai yang dilengkapi Battery Management System (BMS) dapat melindungi baterai dari kondisi *overcharge* dan *overdischarge* yang dapat memperpendek umur pakai baterai. Dalam operasinya, baterai mengalami proses pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*) secara berulang sehingga diperlukan sistem pengelolaan yang baik agar efisiensi dan masa pakai baterai tetap optimal. Pengelolaan baterai yang tepat juga berperan dalam meningkatkan performa keseluruhan sistem PLTS dan menjaga kestabilan suplai energi ke beban (Baktiar, 2021).

2.5.2 Jenis-Jenis Baterai

Baterai yang digunakan dalam sistem PLTS terdiri dari beberapa jenis yang memiliki karakteristik berbeda, yaitu:

a. Baterai Lead-Acid (LA/VRLA)

Baterai lead-acid merupakan jenis baterai yang paling umum digunakan karena memiliki biaya yang relatif murah dan teknologi yang sudah matang. Baterai ini terdiri dari dua jenis utama yaitu flooded (basah) dan valve regulated lead-acid (VRLA) seperti AGM dan gel. namun, baterai ini memiliki kekurangan berupa efisiensi yang lebih rendah, umur pakai yang lebih pendek, serta tidak tahan terhadap depth of discharge (DOD) yang tinggi (Iskandar et al., 2021).

b. Baterai Lithium-Ion (Li-ion/LFP)

Baterai lithium-ion memiliki keunggulan berupa efisiensi pengisian dan pengosongan energi yang tinggi, umur siklus yang panjang, serta kepadatan energi yang lebih baik dibandingkan baterai timbal-asam. Salah satu jenis baterai lithium-ion yang banyak digunakan pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4 /LFP) karena memiliki stabilitas termal yang baik, tingkat keamanan yang tinggi, serta umur siklus yang panjang. Meskipun biaya investasi awalnya lebih tinggi dibandingkan baterai timbal-asam, penggunaan baterai LiFePO_4 lebih ekonomis dalam jangka panjang karena memiliki umur pakai yang lebih lama, kebutuhan perawatan yang rendah, dan efisiensi energi yang tinggi (Magsumbol et al., 2022).

c. Baterai Nickel-Based

Baterai jenis ini seperti Nickel-Cadmium (NiCd) dan Nickel-Metal Hydride (NiMH) memiliki ketahanan yang baik terhadap kondisi ekstrem,

namun jarang digunakan pada PLTS skala kecil karena biaya yang tinggi dan efisiensi yang lebih rendah dibandingkan lithium-ion (Julian et al., 2023).

2.5.3 Karakteristik Baterai

Dalam perancangan sistem PLTS, terdapat beberapa parameter penting yang digunakan untuk menentukan spesifikasi baterai, antara lain sebagai berikut:

a. Kapasitas (Ah)

Kapasitas baterai menunjukkan jumlah muatan listrik yang dapat disimpan dan dikeluarkan oleh baterai. kapasitas ini menentukan lama waktu baterai dapat menyuplai beban.

b. Tegangan (V)

Tegangan baterai menentukan level sistem listrik (misalnya 12V, 24V, atau 48V). Pemilihan tegangan sistem akan mempengaruhi besar arus yang mengalir dalam sistem.

c. Arus (A)

Arus menunjukkan kemampuan baterai dalam menyuplai energi ke beban, termasuk kemampuan untuk menangani lonjakan arus saat beban induktif mulai bekerja.

d. Depth of Discharge (DOD)

DOD merupakan persentase energi yang digunakan dari total kapasitas baterai. Semakin besar nilai DOD, maka semakin dalam baterai dikosongkan, yang dapat mempengaruhi umur baterai

2.5.4 Parameter Penentuan Spesifikasi Baterai

Pada sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) off-grid, baterai merupakan komponen penting yang berfungsi sebagai penyimpan energi listrik untuk menyuplai beban saat tidak tersedia radiasi matahari. Oleh karena itu, penentuan spesifikasi baterai harus dilakukan secara tepat dengan mempertimbangkan beberapa parameter utama, yaitu kebutuhan energi beban, tegangan sistem, kapasitas baterai, depth of discharge (DoD), efisiensi sistem, serta lama hari otonomi.

a. Kebutuhan energi beban (Wh)

Kebutuhan energi beban adalah total energi listrik yang digunakan oleh seluruh peralatan dalam satu periode waktu tertentu, biasanya dihitung dalam satuan harian (Wh/hari). Perhitungan ini menjadi dasar utama dalam menentukan kapasitas baterai. Kebutuhan energi beban adalah total energi listrik yang digunakan oleh seluruh peralatan dalam satu periode waktu tertentu, biasanya dihitung dalam satuan harian (Wh/hari). Perhitungan ini menjadi dasar utama dalam menentukan kapasitas baterai. Secara matematis, kebutuhan energi beban dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$E_{load} = \sum P \times t$$

Di mana:

E_{load} = total energi beban (Wh/hari)

P = Daya beban (watt)

t = Lama pemakaian (jam/hari)

Semakin besar kebutuhan energi beban, maka kapasitas baterai yang

dibutuhkan juga akan semakin besar (Nematirad et al., 2023).

b. Tegangan sistem

Tegangan sistem merupakan parameter penting dalam perancangan PLTS karena berpengaruh terhadap arus dan efisiensi sistem. Hubungan antara daya, tegangan, dan arus dinyatakan dengan persamaan.

$$P = V \times I$$

Dimana:

P = Daya listrik (watt)

V = Tegangan listrik (volt)

I = Arus listrik (Ampere)

Pemilihan tegangan sistem bertujuan untuk meminimalkan rugi-rugi daya pada penghantar. Sistem dengan daya kecil umumnya menggunakan tegangan 12V, sedangkan sistem dengan daya lebih besar menggunakan 24V atau 48V untuk meningkatkan efisiensi (Negara, 2025).

c. Depth of Discharge (DoD)

Depth of Discharge (DoD) adalah persentase kapasitas baterai yang digunakan dibandingkan dengan kapasitas total baterai.

$$DoD = \frac{\text{Energi yang digunakan}}{\text{Kapasitas total}} \times 100\%$$

Nilai DoD sangat mempengaruhi umur baterai. Baterai jenis lead-acid umumnya direkomendasikan memiliki DoD sekitar 50%, sedangkan baterai lithium dapat mencapai 80–90%. Penggunaan DoD yang terlalu tinggi dapat mempercepat degradasi baterai (Iskandar et al., 2021).

d. Efisiensi sistem

Efisiensi sistem merupakan faktor yang menunjukkan besarnya energi yang hilang selama proses konversi dan penyimpanan energi. Efisiensi total sistem merupakan hasil perkalian efisiensi masing-masing komponen, yaitu baterai, inverter, dan solar charge controller.

e. Kapasitas baterai

Kapasitas baterai menunjukkan jumlah muatan listrik yang dapat disimpan dan disuplai ke beban. Kapasitas ini biasanya dinyatakan dalam satuan Ampere-hour (Ah). Perhitungan kapasitas baterai dilakukan dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$C_{batt} = \frac{E_{load} \times N_{aut}}{V \times DoD \times \eta}$$

Di mana:

C_{bat} = kapasitas baterai (Ah)

E_{load} = Energi beban harian (Wh)

N_{aut} = Lama hari otonomi (Jam/hari)

V = Tegangan sistem (Volt)

DoD = Depth of discharge

η = Efisiensi sistem

Persamaan ini digunakan secara umum dalam perancangan sistem PLTS off-grid untuk memastikan ketersediaan energi yang cukup (Kosmadakis & Elmasides, 2021).

2.6 Penelitian Terdahulu

Tabel 2. 1 Penelitian terdahulu

No	Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1	Dwi Sahidin dkk. (2023)	Perancangan dan Pemodelan PLTS Off-Grid dengan Penyimpanan Energi Hibrida	Sistem baterai dan superkapasitor mampu meningkatkan kestabilan tegangan serta mengurangi fluktuasi beban pada sistem PLTS off-grid.
2	Basri Noor Cahyadi dkk. (2022)	Studi Analisis PLTS Off-Grid untuk Mengurangi Pemadaman	Kapasitas baterai ditentukan berdasarkan profil beban, dengan tingkat keandalan sistem tinggi dan solar fraction mencapai 0,92.
3	Handoko R. Iskandar dkk. (2021)	Analisis Performa Baterai VRLA pada PLTS Off-Grid 1 kWp	Baterai VRLA mengalami penurunan kapasitas akibat siklus charge-discharge dan kedalaman pengosongan (DOD).
4	Setyadi Tri dkk. (2020)	Implementasi Superkapasitor pada PLTS Off-Grid	Penggunaan superkapasitor membantu mengurangi beban baterai saat lonjakan arus, sehingga memperpanjang umur baterai.
5	Jonathan O. Ken dkk. (2023)	Desain PLTS Off-Grid Berdasarkan Otonomi Baterai OPzV	Kapasitas baterai sangat mempengaruhi lama suplai energi saat kondisi tanpa matahari (autonomy days).

6	Boy Ihsan dkk. (2022)	Peningkatan Umur Baterai dengan Sistem Hibrida	Sistem hybrid storage mampu meningkatkan efisiensi dan umur baterai dalam sistem PLTS off-grid.
7	Lauhil Mahfudz Hayusman (2021)	Perencanaan Panel Kendali PLTS Berdasarkan Kapasitas Baterai	Kapasitas baterai berpengaruh terhadap pengaturan sistem kontrol seperti LVD untuk menjaga kestabilan suplai energi.
8	Jeffry Anggara dkk. (2020)	Rancang Bangun PLTS Off-Grid dan On-Grid	Intensitas radiasi matahari mempengaruhi energi yang disimpan dalam baterai serta efisiensi sistem secara keseluruhan.
9	Antti Aitio & David Howey (2021)	Predicting Battery End of Life in Off-Grid PV Systems	Model prediksi berbasis machine learning mampu memperkirakan umur baterai secara akurat untuk evaluasi sistem.
10	Rebecca Perriment dkk. (2020)	Battery Degradation Analysis in Solar Home Systems	Pengaturan siklus pengisian dan tegangan dapat memperlambat degradasi baterai dan meningkatkan keandalan sistem.