

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Relavan

Pada bagian ini, dilakukan tinjauan terhadap penelitian-penelitian terdahulu yang memiliki tema, metode, atau konteks aplikasi yang sejalan dengan penelitian ini. Tinjauan ini berfungsi untuk menunjukkan posisi penelitian dalam peta keilmuan, serta menjadi landasan metodologis dan teknis. Beberapa kajian relevan yang mendukung penelitian ini diantaranya:

Penelitian oleh Helmi (2024) mengenai perencanaan PLTS *on-grid* untuk UMKM jasa laundry memberikan perspektif metodologis yang berharga, meskipun konfigurasi sistem yang digunakan berbeda. Studi ini menunjukkan bagaimana analisis beban harian yang rinci menjadi kunci utama dalam perencanaan kapasitas sistem. Prinsip konservatif yang diterapkan dalam penelitian tersebut, seperti penambahan cadangan kapasitas modul surya untuk mengantisipasi kondisi cuaca buruk, sangat relevan untuk diadaptasi guna memastikan keandalan sistem baterai dalam menyediakan penerangan cadangan, khususnya mengingat variabilitas radiasi matahari di Kota Tanjungbalai. Selain itu, dukungan kerangka kebijakan yang diuraikan dalam studi tersebut turut memperkuat landasan dan justifikasi dilakukannya penelitian ini.

Kajian dari Windarta et al. (2021) tentang analisis sistem PLTS *off-grid* untuk UMKM coffeeshop di daerah terpencil memiliki konteks aplikasi yang sangat mirip. Penelitian ini menyajikan contoh konkrit konfigurasi komponen sistem *off-grid*, termasuk penggunaan baterai dengan kapasitas 160Ah pada tegangan 24V. Konfigurasi ini dapat menjadi pembanding awal yang berharga dalam merencanakan kebutuhan baterai untuk fasilitas pencucian mobil. Metodologi simulasi teknis yang digunakan dalam studi ini juga dapat dijadikan acuan untuk memodelkan kinerja sistem dan memperhitungkan faktor efisiensi dalam perencanaan.

Penelitian Saputra (2022) yang menganalisis efisiensi PLTS untuk warung UMKM lebih jauh menguatkan fondasi teknis, khususnya dalam hal kinerja masing-masing komponen. Data efisiensi riil yang dihasilkan dari studi tersebut, seperti efisiensi baterai Valve Regulated Lead Acid (VRLA) sebesar 72,35% dan efisiensi *Solar Charge Controller* (SCC) tipe PWM sebesar 70%, merupakan data kritis yang harus

diperhitungkan dalam perhitungan kapasitas baterai. Data ini memastikan bahwa sistem yang direncanakan tidak hanya memenuhi kebutuhan teoritis, tetapi juga telah mengkompensasi energi yang hilang di dalam sistem, sehingga menghasilkan desain yang andal.

Berdasarkan tinjauan terhadap beberapa penelitian terdahulu di atas, teridentifikasi suatu celah penelitian. Dapat dilihat, penelitian sebelumnya lebih berfokus pada analisis sistem PLTS secara keseluruhan untuk memenuhi kebutuhan energi total suatu UMKM. Penelitian ini secara khusus ditujukan untuk mengisi celah tersebut dengan memfokuskan analisis pada perencanaan kebutuhan PLTS Off-Grid terutama pada baterai yang optimal untuk beban spesifik, yaitu sistem penerangan backup pada fasilitas pencucian dan penginapan mobil, dengan mempertimbangkan kebutuhan daya dan kapasitas baterai dengan rancangan konfigurasi PLTS di pencucian dan penginapan mobil Kota Tanjungbalai.

2.2 Landasan Teori

Dalam era transisi energi global menuju sumber daya terbarukan, kebutuhan akan sistem kelistrikan yang efisien, bersih, dan berkelanjutan menjadi semakin penting, terutama bagi sektor usaha kecil menengah (UKM) yang membutuhkan keandalan pasokan listrik untuk menunjang operasionalnya. Salah satu bentuk usaha yang bergantung pada ketersediaan energi listrik adalah fasilitas pencucian dan penginapan mobil, di mana penerangan berperan penting terhadap kenyamanan pelanggan dan keselamatan pekerja, khususnya saat malam hari. Namun, pada kenyataannya, kondisi infrastruktur kelistrikan di beberapa wilayah, termasuk Kota Tanjungbalai, masih menghadapi tantangan berupa ketergantungan pada jaringan PLN yang tidak selalu stabil. Pemadaman listrik yang terjadi, baik secara terencana maupun mendadak, dapat mengganggu aktivitas operasional serta menurunkan kualitas pelayanan yang diberikan.

Melihat kondisi tersebut, perencanaan sistem backup penerangan berbasis energi terbarukan menjadi solusi yang relevan untuk menjamin kontinuitas pasokan listrik. Salah satu teknologi yang kini banyak dikembangkan dan diterapkan di berbagai sektor adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Sistem PLTS bekerja dengan mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik menggunakan sel surya (photovoltaic), kemudian

menyimpannya dalam baterai untuk digunakan ketika sumber utama tidak tersedia. Kombinasi antara PLTS dan baterai ini membentuk sistem backup energi listrik yang tidak hanya mampu menjaga keandalan pasokan, tetapi juga mendukung upaya pengurangan emisi karbon serta pemanfaatan energi bersih di tingkat lokal.

Kota Tanjungbalai sendiri memiliki potensi iradiasi matahari yang cukup tinggi, dengan intensitas rata-rata mencapai sekitar 4–5 kWh/m² per hari, menjadikannya lokasi yang ideal untuk penerapan sistem PLTS. Pada fasilitas pencucian dan penginapan mobil, energi surya dapat dimanfaatkan secara optimal pada siang hari untuk pengisian baterai, sementara energi yang tersimpan digunakan sebagai sumber backup penerangan pada malam hari. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efisiensi penggunaan energi, tetapi juga membantu pelaku usaha menekan biaya operasional jangka panjang akibat pengurangan ketergantungan terhadap listrik dari PLN.

Selain manfaat teknis dan ekonomis, penerapan PLTS juga berkontribusi terhadap target nasional Indonesia dalam mencapai bauran energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025, sebagaimana tercantum dalam Rencana Umum Energi Nasional (RUEN). Dengan demikian, penelitian ini memiliki nilai strategis tidak hanya pada aspek teknis perancangan sistem, tetapi juga pada aspek keberlanjutan energi nasional.

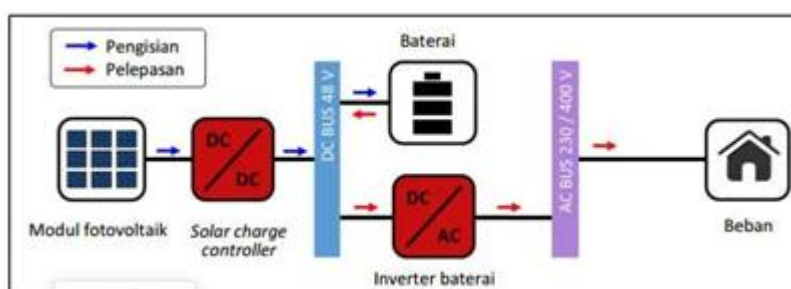
Dalam konteks penelitian ini, fokus diarahkan pada perencanaan kebutuhan baterai sebagai komponen utama sistem backup penerangan dengan sumber energi dari PLTS pada fasilitas pencucian dan penginapan mobil di Kota Tanjungbalai. Baterai berfungsi sebagai penyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya, yang kemudian akan digunakan untuk menyalakan sistem penerangan ketika pasokan listrik utama tidak tersedia. Oleh karena itu, perencanaan kapasitas baterai yang tepat menjadi hal krusial agar sistem mampu beroperasi sesuai durasi yang diinginkan dengan efisiensi tinggi dan tanpa risiko kekurangan daya.

Untuk menghasilkan rancangan sistem yang optimal, diperlukan pemahaman menyeluruh terhadap komponen utama PLTS, meliputi panel surya, solar charge controller, baterai, serta inverter. Selain itu, analisis terhadap kebutuhan daya dan energi penerangan, intensitas radiasi matahari, serta efisiensi sistem penyimpanan juga menjadi dasar dalam menentukan konfigurasi dan kapasitas sistem secara keseluruhan. Oleh sebab itu, bagian ini akan menguraikan konsep-konsep dasar mengenai PLTS, prinsip kerja dan

karakteristik komponennya, teori sistem penyimpanan energi menggunakan baterai, serta metode perhitungan kebutuhan energi dan kapasitas baterai, yang menjadi dasar ilmiah dalam merancang sistem backup penerangan berbasis PLTS secara efektif.

2.3 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Off-Grid

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Off-Grid merupakan sistem pembangkit listrik yang bekerja secara mandiri, tanpa terhubung ke jaringan listrik konvensional seperti PLN. Sistem ini dirancang agar dapat menghasilkan, menyimpan, dan mendistribusikan energi listrik secara independen, sehingga sangat cocok diterapkan pada lokasi yang belum terjangkau jaringan listrik atau sebagai sistem backup energi pada fasilitas-fasilitas yang membutuhkan suplai daya berkelanjutan. Dalam konteks penelitian ini, PLTS Off-Grid digunakan sebagai sumber utama pengisian baterai untuk sistem backup penerangan pada fasilitas pencucian dan penginapan mobil di Kota Tanjungbalai.



Gambar 2. 1 Sistem PLTS Off Grid

Secara prinsip, sistem PLTS Off-Grid bekerja dengan mengonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik arus searah (DC) melalui panel surya, kemudian menyimpannya ke dalam baterai sebagai cadangan energi yang dapat digunakan kapan saja ketika dibutuhkan. Sistem ini sepenuhnya berdiri sendiri tanpa koneksi ke jaringan PLN, sehingga seluruh kebutuhan listrik dipenuhi dari energi surya yang dihasilkan dan tersimpan di baterai. Pada siang hari, ketika radiasi matahari cukup tinggi, baterai akan diisi hingga mencapai kondisi pengisian maksimum (state of charge). Selanjutnya, inverter berperan menyalurkan energi dari baterai ke beban apabila permintaan daya melebihi kapasitas keluaran dari panel surya. Ketika kapasitas baterai menurun hingga mencapai batas minimum, inverter akan berhenti beroperasi untuk mencegah kerusakan pada baterai. Karakteristik ini menjadikan PLTS Off-Grid andalan dalam kondisi

pemadaman listrik, karena sistem tetap dapat beroperasi secara otomatis dengan energi yang tersimpan di baterai.

Agar sistem PLTS Off-Grid dapat bekerja dengan optimal dan efisien, diperlukan komponen utama yang saling terintegrasi, yaitu panel surya, solar charge controller, baterai, dan inverter. Masing-masing komponen memiliki peranan penting dalam proses konversi, penyimpanan, dan distribusi energi listrik.

2.4 Komponen Utama Sistem PLTS Off-Grid

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid merupakan sistem pembangkit listrik mandiri yang bekerja terpisah dari jaringan listrik PLN dan dirancang untuk dapat memenuhi kebutuhan energi listrik secara independen. Sistem ini sangat sesuai digunakan sebagai sumber energi cadangan (backup system) pada fasilitas yang memerlukan kontinuitas suplai listrik tinggi, seperti pada fasilitas pencucian dan penginapan mobil di Kota Tanjungbalai. Keunggulan utama sistem PLTS off-grid terletak pada kemampuannya dalam menghasilkan, menyimpan, dan mendistribusikan energi listrik secara mandiri, sehingga tetap dapat beroperasi saat terjadi pemadaman listrik dari jaringan utama. Dalam konteks penelitian ini, sistem PLTS off-grid difokuskan untuk mendukung kebutuhan penerangan yang andal dan berkelanjutan, mengingat peran penting pencahayaan dalam menjaga kelancaran aktivitas operasional fasilitas tersebut, baik pada malam hari maupun saat gangguan pasokan listrik terjadi.

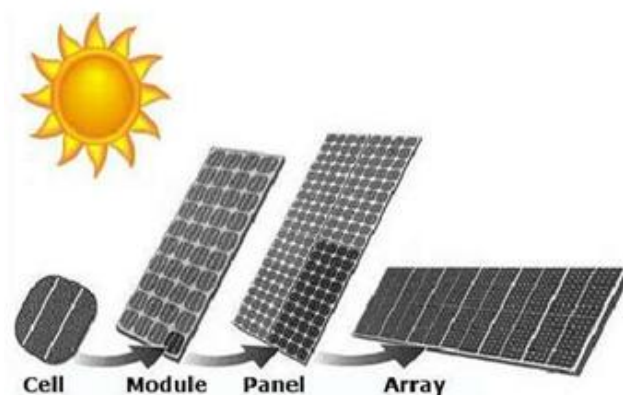
Secara umum, sistem PLTS off-grid terdiri atas empat komponen utama yang saling terintegrasi, yaitu panel surya, solar charge controller (SCC), baterai, dan inverter. Keempat komponen ini membentuk satu kesatuan sistem konversi energi yang berfungsi mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik yang dapat digunakan untuk beban penerangan. Panel surya berperan sebagai pengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik arus searah (DC). Listrik DC yang dihasilkan kemudian diatur oleh solar charge controller untuk memastikan proses pengisian ke baterai berlangsung optimal dan aman, dengan mencegah terjadinya pengisian berlebih (overcharging) atau pengosongan berlebih (over-discharging). Energi yang tersimpan di dalam baterai berfungsi sebagai bank energi yang akan memasok listrik pada malam hari atau ketika intensitas radiasi matahari rendah. Selanjutnya, inverter mengubah arus DC dari baterai

menjadi arus bolak-balik (AC) dengan kualitas dan tegangan yang sesuai untuk digunakan oleh lampu serta peralatan listrik konvensional lainnya.

Setiap komponen dalam sistem memiliki peran penting yang menentukan efisiensi dan keandalan keseluruhan sistem. Panel surya menentukan besarnya energi yang dihasilkan; solar charge controller menjaga stabilitas proses pengisian dan perlindungan baterai; baterai menentukan durasi suplai daya saat sumber utama tidak aktif; dan inverter memastikan kualitas daya sesuai kebutuhan beban. Oleh karena itu, perencanaan teknis sistem PLTS off-grid tidak hanya difokuskan pada perhitungan kapasitas baterai, tetapi juga pada penentuan spesifikasi dan konfigurasi optimal dari seluruh komponen utama agar tercapai keseimbangan antara biaya, efisiensi, serta keandalan sistem. Dengan pemilihan dan integrasi komponen yang tepat, sistem PLTS off-grid dapat dioptimalkan untuk memberikan pasokan listrik penerangan yang stabil dan berkelanjutan di fasilitas pencucian dan penginapan mobil di Kota Tanjungbalai.

2.4.1 Panel Surya

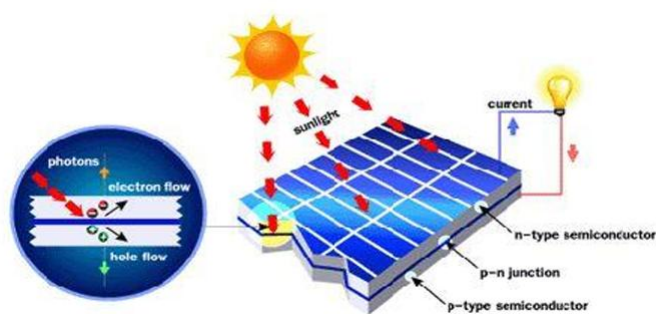
Panel surya merupakan komponen utama dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang berfungsi untuk mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik arus searah (DC). Proses ini dilakukan melalui sel surya (solar cell), yaitu elemen dasar yang bersifat fotovoltaiik, atau dengan kata lain memiliki kemampuan untuk mengubah energi cahaya menjadi energi listrik secara langsung. Sebuah panel surya terdiri dari sejumlah sel surya yang disusun dan dihubungkan sedemikian rupa agar dapat menghasilkan tegangan dan arus listrik sesuai kebutuhan sistem.



Gambar 2. 2 Panel Surya

Secara umum, istilah modul surya dan panel surya sering digunakan secara bergantian, namun secara teknis keduanya memiliki perbedaan. Modul surya adalah satuan perangkat yang terdiri dari beberapa sel surya yang telah dirangkai dalam satu bingkai dan dilapisi bahan pelindung. Modul inilah yang biasanya dijual di pasaran dan menjadi acuan utama dalam perancangan kapasitas sistem PLTS. Sementara itu, panel surya merupakan kumpulan dari beberapa modul surya yang disusun sesuai konfigurasi sistem yang direncanakan (seri, paralel, atau kombinasi keduanya) untuk mencapai tegangan dan arus keluaran tertentu. Meskipun demikian, dalam praktik umum istilah modul dan panel sering kali dianggap sama karena keduanya sama-sama berfungsi menangkap sinar matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik.

Setiap sel surya dalam panel tersusun atas beberapa lapisan material semikonduktor, umumnya berbasis silikon (Si), yang memiliki sifat mampu melepaskan elektron ketika terkena energi foton dari cahaya matahari. Lapisan silikon ini biasanya dikombinasikan dengan material lain seperti logam konduktor, lapisan anti-reflektif untuk mengurangi pantulan cahaya, serta kontak listrik yang berfungsi mengalirkan arus hasil pembangkitan ke luar modul. Berdasarkan struktur kristalnya, sel surya dibedakan menjadi tiga jenis utama, yaitu monokristalin, polikristalin, dan thin film. Jenis monokristalin memiliki efisiensi paling tinggi, berkisar antara 18–22%, serta performa yang baik pada kondisi intensitas cahaya tinggi, sehingga cocok digunakan di daerah tropis seperti Kota Tanjungbalai yang memiliki rata-rata radiasi matahari sekitar 4–5 kWh/m²/hari.



Gambar 2. 3 Lapisan Silicon

Prinsip kerja panel surya berawal ketika partikel cahaya (foton) dari sinar matahari mengenai permukaan sel surya. Energi foton tersebut diserap oleh lapisan

silikon dan menyebabkan elektron-elektron pada atom silikon tereksitasi, yaitu terlepas dari ikatan atomnya. Elektron yang memiliki muatan negatif akan bergerak ke arah lapisan konduktor, sedangkan ruang kosong yang ditinggalkan elektron (hole) bermuatan positif akan bergerak ke arah sebaliknya. Struktur semikonduktor yang digunakan pada sel surya umumnya berupa persambungan tipe P-N (p-n junction), di mana lapisan tipe “n” berfungsi sebagai pendonor elektron dan lapisan tipe “p” sebagai penerima elektron.

Ketika kedua lapisan tersebut bergabung, terbentuklah medan listrik internal yang mendorong elektron dan hole bergerak ke arah berlawanan. Aliran gerak elektron inilah yang menghasilkan arus listrik searah (DC). Arus ini kemudian dapat disalurkan ke beban listrik secara langsung, atau disimpan terlebih dahulu ke dalam baterai melalui solar charge controller untuk digunakan saat malam hari atau ketika tidak ada sinar matahari.

2.4.1.1 Jenis-jenis panel surya

1) Monocrystalline

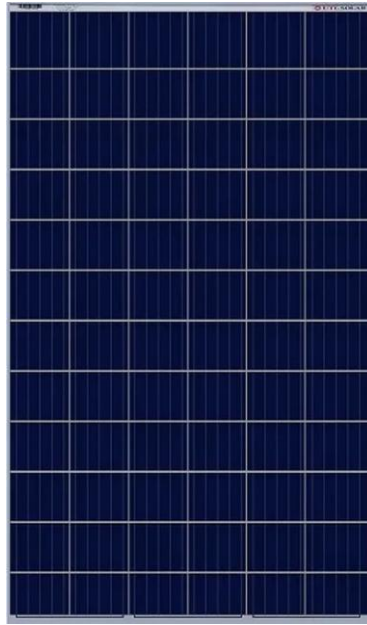
Panel surya monocrystalline terbuat dari silikon murni yang disusun menjadi batangan kristal tunggal dan kemudian diiris tipis-tipis membentuk sel surya. Karena berasal dari satu kristal induk yang sama, seluruh sel memiliki struktur dan karakteristik elektronik yang identik, menghasilkan performa yang konsisten. Teknologi ini menawarkan efisiensi konversi energi tertinggi di antara semua jenis panel berbasis silikon, yaitu dalam kisaran 15-20%, dan bahkan dapat mencapai 22% pada produk premium . Keunggulan efisiensi yang tinggi ini membuat panel monocrystalline sangat cocok untuk aplikasi dengan luas permukaan terbatas, karena dapat menghasilkan daya listrik lebih besar per meter persegi dibandingkan jenis lainnya. Ciri visual panel ini adalah warnanya yang hitam pekat dan seragam dengan sudut sel yang terpotong (pseudo-square). Namun, proses pembuatan kristal tunggal yang kompleks menjadikan panel jenis ini memiliki harga yang lebih mahal. Selain itu, meski secara umum memiliki kinerja baik, efisiensinya dapat menurun lebih signifikan pada suhu operasi yang sangat tinggi dibandingkan dengan panel polycrystalline.



Gambar 2. 4 Panel Surya Monocrystalline

2) Polycrystalline

Panel surya polycrystalline diproduksi dengan meleburkan fragmen-fragmen kristal silikon dan menuangkannya ke dalam cetakan persegi, sehingga menghasilkan struktur kristal acak dengan batas butir yang terlihat. Proses manufaktur yang lebih sederhana dan minim pemborosan bahan baku ini membuat harganya lebih terjangkau daripada panel monocrystalline. Efisiensi panel polycrystalline berada pada kisaran menengah, yaitu sekitar 13-16%, karena adanya ketidaksempurnaan pada struktur kristal yang menghambat aliran elektron. Panel ini mudah dikenali dari penampilannya yang berwarna biru tua dengan pola butiran kristal yang tidak seragam. Kelemahan utamanya adalah membutuhkan luas permukaan yang lebih besar untuk menghasilkan daya listrik yang setara dengan panel monocrystalline. Namun, keunggulannya terletak pada toleransi yang sedikit lebih baik terhadap kenaikan suhu, di mana penurunan efisiensi pada kondisi suhu tinggi tidak sebesar panel monocrystalline, menjadikannya pertimbangan yang layak untuk daerah tropis dengan budget terbatas.



Gambar 2. 5 Panel Surya Polycrystalline

3) Thin Film

Panel surya thin film (lapisan tipis) merupakan teknologi yang secara fundamental berbeda, dibuat dengan cara mendeposisikan satu atau beberapa lapisan bahan fotovoltaiik yang sangat tipis seperti silikon amorf (a-Si), kadmium telurida (CdTe), atau tembaga indium gallium selenide (CIGS) ke atas substrat seperti kaca, plastik, atau logam. Proses produksinya yang mirip dengan pencetakan memungkinkan biaya manufactur yang lebih rendah dan konsumsi material yang lebih sedikit. Ciri khasnya adalah fisiknya yang sangat tipis, ringan, dan fleksibel, sehingga membuka peluang aplikasi yang tidak mungkin dilakukan oleh panel kaku berbasis silikon. Sayangnya, efisiensi modulnya masih tergolong rendah, umumnya sekitar 7-10%, dan untuk teknologi tertentu dapat mencapai hingga 8.5% . Kekurangan utama lainnya adalah degradasi daya yang lebih cepat dibandingkan panel kristal silikon, sehingga umur pakainya biasanya lebih pendek, serta memerlukan area instalasi yang sangat luas untuk menghasilkan daya yang sama. Keunggulannya terletak pada performanya yang relatif tidak terlalu

terpengaruh oleh naungan parsial dan suhu tinggi, serta estetika yang dapat disesuaikan.



Gambar 2. 6 Panel Surya Thin Film

2.4.2 Solar Charge Controller

Solar Charge Controller (SCC) merupakan salah satu komponen utama dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid yang berfungsi untuk mengatur arus listrik dari panel surya ke baterai, serta melindungi baterai dari pengisian dan pengosongan berlebih (overcharging dan overdischarging). Tanpa adanya SCC, baterai berpotensi mengalami kerusakan dini akibat tegangan yang tidak stabil dari panel surya, terutama ketika intensitas radiasi matahari berubah secara cepat sepanjang hari.

Secara prinsip kerja, SCC ditempatkan di antara panel surya dan baterai untuk menyesuaikan tegangan keluaran panel agar sesuai dengan batas tegangan nominal baterai. Saat produksi daya dari panel surya tinggi (misalnya pada siang hari), SCC akan menurunkan arus pengisian agar tidak melebihi batas maksimum baterai. Sebaliknya, ketika tegangan baterai mendekati batas pengosongan minimum, SCC akan memutuskan hubungan dengan beban untuk mencegah baterai terkuras habis. Mekanisme ini memastikan siklus hidup (lifetime cycle) baterai tetap panjang dan efisiensi penyimpanan energi tetap optimal.

1) Pulse Width Modulation (PWM)

Pulse Width Modulation (PWM) tipe konvensional yang bekerja dengan cara menyesuaikan tegangan panel agar sesuai dengan tegangan baterai, namun memiliki efisiensi pengisian relatif lebih rendah.



Gambar 2. 7 PWM

2) Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Maximum Power Point Tracking (MPPT) teknologi modern yang mampu menyesuaikan titik kerja panel surya agar selalu berada pada daya maksimum (maximum power point). Dengan metode ini, efisiensi pengisian baterai dapat meningkat hingga 30% lebih tinggi dibandingkan tipe PWM, terutama pada kondisi intensitas cahaya yang berubah-ubah. Dalam perencanaan sistem PLTS Off-Grid untuk fasilitas pencucian dan penginapan mobil, SCC tipe MPPT lebih direkomendasikan karena mampu menyesuaikan tegangan panel surya yang bervariasi sepanjang hari dan mengoptimalkan proses pengisian baterai. Hal ini sangat penting agar energi yang dihasilkan dari panel surya dapat dimanfaatkan secara maksimal dan tidak terbuang.



Gambar 2. 8 MPPT

2.4.3 Baterai

Baterai merupakan komponen kritis dalam sistem PLTS off-grid yang berfungsi sebagai media penyimpanan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya. Dalam konteks sistem backup penerangan untuk fasilitas pencucian dan penginapan mobil, baterai berperan sebagai jantung sistem yang menjamin kontinuitas pasokan energi listrik ketika sumber energi utama tidak tersedia, baik pada malam hari, kondisi cuaca mendung, maupun saat terjadi pemadaman listrik dari jaringan PLN. Fungsi strategis baterai dalam sistem ini tidak hanya terbatas sebagai penyimpan energi, tetapi juga sebagai penstabil sistem dengan menyediakan daya yang konsisten dan andal untuk memenuhi kebutuhan beban penerangan selama periode operasi yang telah ditentukan.

Kapasitas penyimpanan energi baterai menjadi parameter fundamental yang menentukan performa dan keandalan seluruh sistem. Kapasitas ini umumnya dinyatakan dalam satuan Ampere-hour (Ah) atau Watt-hour (Wh), dimana semakin besar kapasitas baterai, semakin lama sistem dapat menyuplai energi ke beban penerangan. Namun, perencanaan kapasitas baterai tidak hanya bergantung pada besarnya kapasitas nominal, tetapi juga harus mempertimbangkan berbagai faktor teknis lainnya seperti Kedalaman Pelepasan (Depth of Discharge/DoD), efisiensi round-trip, umur siklus, dan tegangan sistem. DoD merupakan persentase maksimum kapasitas baterai yang dapat digunakan tanpa merusak integritas dan umur pakai baterai. Sebagai contoh, baterai Lithium-ion (LiFePO_4) mampu beroperasi pada DoD 80-95% dengan umur siklus yang panjang, sementara baterai Lead-acid konvensional hanya direkomendasikan pada DoD 50% untuk menjaga durabilitasnya.

Pemilihan jenis baterai yang tepat menjadi langkah krusial dalam perencanaan sistem yang optimal. Untuk aplikasi sistem backup penerangan komersial seperti fasilitas pencucian dan penginapan mobil, pertimbangan tidak hanya pada aspek teknis tetapi juga aspek ekonomis jangka panjang. Baterai Lithium-ion, meskipun memiliki investasi awal yang lebih tinggi, menawarkan efisiensi yang lebih baik (sekitar 95%), umur pakai yang lebih panjang, dan kemampuan DoD yang lebih dalam sehingga secara efektif dapat mengurangi ukuran fisik dan berat sistem penyimpanan energi. Di sisi lain, baterai Valve Regulated Lead Acid (VRLA) tetap menjadi alternatif yang layak untuk aplikasi dengan budget terbatas, meskipun dengan kompromi pada efisiensi (sekitar 80-85%) dan umur

siklus yang lebih pendek. Dalam penelitian ini, pertimbangan pemilihan jenis baterai akan dikaitkan dengan pola penggunaan dan kebutuhan spesifik fasilitas pencucian dan penginapan mobil di Kota Tanjungbalai, dengan mempertimbangkan karakteristik operasional yang membutuhkan keandalan tinggi selama periode backup.



Gambar 2. 9 Baterai

2.4.4 Inverter

Inverter merupakan salah satu komponen utama dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang memiliki fungsi penting dalam mengubah arus listrik searah (Direct Current / DC) yang dihasilkan oleh panel surya atau disimpan dalam baterai menjadi arus bolak-balik (Alternating Current / AC) yang dapat digunakan oleh peralatan listrik pada umumnya. Proses konversi ini sangat krusial, karena sebagian besar peralatan elektronik dan sistem penerangan, termasuk lampu-lampu LED, kipas, dan perangkat pendukung lainnya di fasilitas pencucian maupun penginapan mobil, bekerja dengan menggunakan arus listrik AC 220 Volt. Dengan demikian, keberadaan inverter memastikan energi yang disimpan dalam sistem PLTS off-grid dapat dimanfaatkan secara langsung untuk kebutuhan operasional harian.

Dalam sistem PLTS off-grid, inverter berperan tidak hanya sebagai konverter arus, tetapi juga sebagai pengatur kualitas daya listrik yang dihasilkan. Inverter yang baik mampu menghasilkan gelombang listrik dengan bentuk menyerupai arus PLN, yaitu gelombang sinus murni (pure sine wave), yang memiliki kestabilan tinggi dan harmonik rendah. Penggunaan inverter dengan jenis pure sine wave sangat disarankan dalam sistem PLTS yang digunakan untuk beban sensitif seperti lampu LED, charger, atau peralatan elektronik, karena jenis inverter ini menghasilkan daya yang lebih bersih dan tidak menimbulkan gangguan elektromagnetik. Sebaliknya, inverter dengan gelombang

modified sine wave meskipun lebih murah, cenderung menghasilkan distorsi sinyal yang dapat mengurangi efisiensi dan umur pakai peralatan listrik.



Gambar 2. 10 Inverter

2.5 Komponen Pendukung

Selain empat komponen utama, sistem PLTS off-grid juga memerlukan beberapa komponen pendukung yang berfungsi untuk menunjang keamanan, keandalan, serta efisiensi operasional sistem secara keseluruhan. Komponen pendukung ini tidak secara langsung terlibat dalam proses konversi energi, tetapi memiliki peran penting dalam memastikan bahwa aliran daya listrik dari panel surya hingga ke beban penerangan berlangsung stabil, aman, dan sesuai dengan standar instalasi kelistrikan. Dalam konteks sistem backup penerangan di fasilitas pencucian dan penginapan mobil, keberadaan komponen pendukung menjadi aspek vital untuk menjaga kontinuitas suplai energi terutama saat terjadi fluktuasi beban atau gangguan eksternal.

2.5.1 Combiner Box

Combiner box merupakan komponen penting dalam sistem PLTS off-grid yang berfungsi untuk menggabungkan beberapa rangkaian (string) panel surya menjadi satu keluaran utama sebelum menuju solar charge controller atau inverter. Perangkat ini umumnya dilengkapi dengan sekering (fuse), pemutus arus (circuit breaker), dan terminal block untuk memastikan arus dari masing-masing string dapat dikontrol dan diamankan dengan mudah. Penggunaan combiner box menjadi sangat penting ketika jumlah panel surya cukup banyak dan dipasang secara paralel. Selain berfungsi menggabungkan arus, combiner box juga mempermudah proses pemeliharaan dan troubleshooting, karena teknisi dapat memutus atau memeriksa setiap string panel tanpa mempengaruhi

keseluruhan sistem. Fungsi lainnya adalah untuk mencegah terjadinya arus balik (reverse current) yang dapat menyebabkan kerusakan pada panel surya serta meningkatkan keselamatan dan keandalan sistem secara keseluruhan.



Gambar 2. 11 Combiner Box

2.5.2 Proteksi DC dan AC

Sistem proteksi listrik pada sistem PLTS off-grid memiliki peranan penting untuk melindungi peralatan dari gangguan kelistrikan seperti arus lebih (overcurrent), hubung singkat (short circuit), maupun lonjakan tegangan (overvoltage). Pada sisi DC, perlindungan dilakukan menggunakan DC Circuit Breaker, DC Fuse, dan DC Disconnect Switch yang ditempatkan di antara panel surya, solar charge controller, dan baterai. Sementara itu, pada sisi AC, proteksi menggunakan AC Circuit Breaker dan AC Isolator yang dipasang setelah inverter untuk melindungi beban penerangan dari kerusakan akibat gangguan listrik. Selain perangkat pemutus arus, sistem proteksi juga dilengkapi dengan Surge Protection Device (SPD), baik pada sisi DC maupun AC, untuk melindungi sistem dari lonjakan tegangan akibat sambaran petir atau gangguan eksternal lainnya. Pemilihan rating komponen proteksi harus disesuaikan dengan kapasitas sistem PLTS agar perangkat pelindung dapat bekerja secara optimal tanpa menimbulkan pemutusan palsu (false trip).

2.5.3 Grounding dan Surge Protection

Penyangga atau mounting modul fotovoltaik merupakan struktur mekanis yang berfungsi untuk menopang dan menjaga posisi panel surya agar tetap kokoh, stabil, serta berada pada sudut kemiringan optimal sesuai lintang geografis lokasi pemasangan. Sudut kemiringan yang tepat berpengaruh langsung terhadap jumlah energi matahari yang dapat

diserap panel, sehingga mempengaruhi daya keluaran sistem. Umumnya, penyangga terbuat dari bahan aluminium anodized atau baja galvanis yang memiliki ketahanan tinggi terhadap korosi dan kondisi cuaca ekstrem. Desain mounting harus mempertimbangkan arah datangnya sinar matahari di wilayah Indonesia umumnya menghadap ke utara serta kekuatan angin dan kestabilan pondasi. Penyangga yang dirancang dengan baik akan menjaga orientasi panel tetap optimal, meningkatkan efisiensi penyerapan energi, dan memastikan keamanan struktur sistem PLTS dalam jangka panjang.



Gambar 2. 12 Grounding

2.6 Konsep Daya Dan Energi

Dalam proses perancangan sistem backup penerangan berbasis PLTS, langkah awal yang paling fundamental adalah menentukan kebutuhan beban listrik secara akurat. Perhitungan ini bertumpu pada pemahaman terhadap dua besaran utama dalam ilmu kelistrikan, yaitu daya (power) dan energi listrik (energy). Keduanya memiliki definisi dan satuan yang berbeda, namun saling berkaitan erat. Daya menunjukkan seberapa besar energi digunakan dalam satuan waktu, sedangkan energi menggambarkan total penggunaan daya dalam periode tertentu. Pemahaman yang tepat terhadap kedua konsep ini menjadi dasar dalam menentukan dimensi komponen sistem, terutama kapasitas baterai dan panel surya yang akan digunakan untuk menyuplai beban penerangan pada malam hari.

2.6.1 Daya Listrik

Daya listrik merupakan laju kerja yang dilakukan oleh arus listrik dalam suatu rangkaian atau dapat diartikan sebagai kecepatan transfer energi listrik dari sumber ke beban. Satuan daya listrik adalah Watt (W), yang menyatakan banyaknya energi listrik yang digunakan per detik. Dalam sistem kelistrikan, daya menjadi parameter utama untuk mengetahui kebutuhan energi setiap peralatan, seperti lampu penerangan yang digunakan dalam sistem ini.

Secara matematis, besarnya daya listrik dapat dihitung menggunakan persamaan dasar:

$$P = V \times I \quad (2.1)$$

Dengan:

P = daya listrik (Watt)

V = tegangan listrik (Volt)

I = arus listrik (Ampere)

Dalam konteks sistem PLTS off-grid, besaran daya digunakan untuk menentukan kapasitas inverter (berdasarkan total daya beban AC) serta kemampuan Solar Charge Controller (SCC) dalam menyalurkan arus dari panel surya menuju baterai. Semakin besar total daya beban penerangan, maka semakin besar pula kapasitas inverter dan baterai yang dibutuhkan untuk menjamin sistem dapat bekerja dengan stabil.

2.6.2 Energi Listrik

Energi listrik adalah total daya listrik yang digunakan dalam jangka waktu tertentu. Energi menjadi parameter yang sangat penting dalam perencanaan sistem PLTS, karena berhubungan langsung dengan kapasitas penyimpanan energi pada baterai. Tanpa mengetahui total energi yang digunakan oleh beban, kapasitas baterai yang direncanakan bisa tidak sesuai terlalu kecil menyebabkan sistem cepat habis, sedangkan terlalu besar menyebabkan pemborosan biaya.

Secara umum, energi listrik dapat dihitung dengan persamaan:

$$E = P \times t \quad (2.2)$$

Dengan:

E = energi listrik (Watt-hour, Wh)

P = daya listrik (Watt)

t = waktu operasi (jam)

2.7 Karakteristik Beban Penerangan

Pemahaman terhadap karakteristik beban penerangan merupakan langkah penting dalam perancangan sistem backup PLTS yang andal dan efisien. Analisis ini tidak hanya meninjau besarnya daya listrik yang dikonsumsi oleh beban, tetapi juga mencakup jenis peralatan penerangan yang digunakan, pola operasionalnya, serta karakteristik elektrikalnya. Setiap aspek tersebut berpengaruh langsung terhadap hasil perhitungan kebutuhan energi harian dan kapasitas komponen utama sistem, terutama baterai. Dalam konteks penelitian ini, karakteristik beban penerangan difokuskan pada fasilitas pencucian dan penginapan mobil di Kota Tanjungbalai, yang memiliki variasi kebutuhan cahaya antara area pencucian, area penginapan, dan area luar ruangan.

2.7.1 Jenis dan Spesifikasi Beban Penerangan

Fasilitas komersial modern umumnya telah beralih menggunakan lampu Light Emitting Diode (LED) sebagai sumber penerangan utama karena efisiensi energi yang tinggi, umur pakai yang panjang, serta kualitas pencahayaan yang stabil. Dibandingkan dengan lampu konvensional seperti lampu pijar, TL, atau halogen, lampu LED hanya membutuhkan daya 3–20 Watt per unit untuk menghasilkan tingkat pencahayaan (lumen output) yang setara, sehingga sangat ideal untuk sistem backup berbasis PLTS.

Dari sisi karakteristik teknis, lampu LED memiliki faktor daya (power factor) yang umumnya mendekati 1, sehingga beban yang ditimbulkan bersifat hampir resistif. Hal ini menguntungkan karena mengurangi kebutuhan daya reaktif dan membuat inverter bekerja lebih efisien. Selain itu, penggunaan driver elektronik internal pada lampu LED membuat arus listrik yang diserap menjadi relatif stabil tanpa lonjakan arus awal yang signifikan, sehingga memperpanjang umur baterai dan mengurangi risiko kelebihan arus pada inverter. Secara keseluruhan, karakteristik lampu LED yang efisien, stabil, dan memiliki daya rendah menjadikannya komponen penerangan paling sesuai untuk sistem backup PLTS skala kecil, seperti pada fasilitas pencucian dan penginapan mobil ini.

Efisiensi tinggi dari lampu LED juga membantu menekan kapasitas baterai yang diperlukan untuk mencapai waktu operasi yang diinginkan.

2.7.2 Pola Operasi Beban (Duty Cycle)

Selain jenis lampu, pola operasi atau waktu nyala beban penerangan juga menjadi parameter penting yang harus diperhitungkan dalam analisis kebutuhan energi. Pada sistem backup PLTS, tidak semua titik penerangan akan beroperasi secara bersamaan atau dalam durasi yang sama. Oleh karena itu, beban penerangan perlu diklasifikasikan berdasarkan tingkat prioritas dan waktu penggunaannya.

Secara umum, pola operasi penerangan dapat dibagi menjadi dua mode utama:

1. Mode Normal/Operasional, yaitu kondisi di mana sistem listrik PLN berfungsi normal dan seluruh lampu menyala sesuai kebutuhan harian fasilitas. Data konsumsi daya dari mode ini dapat digunakan sebagai acuan untuk mengetahui pola beban aktual dan validasi konsumsi energi harian.
2. Mode Backup, yaitu kondisi di mana suplai listrik dari PLN terputus dan sistem PLTS off-grid mengambil alih fungsi penerangan. Dalam mode ini, hanya titik-titik penerangan penting yang tetap diaktifkan misalnya area pencucian, pos kasir, dan jalur keamanan, sedangkan beban non-esensial akan dimatikan.

Durasi operasi pada mode backup disesuaikan dengan waktu autonomy yang direncanakan, misalnya 10 jam. Data ini menjadi dasar dalam menentukan kapasitas baterai dan energi yang harus disediakan sistem. Dengan analisis pola operasi yang tepat, sistem PLTS dapat dirancang agar kapasitas baterai tidak berlebihan namun tetap mampu menjaga penerangan kritis selama periode pemadaman.

2.7.3 Faktor Elektrikal Pendukung

Selain jenis dan waktu operasi, terdapat pula beberapa karakteristik teknis yang berpengaruh terhadap performa sistem backup penerangan. Di antaranya:

1. Faktor Daya (Power Factor): Pada lampu LED modern, faktor daya biasanya mendekati 1, artinya hampir tidak ada daya reaktif yang perlu dikompensasi. Ini berdampak positif pada efisiensi inverter dan stabilitas tegangan sistem.

2. Arus Awal (Inrush Current): Walaupun relatif kecil pada lampu LED, arus awal tetap perlu diperhitungkan dalam pemilihan kapasitas inverter dan proteksi agar sistem tidak mengalami trip sesaat saat semua lampu dinyalakan bersamaan.
3. Distorsi Harmonisa (THD): Lampu LED dengan driver berkualitas buruk dapat menimbulkan harmonisa arus yang berdampak pada kualitas daya sistem. Oleh karena itu, pemilihan lampu LED dengan driver berstandar SNI atau IEC perlu dipertimbangkan agar inverter dan baterai bekerja dalam kondisi stabil.