

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Prinsip dasar pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) yaitu menghasilkan energi listrik dengan merubah sinar matahari. Di Indonesia, implementasi PLTS pada rumah tangga telah berkembang pesat. Berikut alasan utama membangun PLTS untuk rumah tangga:

1. Sumber energi tersedia gratis dan berlimpah.
2. Sumber Energi terdapat dimana-mana.
3. Biaya perawatan sistem tergolong rendah.
4. Minim Pemeliharaannya dan dapat dilakukan oleh tenaga terlatih dari masyarakat setempat.

[1]

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah sebuah sistem pembangkit listrik yang mengkonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Sebagai salah satu sumber energi terbarukan yang paling menjanjikan, PLTS memanfaatkan sumber daya alam yang melimpah dan tidak akan habis, yaitu sinar matahari. Teknologi ini menjadi semakin populer di seluruh dunia seiring dengan meningkatnya kesadaran akan perlunya mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil yang berkontribusi terhadap perubahan iklim. PLTS dapat diaplikasikan dalam berbagai skala, mulai dari sistem kecil untuk keperluan rumah tangga (atap surya) hingga pembangkit listrik skala besar yang menutupi area seluas hektaran untuk menyuplai jaringan listrik publik.

Komponen utama dalam sebuah sistem PLTS terdiri dari beberapa perangkat penting yang bekerja secara terintegrasi. Panel surya adalah komponen terdepan yang berfungsi menangkap radiasi matahari dan mengubahnya menjadi listrik arus searah (DC) melalui proses fotovoltaiik. Selanjutnya, inverter berperan mengubah arus DC tersebut menjadi arus bolak-balik (AC) yang dapat digunakan oleh peralatan elektronik rumah tangga atau industri. Dalam sistem yang terhubung

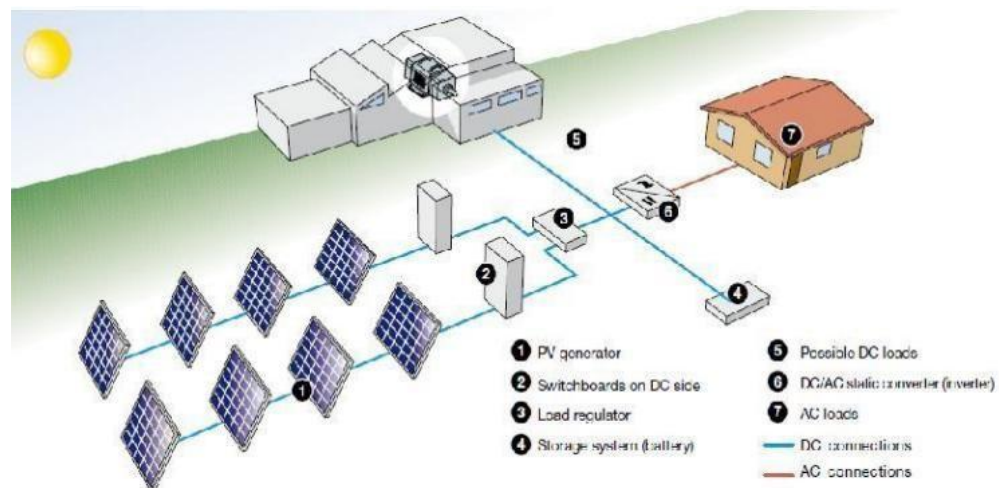
dengan jaringan listrik, terdapat juga meteran dua arah untuk mengukur aliran listrik. Sementara untuk sistem off-grid (mandiri), diperlukan baterai sebagai media penyimpan energi agar listrik tetap tersedia saat malam hari atau cuaca mendung, serta charge controller atau MPPT untuk mengatur aliran listrik dari panel menuju baterai.

Prinsip kerja PLTS dimulai ketika panel surya menyerap foton dari sinar matahari. Proses ini membangkitkan elektron-elektron dalam material semikonduktor, menciptakan aliran listrik DC. Listrik yang dihasilkan ini kemudian dialirkan menuju inverter. Inverter tidak hanya mengubah arus DC menjadi AC, tetapi juga menstabilkan tegangan dan frekuensi agar sesuai dengan standar kelistrikan. Listrik AC yang telah siap pakai ini kemudian dapat langsung digunakan untuk menyalakan peralatan listrik di dalam gedung. Apabila produksi listrik melebihi kebutuhan, kelebihan daya pada sistem on-grid akan otomatis diekspor ke jaringan listrik PLN, sementara pada sistem off-grid, kelebihan daya akan disimpan ke dalam baterai.

Berdasarkan cara operasinya, PLTS dapat dikategorikan menjadi tiga jenis utama. Pertama, PLTS On-Grid atau grid-tie, yang terhubung langsung dengan jaringan listrik publik dan tidak memiliki baterai, sehingga kelebihannya dapat dijual balik ke PLN. Kedua, PLTS Off-Grid atau stand-alone, yang sepenuhnya mandiri dengan baterai dan biasanya diterapkan di daerah terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik. Ketiga, PLTS Hybrid, yang merupakan kombinasi dari kedua sistem sebelumnya, biasanya dilengkapi dengan sumber energi cadangan lain seperti genset diesel atau turbin angin untuk memastikan pasokan listrik yang lebih andal dan kontinu.

Keberadaan PLTS memberikan berbagai manfaat signifikan baik dari sisi lingkungan maupun ekonomi. Dari aspek lingkungan, PLTS membantu mengurangi emisi gas rumah kaca secara drastis karena proses produksinya tidak menghasilkan polusi. Secara ekonomi, meskipun investasi awal cukup besar, PLTS menawarkan penghematan jangka panjang karena biaya operasional dan perawatannya yang rendah serta sumber energinya yang gratis. Selain itu, PLTS juga mendorong kemandirian energi, mengurangi ketergantungan pada pasokan

listrik eksternal, serta menciptakan lapangan kerja baru di sektor energi terbarukan. Dengan teknologi yang terus berkembang dan biaya yang semakin terjangkau, PLTS diproyeksikan akan menjadi tulang punggung sistem energi masa depan yang berkelanjutan.



Gambar 2. 1 Diagram Prinsip PLTS Stand Alone

2.1.2 Sistem PLTS Hybrid

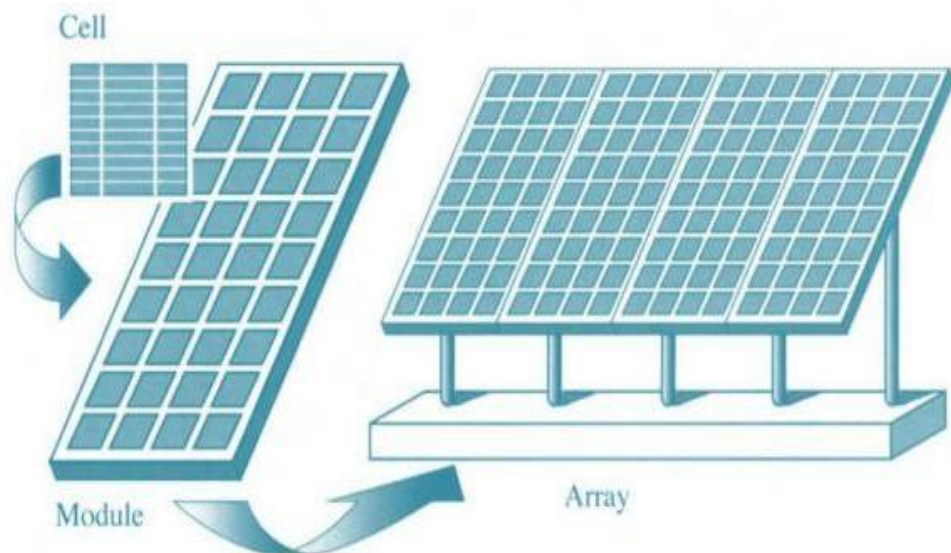
Sistem PLTS Hybrid didefinisikan sebagai sebuah pembangkit listrik yang mengkombinasikan sumber energi matahari dengan berbagai sumber energi lainnya. Sumber lain ini tidak terbatas hanya pada Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), tetapi juga dapat mencakup Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG), Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), dan sejenisnya. Dinamakan "hybrid" karena sistem ini memadukan beragam sumber pembangkit listrik, seperti gas, panas bumi, angin, dan diesel. Dalam satu pengertian, PLTS Hybrid secara khusus memadukan sistem tenaga surya dengan sistem pembangkit Energi Baru Terbarukan (EBT) lainnya. Tujuan dari integrasi ini adalah untuk menjaga keberlanjutan pasokan energi sekaligus memaksimalkan penggunaan energi hijau.

Pada konteks ini, PLTS hybrid mengintegrasikan dua sumber penyediaan energi, yaitu panel surya, dan jaringan listrik PLN. Dengan konfigurasi ini, PLTS hybrid

dianggap mampu menghilangkan kelemahan-kelemahan yang melekat pada sistem on-grid dan off-grid, sambil menggabungkan kelebihan dari keduanya menjadi satu kesatuan yang sinergis. Sebagaimana diketahui, sistem on-grid terhubung dengan jaringan PLN namun tidak menyimpan energi surya di dalam baterai, sedangkan sistem off-grid mampu menyimpan daya dalam baterai namun tidak terhubung dengan jaringan PLN. Keistimewaan PLTS Hybrid terletak pada kemampuannya untuk menyatukan kelebihan kedua sistem tersebut, menciptakan sebuah solusi kelistrikan yang andal dan efisien.

2.1.3 Panel Surya

Panel surya atau sel surya adalah komponen pembangkit listrik yang mengubah sinar matahari menjadi listrik melalui efek fotovoltaiik. Sebuah sel surya menghasilkan tegangan yang sangat kecil, yaitu sekitar 0,6 V (tanpa beban) atau 0,45 V (dengan beban). Untuk memperoleh tegangan yang lebih tinggi, beberapa sel surya harus disusun secara seri. Semakin banyak sel surya yang digabungkan, semakin besar tegangan keluarannya. Gabungan dari banyak sel surya inilah yang disebut Panel Surya atau Modul.



Gambar 2. 2 Dari Sel Surya Menjadi Modul dan Rangkaian Modul (Array)

Prinsip kerja panel surya bermula ketika cahaya matahari menyinari permukaannya. Paparan cahaya ini menyebabkan elektron-elektron dalam sel surya bergerak dari semikonduktor tipe – N menuju semikonduktor tipe – P. Aliran elektron inilah yang kemudian menghasilkan energi listrik pada panel surya. Besarnya energi listrik yang dihasilkan oleh sebuah panel surya bersifat variatif, di mana nilainya ditentukan oleh jumlah sel surya yang tergabung dalam rangkaian panel tersebut. Tegangan yang dihasilkan dari proses ini berupa listrik arus searah (DC). Besar Tegangan dari keluaran DC ini tidak tetap, tetapi bergantung pada dua faktor utama: jumlah total sel surya yang terpasang di dalam panel dan intensitas sinar matahari yang diterima oleh panel surya pada saat itu.

Prinsip kerja panel surya konvensional didasarkan pada sambungan semikonduktor tipe-p dan tipe-n, yang dikenal sebagai p-n junction. Semikonduktor tersusun dari atom-atom yang saling berikatan, dengan elektron sebagai komponen dasarnya. Semikonduktor tipe-n memiliki kelebihan elektron (bermuatan negatif), sementara semikonduktor tipe-p memiliki kelebihan hole atau lubang bermuatan positif. Kelebihan elektron dan hole ini dihasilkan melalui proses penambahan atom dopant ke dalam material. Sebagai contoh, material silikon dapat diubah menjadi tipe-p dengan menambahkan atom boron, sedangkan untuk menghasilkan silikon tipe-n, atom fosfor ditambahkan ke dalamnya.

2.1.4 Jenis Jenis Panel Surya

a. Monocrystalin

Panel ini memang dikenal sebagai jenis panel yang paling efisien dalam mengubah energi matahari menjadi energi listrik per satuan luasnya. Efisiensinya dapat mencapai hingga 15%, yang merupakan angka tertinggi di antara jenis panel surya berbasis silikon yang umum di pasaran.



Gambar 2. 3 Monocrystalline

Namun, di balik efisiensi tingginya, panel jenis monokristalin memiliki beberapa kelemahan mendasar. Kelemahan pertama adalah kinerjanya yang sangat bergantung pada intensitas cahaya matahari langsung. Panel ini tidak akan berfungsi dengan baik di tempat yang cahayanya matahari kurang atau teduh. Efisiensinya akan turun secara drastis ketika cuaca berawan atau dalam kondisi pencahayaan yang rendah.

Kelemahan kedua terkait dengan bentuk fisik dari sel suryanya. Sel surya monokristalin dibuat dari batangan kristal silikon murni yang berbentuk silinder. Karena bentuk dasar inilah, sel surya ini sering dipotong menyerupai bentuk segi enam atau bahkan dibiarkan tetap bulat untuk menghemat bahan dan mengurangi limbah pemotongan. Akibatnya, ketika sel-sel surya ini disusun secara berdampingan untuk membentuk sebuah panel surya (solar modul), akan banyak tersisa ruangan yang kosong di antara sela-sela sel yang berbentuk bulat atau segi enam tersebut, berbeda dengan panel polikristalin yang permukaannya cenderung penuh tanpa celah.

b. Polycristalin

Jenis panel surya ini terbuat dari beberapa batang kristal silikon yang melalui proses peleburan atau pencairan, kemudian dituangkan ke dalam sebuah cetakan yang berbentuk persegi panjang. Tingkat kemurnian kristal silikon yang digunakan tidak setinggi pada sel surya monokristalin. Akibatnya, sel surya yang dihasilkan tidaklah identik satu sama lain dan memiliki efisiensi yang lebih rendah, yaitu berkisar antara 13% hingga 16%. Panel ini memiliki ciri khas berupa susunan kristal yang acak, yang menciptakan tampilan visual seperti motif pecahan kaca di dalamnya. Untuk menghasilkan daya listrik yang setara dengan tipe monokristal, jenis polikristal ini memerlukan luas permukaan yang lebih besar. Akan tetapi, sebuah keunggulannya adalah jenis ini masih dapat menghasilkan listrik dalam kondisi cuaca yang berawan.



Gambar 2. 4 Polycrystalline

2.1.5 Perhitungan Efisiensi Panel Surya

Proses perhitungan pada energi yang akan dihasilkan panel surya, daya masuk atau P_{in} merujuk kepada besaran daya yang diterima oleh panel. Nilai ini diperoleh melalui suatu perhitungan matematis antara nilai intensitas radiasi matahari yang diterima dengan luas permukaan penampang panel surya. Perhitungan nilai daya masukan (P_{in}) ini selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk menghitung besarnya

nilai efisiensi panel surya, yang merupakan hasil dari suatu perbandingan antara daya listrik yang dihasilkan (P_{out}) dengan daya masuk (P_{in}) tersebut. Berikut perhitungan nilai daya masukan :

$$P_{in} = I_{bt} A \quad (2.1)$$

Keterangan :

- P_{in} : Daya input *irradiance* matahari (W)
- I_{bt} : Intensitas radiasi matahari (W/m^2)
- A : Luas permukaan panel surya (m^2)

Pada perhitungan daya keluaran panel surya atau P_{out} ialah perkalian dari tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}), dengan arus hubung singkat (I_{sc}) :

$$P_{out} = V_{oc} I_{sc} \quad (2.2)$$

Keterangan:

- P_{out} : Daya yang dihasilkan panel surya (W)
- V_{oc} : Tegangan rangkaian terbuka panel surya (V)
- I_{sc} : Arus hubung singkat panel surya (A)

Adapun efisiensi panel surya merupakan perbandingan dari daya yang dihasilkan panel surya dengan energi input (P_{in}) yang diperoleh dari *irradiance* matahari. Perhitungan nilai efisiensi sebagai berikut.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.3)$$

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc}}{I_{bt} A} \times 100\% \quad (2.4)$$

Keterangan

: Daya yang dihasilkan panel surya (W)

: Daya Input irradiance matahari (W)

I_{bt} : Intensitas radiasi matahari (W/m^2)

2.1.6 Inverter

Inverter merupakan sebuah perangkat listrik yang berfungsi untuk mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC). Perangkat ini melakukan konversi daya DC yang berasal dari sumber seperti baterai atau panel surya menjadi daya AC. Dalam konteks Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), inverter digunakan untuk mengoperasikan perangkat-perangkat yang membutuhkan pasokan listrik arus bolak-balik (AC).

Inverter adalah perangkat elektronik yang berfungsi mengubah arus listrik searah (DC) menjadi arus listrik bolak-balik (AC). Dalam konteks sistem panel surya, inverter mengambil listrik DC yang dihasilkan oleh panel surya, lalu mengubahnya menjadi listrik AC yang dapat digunakan untuk menjalankan peralatan elektronik rumah tangga atau disalurkan ke jaringan listrik umum. Proses ini dimulai ketika tegangan DC dari panel surya masuk ke dalam rangkaian inverter.

Inti dari proses konversi ini melibatkan serangkaian saklar elektronik berkecepatan tinggi, biasanya menggunakan komponen seperti transistor atau thyristor. Saklar-saklar ini diatur untuk membuka dan menutup secara bergantian dalam pola tertentu sehingga membalikkan arah aliran arus DC secara periodik. Dengan membalikkan polaritas secara terus-menerus, arus DC yang semula searah diubah menjadi arus AC yang berbentuk gelombang. Pada inverter modern, pola saklar ini dikendalikan oleh mikrokontroler menggunakan teknik yang disebut Pulse Width Modulation (PWM) untuk menghasilkan gelombang sinus yang halus dan stabil.

Hasil keluaran dari inverter kemudian disaring menggunakan komponen kapasitor dan induktor untuk meminimalkan gangguan atau noise, sehingga menghasilkan gelombang AC yang bersih. Inverter yang baik tidak hanya mengubah arus, tetapi juga menstabilkan tegangan dan frekuensi agar sesuai dengan standar listrik yang berlaku (misalnya 220V/50Hz). Dalam sistem surya yang terintegrasi dengan baterai atau jaringan listrik, inverter modern sering dilengkapi dengan fitur cerdas seperti pelacak titik daya maksimum (MPPT) untuk mengoptimalkan efisiensi panel surya.



Gambar 2. 5 Inverter

Adapun jenis-jenis inverter yang banyak dipasarkan Indonesia adalah sebagai berikut:

1. Solar Inverter

Umumnya solar inverter digunakan untuk mengubah tegangan DC dari solar panel maupun aki menjadi arus listrik AC. Saat ini, Solar inverter dilengkapi dengan battery charger yang bisa digunakan untuk menambah daya baterai.

2. UPS (Interruptible Power Supply)

UPS merupakan gabungan dari inverter dan rectifier. Seperti yang kita ketahui bahwa inverter berfungsi merubah arus DC menjadi AC, sedangkan rectifier sebaliknya. Rectifier berarti berguna untuk mengisi tegangan listrik ke baterai.

sedangkan inverter mengembalikannya ke arus PLN. Sedangkan stabilizer berguna untuk menstabilkan tegangan pada rektifier yang membuat baterai dapat terisi di tegangan yang optimal.

3. Variable Speed Drive

VSD (Variable Speed Drive) merupakan gabungan dari inverter dan rectifier juga. Namun, pada VSD tidak dilengkapi baterai seperti UPS. Tujuan menkonversi tegangan listriknya ialah untuk melakukan digitizing. Nantinya tegangan DC dapat disesuaikan frekuensinya lalu akan dikonversikan kembali menjadi tegangan AC. Biasanya fungsi ini digunakan pada perangkat listrik yang memiliki jenis induksi seperti motor listrik dll.

.Adapun Jenis Inverter Berdasarkan Gelombangnya yaitu:

a.) Square Sine Wave Inverter

Jenis sinyal yang berbentuk kotak, sesuai dengan namanya. Sinyal ini tidak cocok dengan beban coil, seperti kulkas, atau trafo jenis tertentu, karena justru dapat merusak peralatannya. Inverter ini sering disebut sebagai push- pull inverter. Pada jenis ini sinyal yang dihasilkan inverter memiliki bentuk output sinyal kotak sesuai namanya dan sangat tidak cocok digunakan untuk beban dengan coil misalnya kulkas, atau trafo tertentu karena bisa merusak peralatan tersebut. Inverter jenis ini sering juga disebut push-pull inverter

b.) Modified Sine Wave Inverter

Inverter ini merupakan hasil modifikasi dari square sine wave inverter. Inverter ini dapat dipakai pada beban kumparan, namun hasil yang didapat akan menjadi tidak optimal, dan pemborosan daya juga menjadi lebih tinggi. Inverter ini tidak disarankan untuk jenis-jenis peralatan yang sensitif. Misalnya pada home theater atau jenis-jenis peralatan audio.

c.) Pure Sine Wave Inverter

Sine wave inverter (Pure sinewave), yaitu inverter yang memiliki tegangan

output dengan bentuk gelombang sinus murni atau sama seperti bentuk gelombang tegangan dari PLN. Inverter jenis ini dapat memberikan supply tegangan ke beban (Induktor) atau motor listrik dengan efisiensi daya yang baik. Ini adalah inverter terbaik saat ini.

Rugi-rugi / losses yang terjadi pada inverter biasanya berupa dissipasi daya dalam bentuk panas. Pada umumnya efisiensi inverter adalah berkisar 50-90% tergantung dari beban outputnya. Bila beban outputnya semakin mendekati beban kerja inverter yang tertera maka effisiensinya semakin besar, demikian pula sebaliknya.

2.1.7 MCB

Miniature Circuit Breaker (MCB) merupakan komponen proteksi yang dirancang untuk mengamankan rangkaian listrik dengan cara membatasi tingkat arus yang masuk ke dalam beban secara otomatis. Alat ini sekaligus memiliki fungsi sebagai saklar. Pada saat akan dipasang, MCB perlu disetting sesuai dengan kapasitas daya listrik yang dimiliki oleh instalasi rumah. Hal ini dilakukan agar pemakaian energi listrik dapat sesuai dengan yang dibutuhkan. Cara kerjanya didasarkan pada prinsip elektromagnetik dan termal untuk mendeteksi dua jenis gangguan listrik yang umum terjadi, yaitu beban lebih (overload) dan hubungan singkat (korsleting/ short circuit). Secara sederhana, MCB dirancang untuk "memutuskan" aliran listrik secara otomatis ketika mendeteksi adanya arus listrik yang melebihi batas aman yang telah ditentukan (sesuai rating-nya, misalnya 4A, 6A, atau 10A).



Gambar 2. 6 MCB

2.1.8 Relay



Gambar 2. 7 Relay

Relay adalah komponen listrik yang bekerja berdasarkan prinsip elektromekanikal untuk melakukan pengontrolan dan penghubungan terhadap suatu rangkaian listrik melalui cara mekanis. Peran relay sangat krusial dalam sistem kontrol kelistrikan, di mana komponen ini berguna untuk melakukan kontrol, baik jarak jauh maupun dekat, terhadap sebuah sistem rangkaian. Salah satu contoh penerapannya adalah pada ATS yang berfungsi sebagai pemutus dan penghubung aliran listrik.

Prinsip dasar kerjanya dimulai ketika arus listrik mengalir melalui kumparan (koil) yang terbuat dari lilitan kawat. Aliran arus ini menciptakan medan magnet di sekitar kumparan, yang kemudian menarik tuas atau kontak bergerak (armature) yang terbuat dari bahan ferromagnetik. Ketika tuas ini tertarik, posisinya akan berubah dan menyebabkan terjadinya perpindahan kontak, dari yang awalnya terbuka (Normally Open/NO) menjadi tertutup, atau sebaliknya dari yang awalnya tertutup (Normally

Closed/NC) menjadi terbuka. Proses inilah yang memungkinkan relay untuk memutus atau menyambungkan aliran listrik pada rangkaian lain yang terpisah. Saat arus listrik pada kumparan dimatikan, medan magnet akan lenyap dan tuas akan kembali ke posisi semula karena dorongan pegas, sehingga kontak pun kembali ke kondisi awal.

Relay memiliki tiga terminal utama yang perlu dipahami, yaitu terminal koil, terminal kontak Normally Open (NO), dan terminal kontak Normally Closed (NC). Terminal koil adalah tempat mengalirkan arus listrik untuk mengaktifkan medan magnet. Terminal NO adalah kontak yang dalam kondisi normal (saat relay tidak dialiri arus) berada dalam keadaan terbuka, sehingga tidak menghantarkan listrik. Ketika relay diaktifkan, kontak NO ini akan menutup dan menghantarkan listrik. Sebaliknya, terminal NC adalah kontak yang dalam kondisi normal berada dalam keadaan tertutup dan menghantarkan listrik, dan akan membuka (memutus aliran) saat relay diaktifkan.

2.1.9 Time Delay Relay

Time Delay Relay (TDR) merupakan sebuah peralatan kontrol yang memanfaatkan prinsip elektromagnet untuk mengoperasikan seperangkat kontak saklar. Alat yang sering juga disebut sebagai relay timer atau relay penunda. Peralatan kontrol ini memiliki kemampuan untuk dikombinasikan dengan peralatan kontrol lainnya, misalnya dengan Magnetic Contactor (MC), Thermal Overload Relay, dan sebagainya. Adapun tujuan dari pemasangan timer ini adalah untuk berperan sebagai pengatur waktu bagi peralatan-peralatan yang dikendalikannya. Secara spesifik, timer ini dirancang untuk mengatur waktu hidup (on) atau mati (off) dari kontaktor dalam jeda waktu (delay) yang telah ditentukan.



Gambar 2. 8 Time Delay Relay

2.1.10 Digital Time Switch



Gambar 2. 9 Digital Time Switch

Fungsi utama time switch adalah mengotomasi peralatan listrik dengan

mengendalikan nyala dan matinya arus listrik berdasarkan pengaturan waktu yang telah diprogram. Perangkat ini memungkinkan pengoperasian peralatan secara otomatis sesuai jadwal, tanpa perlu dihidupkan atau dimatikan secara langsung oleh pengguna.

2.1.11 MPPT

Dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), peran Maximum Power Point Tracking (MPPT) adalah untuk mengoptimalkan efisiensi panel surya. Alat ini bertujuan menemukan titik daya maksimum pada karakteristik kurva I-V panel, yakni saat daya listrik yang dihasilkan paling besar. Caranya adalah dengan melakukan pemantauan terus-menerus terhadap nilai tegangan dan arus yang dihasilkan panel pada saat itu juga. Data yang terkumpul kemudian digunakan oleh MPPT untuk mengatur besarnya arus yang melalui panel agar dapat bekerja pada titik daya puncaknya, yang menjamin produksi daya listrik yang paling optimal. Prinsip dasar yang diterapkan adalah melakukan penyesuaian, baik dengan meningkatkan maupun menurunkan, pada tingkat tegangan kerjanya.

MPPT adalah sebuah teknologi elektronik cerdas yang digunakan dalam sistem panel surya untuk memaksimalkan daya yang dihasilkan. Panel surya memiliki karakteristik keluaran yang tidak linear; daya keluarannya berubah-ubah tergantung pada intensitas cahaya matahari dan suhu. Pada setiap kondisi lingkungan, terdapat satu titik operasi spesifik di mana panel surya menghasilkan daya maksimum, yang dikenal sebagai Maximum Power Point (MPP). Tugas utama perangkat MPPT adalah secara otomatis menemukan dan mempertahankan panel surya agar selalu bekerja tepat pada titik tersebut, layaknya seorang pengemudi yang terus mencari gigi yang paling efisien untuk mendapatkan tenaga optimal dari mesin mobil.

Proses kerja MPPT dimulai dengan perangkat ini secara kontinu memonitor tegangan (V) dan arus (I) yang keluar dari panel surya. Dengan mengalikan kedua nilai tersebut, MPPT menghitung daya (P) yang dihasilkan pada saat itu. Kemudian, menggunakan algoritma khusus, seperti *Perturb and Observe* (P&O) atau *Incremental Conductance*, MPPT sedikit mengubah tegangan operasi panel dan mengamati apakah daya yang dihasilkan naik atau turun. Jika daya naik, MPPT akan terus mengubah

tegangan ke arah yang sama hingga mencapai puncaknya. Jika daya turun, arah perubahan tegangan akan dibalik. Proses mencari dan mengunci titik puncak daya ini dilakukan berulang kali dalam hitungan detik.

Setelah menemukan titik daya maksimum, MPPT terus menyesuaikan diri secara *real-time* terhadap perubahan kondisi lingkungan, seperti saat awan menutupi matahari atau suhu panel meningkat di siang hari. Untuk menyalurkan daya maksimum ini ke baterai atau beban, MPPT menggunakan konverter DC-DC. Konverter ini berfungsi mengubah kelebihan tegangan menjadi tambahan arus, sehingga proses pengisian baterai menjadi lebih efisien dan cepat. Dengan kemampuannya ini, MPPT dapat meningkatkan efisiensi sistem surya secara signifikan, hingga 30% lebih tinggi dibandingkan sistem tanpa MPPT, serta memastikan seluruh investasi panel surya dapat dimanfaatkan secara optimal.

Solar charge controller /MPPT merupakan seperangkat komponen elektronika yang berfungsi untuk:

- a) Mengatur transfer energi dari modul surya (PV) ke Accumulator / Baterai dan ke beban secara efisien dan semaksimal mungkin
- b) Melindungi baterai dari pengisian berlebih (overcharge) dengan cara memutuskan proses pengisian baterai pada tegangan batas atas
- c) Melindungi pengosongan berlebih (overdischarge) dengan memutuskan proses pengosongan baterai



Gambar 2. 10 MPPT

2.1.12 Baterai

Prinsip kerja baterai atau aki didasarkan pada proses pengisian dan pengosongan energi listrik di dalamnya. Ketika aki digunakan untuk menyuplai beban, terjadi proses pengosongan yang mengubah kedua elektroda menjadi timbal sulfat. Perubahan ini terjadi akibat reaksi antara elektroda dengan larutan asam sulfat sebagai elektrolit. Dalam reaksi tersebut, elektroda timbal melepaskan sejumlah besar elektron sehingga menimbulkan aliran listrik dari sisi timbal dioksida. Di dalam aki terdapat sel-sel yang berfungsi menyimpan arus listrik dan mengandung larutan asam sulfat. Setiap sel terdiri dari pelat positif dan pelat negatif, di mana pelat positif mengandung oksida timbal coklat (PbO_2) dan pelat negatif mengandung timbal murni (Pb). Kedua pelat tersebut dipasang pada batang penghubung dan dipisahkan oleh separator yang berfungsi sebagai isolasi, sekaligus memungkinkan sirkulasi elektrolit asam di sekitar pelat agar reaksi kimia dapat berlangsung secara optimal.

Dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), baterai berperan sebagai media penyimpan arus listrik yang dihasilkan panel surya sebelum digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban. Pada saat penyinaran matahari berlangsung,

panel surya menghasilkan daya listrik yang sebagian dapat langsung digunakan dan sebagian lagi disimpan ke dalam baterai. Kapasitas penyimpanan baterai dinyatakan dalam satuan Ampere-jam (Ah). Untuk aplikasi PLTS, jenis baterai yang paling sesuai adalah tipe deep cycle lead acid karena dirancang mampu mengalami siklus pengisian dan pengosongan yang dalam secara berulang. Spesifikasi baterai yang umum digunakan antara lain berkapasitas 100 Ah dengan tegangan 12 V atau 24 Vdc, serta memiliki efisiensi sekitar 80%.

Jenis-Jenis Baterai untuk PLTS

1. Baterai Timbal-Asam (Lead-Acid)

Baterai timbal-asam merupakan salah satu tipe baterai yang paling banyak diadopsi dalam sistem PLTS. Konstruksinya terdiri dari pelat-pelat timbal yang direndam dalam larutan elektrolit asam sulfat. Keunggulan utama dari baterai ini adalah harganya yang lebih ekonomis dibandingkan dengan teknologi baterai lainnya. Selain itu, baterai timbal-asam juga dikenal memiliki tingkat keandalan yang teruji. Di sisi lain, baterai ini memiliki beberapa kekurangan, seperti bobotnya yang berat dan dimensinya yang relatif besar. Baterai ini juga memerlukan perawatan berkala, salah satunya adalah menambahkan air aki yang menguap selama proses pengisian. Kelemahan lainnya adalah siklus pakainya yang cenderung lebih pendek.

2. Baterai Lithium-Ion

Baterai lithium-ion semakin populer dan menjadi pilihan utama dalam sistem PLTS modern. Teknologi ini dikenal memiliki kepadatan energi yang tinggi, sehingga ukurannya lebih ringkas dan ringan, serta mampu menyimpan energi dengan sangat efisien. Baterai jenis ini tidak memerlukan perawatan rumit dan pada umumnya memiliki umur siklus yang lebih panjang. Kekurangan utama baterai lithium-ion adalah biaya investasinya yang relatif tinggi. Namun, biaya awal ini dapat terkompensasi oleh masa pakainya yang lebih lama dan performanya yang unggul. Perlu diperhatikan pula bahwa proses pengisian dayanya harus dilakukan dengan cermat, karena kesalahan dalam pengisian berpotensi menyebabkan kerusakan permanen.

3. Baterai GEL

Baterai GEL termasuk dalam kategori baterai timbal-asam, namun dengan elektrolit yang diubah menjadi bentuk gel. Tipe ini menjadi pilihan populer karena faktor keamanannya yang lebih tinggi; elektrolit berbentuk gel tidak mudah tumpah atau bocor. Dibandingkan dengan baterai timbal-asam konvensional, baterai GEL menawarkan umur siklus yang lebih panjang. Akan tetapi, harganya biasanya lebih mahal dan memerlukan proses pengisian yang lebih hati-hati. Dari segi efisiensi, baterai GEL sedikit lebih rendah jika dibandingkan dengan baterai lithium-ion.

4. Baterai AGM (Absorbent Glass Mat)

Baterai AGM juga merupakan varian dari baterai timbal-asam. Pada tipe ini, elektrolit diserap oleh separator berupa anyaman serat kaca (glass mat). Baterai AGM terkenal karena ketahanannya terhadap guncangan dan getaran, sehingga sangat cocok untuk aplikasi bergerak seperti pada kapal atau rumah mobil (caravan). Keunggulan lainnya adalah efisiensi dan kecepatan pengisiannya yang lebih baik. Sama seperti baterai GEL, baterai AGM juga bebas perawatan.

5. Baterai Natrium-Sulfur (NaS)

Baterai natrium-sulfur menggunakan natrium dan belerang sebagai material aktifnya. Tipe baterai ini memiliki kapasitas energi yang tinggi dan efisiensi pengisian yang baik. Namun demikian, baterai NaS beroperasi pada suhu yang sangat tinggi dan memerlukan proses pemanasan terlebih dahulu sebelum dapat digunakan. Kondisi ini dapat mengurangi efisiensi sistem secara keseluruhan. Selain itu, baterai ini cenderung mahal dan rentan mengalami penurunan kualitas (degradasi) seiring pemakaian jangka panjang.



Gambar 2. 11 Baterai

2.2 Penelitian yang Relevan

Pada penelitian ini penulis melakukan tinjauan literatur pada beberapa penelitian yang relevan untuk dijadikan referensi. Referensi dapat berasal dari jurnal, artikel, skripsi, atau buku yang relevan. Beberapa referensi yang penulis dapatkan sebagai berikut :

1. Menurut Andi Makkulau. 2020, dalam jurnal yang berjudul “Karakteristik Temperatur Pada Permukaan Sel Surya Polycrystalline Terhadap Efektifitas Daya Keluaran Pembangkit Listrik Tenaga Surya” menyatakan bahwa hubungan terbalik antara suhu dan daya keluaran pada panel surya polikristalin, di mana kenaikan suhu menyebabkan penurunan daya, sedangkan penurunan suhu menghasilkan peningkatan daya. [2]
2. Menurut Retno Aita Diantari. 2020, dalam jurnal yang berjudul “ Analisis Instalasi Listrik Menggunakan Pembangkit Listrik Surya Skala Rumah Tangga” menyatakan bahwa durasi operasi PLTS skala rumah tangga dalam menyuplai listrik secara

langsung dipengaruhi oleh besarnya beban yang terpasang. Apabila daya yang dibutuhkan oleh beban rendah, maka sistem PLTS akan mampu beroperasi menyuplai listrik dalam jangka waktu yang lebih lama. Sebaliknya, jika daya yang dibutuhkan beban tinggi, waktu operasi PLTS untuk dapat menyuplai listrik tersebut akan menjadi lebih singkat. [3]

3. Menurut Nurmiati Pasra. 2021, dalam jurnal yang berjudul “ Efisiensi Panel Surya Kapasitas 100 Wp Akibat Pengaruh Suhu Dan Kecepatan Angin” menyatakan bahwa berdasarkan analisis perhitungan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa panel surya jenis monokristalin memiliki performa efisiensi yang lebih unggul dibandingkan dengan panel jenis polikristalin. Dari segi nilai efisiensi, panel monokristalin lebih sesuai untuk dikembangkan dengan nilai efisiensi rata-rata sebesar 24,35%, sementara panel polikristalin memiliki nilai efisiensi rata-rata sebesar 21,12%. Selanjutnya, mengenai pengaruh kecepatan angin terhadap efisiensi panel surya yang telah dianalisis menggunakan metode regresi linear, menunjukkan nilai koefisien korelasi (R) = 0,0281. Nilai ini mengindikasikan bahwa kontribusi kecepatan angin terhadap variasi efisiensi panel surya hanya sekitar 2,81%. [4]
4. Menurut Samsurizal. 2018, dalam jurnal yang berjudul “ Analisis Pengaruh Sudut Kemiringan Terhadap Arus Keluaran Pada *Photovoltaic* Dengan Menggunakan Regretion Quadraticmethod” menyatakan bahwa berdasarkan hasil pengukuran, sudut kemiringan panel surya yang menghasilkan arus keluaran tertinggi tercapai pada posisi 30°, 35°, dan 40°. Melalui penerapan metode regresi kuadratik, diperoleh sudut optimum peletakan panel surya untuk menangkap radiasi matahari yaitu sebesar 36,7°. Dengan menggunakan pendekatan regresi polinomial kuadratik ini, nilai arus keluaran maksimum yang berhasil dicapai adalah sebesar 1,99 Ampere pada sudut optimum tersebut. [5]
5. Menurut Sony Sumaryo. 2021, dalam jurnal yang berjudul “Implementasi Modul Penyimpanan Energi Ganda untukSolar Home System” menyatakan bahwa Berdasarkan hasil analisis, implementasi algoritma MPPT (Maximum Power Point Tracking) jenis Perturb and Observe (P&O) terbukti mampu meningkatkan daya keluaran sebesar 10,4% apabila dibandingkan dengan sistem yang tidak

menggunakan algoritma MPPT. Pada sistem modul penyimpanan ganda, tercatat dapat menghasilkan energi sebesar 95,84 Wh yang tersimpan dalam baterai, sekaligus mampu menyimpan energi potensial air dengan volume 1.030 liter. Namun terdapat tantangan dalam sistem ini berupa terjadinya rugi-rugi daya. Hal ini disebabkan oleh arus yang dihasilkan sel surya terbagi untuk mengisi baterai dan mengoperasikan pompa secara bersamaan, sehingga baik baterai maupun pompa tidak dapat bekerja pada kondisi optimalnya. [6]

6. Menurut Tony Koerniawan. 2025, dalam jurnal yang berjudul “Pengaruh Efektivitas Panel Surya 20 WP terhadap Polutan dengan Monitoring IoT” menyatakan bahwa berdasarkan hasil tersebut, disarankan agar pemeliharaan rutin panel surya dilakukan secara berkala, terutama pada area dengan potensi paparan polutan tinggi. Pembersihan panel dari debu, jelaga, maupun polutan basah dapat memperpanjang umur pakai dan menjaga kinerja optimal. Selain itu, pengembangan sistem monitoring berbasis IoT dapat terus ditingkatkan dengan menambahkan fitur notifikasi otomatis ketika terjadi penurunan performa signifikan, sehingga operator dapat segera melakukan tindakan korektif untuk menghindari kerugian energi yang lebih besar. [7]

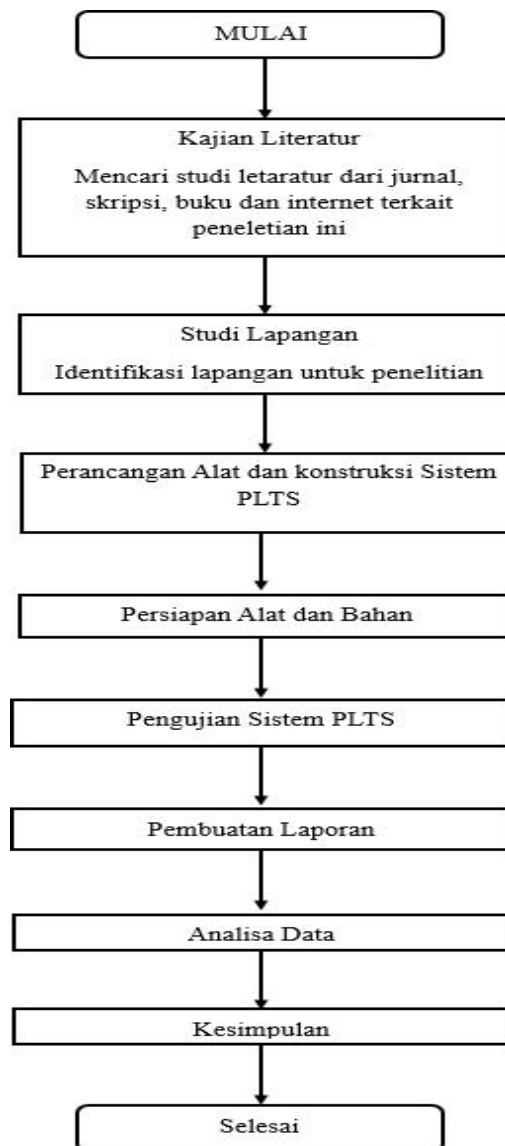
2.3 Kerangka Pemikiran

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh potensi energi matahari yang melimpah di Indonesia, khususnya di wilayah tropis seperti Kabupaten Jember dengan radiasi rata-rata 4.2 kWh/m^2 , yang belum dimanfaatkan secara optimal pada skala rumah tangga. Tingginya ketergantungan masyarakat terhadap pasokan listrik PLN serta fluktuasi beban listrik rumah tangga mendorong perlunya sistem penyediaan energi yang handal dan efisien. Oleh karena itu, penelitian ini berupaya merancang dan membangun sistem PLTS hybrid yang terintegrasi dengan kontrol ATS untuk menjamin kontinuitas pasokan listrik serta mengoptimalkan pemanfaatan energi surya pada kapasitas rumah tangga 900 VA.

Berdasarkan tinjauan pustaka, sistem PLTS hybrid dipilih karena mampu menggabungkan keunggulan sistem on-grid dan off-grid, yaitu terhubung dengan jaringan PLN sekaligus memiliki penyimpanan energi pada baterai. Untuk mendukung fungsi tersebut, dirancang sebuah sistem yang terdiri dari panel surya 400 WP, baterai 200 AH, MPPT, inverter, serta rangkaian kontrol ATS yang melibatkan komponen seperti kontaktor, relay, time delay relay, dan digital timer. Rancangan ini bertujuan untuk memastikan peralihan sumber daya antara PLTS dan PLN dapat berjalan otomatis, baik dalam mode prioritas PLTS maupun PLN, sesuai dengan kondisi beban dan ketersediaan energi surya.

Implementasi rancangan dilakukan melalui tahap pemasangan fisik komponen, pengkabelan, dan integrasi sistem, diikuti dengan pengujian performa dalam kondisi operasional nyata. Pengujian difokuskan pada pengukuran parameter keluaran panel surya (tegangan dan arus), kemampuan pengisian baterai, serta keandalan proses switching oleh sistem ATS. Data yang diperoleh dari pengujian selanjutnya dianalisis untuk mengevaluasi efisiensi sistem, konsistensi pasokan daya, dan respons sistem terhadap variasi intensitas cahaya matahari serta perubahan beban.

Hasil pengujian dan pengukuran yang diperoleh dianalisis untuk mengevaluasi kinerja sistem, termasuk efisiensi panel surya, keandalan proses peralihan sumber daya oleh ATS, serta kapasitas penyimpanan baterai. Analisis ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai efektivitas sistem hybrid yang dibangun dalam memenuhi kebutuhan energi rumah tangga, sekaligus menjadi dasar rekomendasi pengembangan lebih lanjut untuk aplikasi serupa. Dengan demikian, kerangka berpikir ini memberikan gambaran mengenai kinerja sistem PLTS hybrid skala rumah tangga, dan juga menghasilkan sebuah model rancangan yang dapat diadopsi dan direplikasi untuk aplikasi serupa di masyarakat. Evaluasi teknis yang dilakukan dapat menjadi panduan praktis dalam perencanaan dan implementasi PLTS hybrid, sekaligus memperkuat ketahanan energi mandiri di tingkat rumah tangga melalui pemanfaatan energi terbarukan.



Gambar 2. 1 Alur Kerangka Pemikiran