

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 PLTS/ Panel Surya (Modul Fotovoltaik / PV)

Panel surya merupakan perangkat yang berfungsi mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaiik. Panel ini tersusun dari beberapa sel surya berbahan semikonduktor (umumnya silikon) yang disusun seri dan paralel untuk menghasilkan tegangan dan arus tertentu. Panel surya digunakan sebagai sumber energi listrik DC (arus searah) yang ramah lingkungan dan dapat dimanfaatkan pada sistem kelistrikan skala kecil hingga besar.

2.1.2.1 PLTS Terpusat (Off-grid)

Suatu PLTS off-grid yang dikelola secara komunal atau yang sering disebut sistem PLTS berdiri sendiri (*stand-alone*), beroperasi secara independen tanpa terhubung dengan jaringan PLN.³ Sistem PLTS *off-grid* ini hanya mengandalkan energi matahari sebagai satu-satunya sumber energi utama dengan menggunakan rangkaian photovoltaic module untuk menghasilkan energi listrik sesuai kebutuhan. Sistem ini membutuhkan baterai untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan di siang hari untuk memenuhi kebutuhan listrik di malam hari.

Stand-alone PV system atau Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Terpusat (PLTS Terpusat) merupakan sistem pembangkit listrik alternatif untuk daerah-daerah terpencil/pedesaan yang tidak terjangkau oleh jaringan PLN.

2.1.2.2 PLTS Terinterkoneksi (On-Grid)

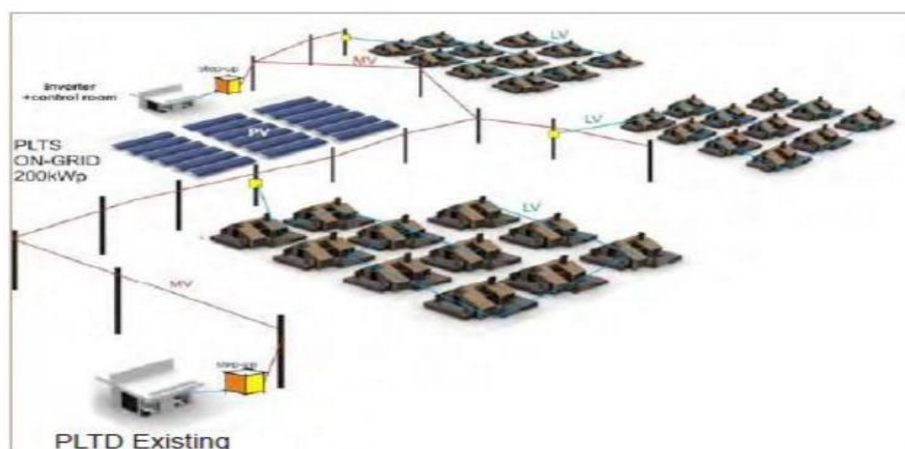
Grid Connected PV System atau PLTS terinterkoneksi merupakan solusi Green Energi bagi penduduk perkotaan baik perumahan ataupun perkantoran. Sistem ini menggunakan modul surya (*photovoltaic module*) untuk menghasilkan listrik yang ramah lingkungan dan bebas emisi. Dengan adanya sistem ini akan mengurangi tagihan listrik rumah tangga, dan memberikan nilai tambah pada pemiliknya. Sesuai namanya, *grid connected PV*, maka sistem ini akan tetap berhubungan dengan jaringan PLN dengan

mengoptimalkan pemanfaatan energi PV untuk menghasilkan energi listrik semaksimal mungkin.

2.1.2.3 PLTS Hybrid

Sistem hybrid yaitu sistem yang melibatkan 2 atau lebih sistem pembangkit listrik, umumnya sistem pembangkit yang banyak digunakan untuk hybrid adalah genset, PLTS, Mikrohidro, dan tenaga angin. Sehingga sistem hybrid bisa berarti PLTS-Genset, PLTS-Mikrohidro, PLTS-Tenaga Angin, dan lainnya. Di Indonesia sistem hybrid telah banyak digunakan, baik PLTS Genset, PLTS Mikrohidro, maupun PLTS tenaga angin-mikrohidro. Namun demikian *hybrid* PLTS-Genset yang paling banyak dipakai. Umumnya digunakan pada *captive genset/isolated grid (stand alone genset*, yakni genset yang tidak diinterkoneksi).

Tujuan dari Hybrid PV-Genset adalah mengkombinasikan keunggulan dari setiap pembangkit (dalam hal ini genset dan PLTS) sekaligus menutupi kelemahan masing-masing pembangkit untuk kondisi-kondisi tertentu, sehingga secara keseluruhan sistem dapat beroperasi lebih ekonomis dan efisien. Kombinasi Hybrid PV-Genset akan mengurangi jam operasi genset (misalnya dari 24 jam per hari menjadi hanya 4 jam per hari pada saat peak load saja) sehingga biaya operasi dan manajemen dapat lebih efisien, sementara PLTS digunakan untuk mencatu base load, sehingga tidak dibutuhkan investasi awal yang besar. Dengan demikian Hybrid PV-Genset akan dapat menghemat operasi dan management cost, mengurangi inefisiensi penggunaan genset, serta sekaligus menghindari kebutuhan investasi awal yang besar.



Gambar 2.1 Skema Hybrid Photovoltaic Power System

Produk Peralatan Kompak Daya menggunakan sistem *off-grid*, yaitu sistem kelistrikan yang tidak terhubung dengan jaringan listrik PLN (grid). Sistem ini dirancang untuk dapat beroperasi secara mandiri dengan memanfaatkan sumber energi terbarukan sebagai sumber utama pembangkitan listrik.

Pada sistem *off-grid* Peralatan Kompak Daya (SuperSUN), energi listrik dihasilkan dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang kemudian disimpan ke dalam *Battery Energy Storage System* (BESS). Energi yang tersimpan di baterai selanjutnya digunakan untuk menyuplai beban melalui inverter, baik pada siang maupun malam hari. Dengan konfigurasi ini, SuperSUN mampu menyediakan pasokan listrik yang kontinu meskipun tidak tersedia jaringan listrik utama.

Penerapan sistem *off-grid* pada Peralatan Kompak Daya sangat sesuai untuk wilayah 3T (Tertinggal, Terdepan, dan Terluar) yang memiliki keterbatasan infrastruktur kelistrikan. Selain meningkatkan akses energi listrik, sistem ini juga mendukung pemanfaatan energi bersih, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, serta meningkatkan kemandirian energi masyarakat setempat.



Gambar 2.2 Panel Surya 350 Wp

Berikut spesifikasi panel surya (PV) Peralatan Kompak Daya :

Karakteristik Kelistrikan

- Daya maksimal (P_{max}) : 350 Wp
- Toleransi daya : $\pm 3\%$
- Tegangan pada daya maksimal (V_{mp}) : 39,51 V
- Arus pada daya maksimal (I_{mp}) : 8,87 A
- Tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) : 48,33 V
- Arus hubung singkat (I_{sc}) : 9,55 A
- Tegangan maksimal sistem : 1500 VDC (maks)

Karakteristik Dimensi

- Panjang (A) : 990 mm
- Lebar (B) : 1960 mm
- Ketebalan (C) : 50 mm

Massa/Berat : 25,6 kg

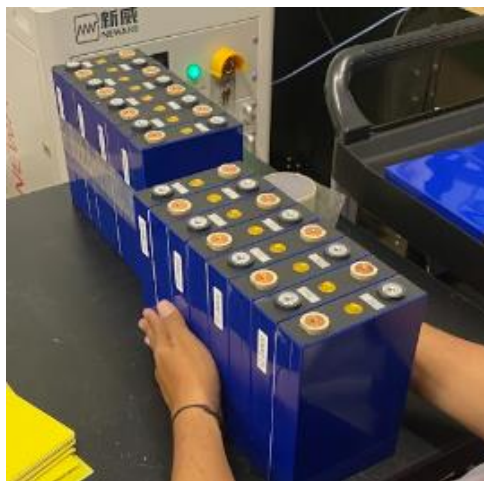
2.1.3 Battery Energi Storage System (BESS)

BESS (*Battery Energy Storage System*) adalah sistem penyimpanan energi listrik berbasis baterai yang berfungsi untuk menyimpan energi saat produksi berlebih dan menyalurkannya kembali ketika dibutuhkan. BESS menjadi komponen kunci pada sistem energi terbarukan seperti PLTS, terutama untuk aplikasi *off-grid* dan hybrid.

Battery Energy Storage System (BESS) banyak digunakan sebagai sumber penyedia/penyimpan energi baik untuk aplikasi bergerak seperti kendaraan listrik ataupun untuk aplikasi stasioner seperti peralatan telekomunikasi, data center, pembangkit listrik energi terbarukan, dan sistem kompleks seperti *smart microgrid*. Dalam operasinya, kinerja BESS dipengaruhi oleh siklus *charging/discharging*, profil beban, rangkaian baterai, dan keadaan lingkungan di sekitarnya. Berdasarkan kondisi ini, *battery management system* (BMS) yang dilengkapi sistem manajemen thermal menjadi bagian

yang sangat penting untuk menjaga kondisi operasi dan kinerja sistem baterai agar berada pada daerah kerja yang aman.

Pada sistem Peralatan Kompak Daya, baterai yang digunakan adalah *Battery Pack* berbasis *Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄)*. Jenis baterai ini dipilih karena memiliki tingkat keamanan tinggi, umur pakai yang panjang, stabilitas termal yang baik, serta efisiensi pengisian dan pengosongan yang tinggi, sehingga sangat sesuai untuk aplikasi sistem kelistrikan *off-grid* di wilayah 3T.



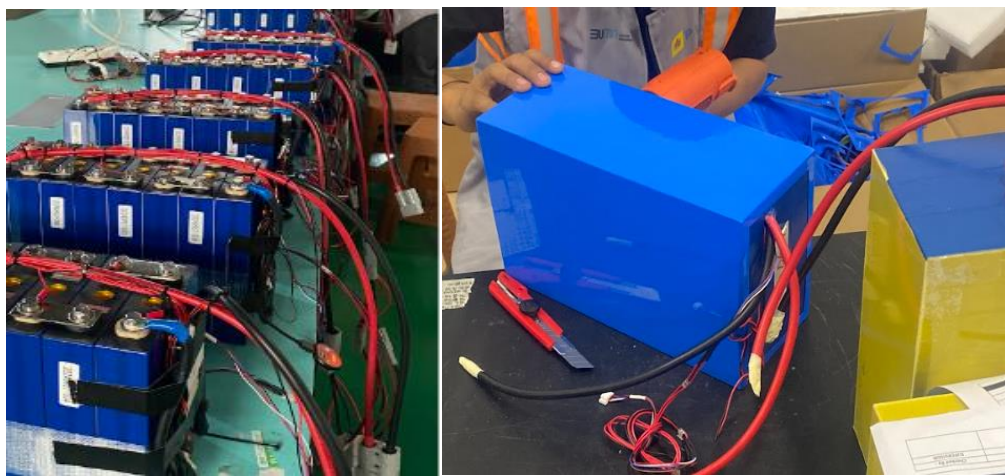
Gambar 2.3 Baterai Formasi 8 seri 1 paralel

Battery Pack peralatan Kompak Daya dirancang dengan konfigurasi 8 sel seri (8S1P) dengan tegangan nominal sekitar 25,2 V dan kapasitas 100 Ah. Setiap sel baterai memiliki tegangan nominal 3,2 V, sehingga menghasilkan tegangan kerja yang sesuai untuk sistem inverter dan beban peralatan Kompak Daya. Untuk menjaga keamanan dan keandalan operasi, battery pack ini dilengkapi dengan *Smart Battery Management System (BMS)* yang berfungsi memantau tegangan, arus, suhu, serta melakukan proteksi terhadap kondisi abnormal seperti *overcharge*, *overdischarge*, *overcurrent*, dan *short circuit sistem off-grid*.

Selain itu, baterai Kompak Daya juga dilengkapi dengan material pelindung berupa *epoxy fiberglass* dan *PVC heat shrink* yang berfungsi untuk melindungi sel baterai dari gangguan mekanis dan lingkungan. Dengan desain tersebut, baterai Peralatan Kompak Daya mampu mendukung operasi sistem secara andal, aman, dan berkelanjutan.

Secara keseluruhan, penggunaan baterai LiFePO_4 pada peralatan Kompak Daya menjadikan sistem ini mampu menyediakan pasokan listrik yang stabil, mandiri, dan ramah lingkungan, serta mendukung program elektrifikasi dan transisi energi di daerah terpencil.

Baterai Lithium Iron Phosphate Battery (LiFePO_4) berkapasitas 2200 mAh memiliki ukuran baterai yang lebih kecil dan berat baterai lebih ringan serta memiliki *Cycle (DOD, depth of discharge)* yang lebih tinggi daripada baterai pada umumnya.



Gambar 2.4 Spesifikasi *Baterai Lithium Iron Phosphate Battery (LiFePO_4)*

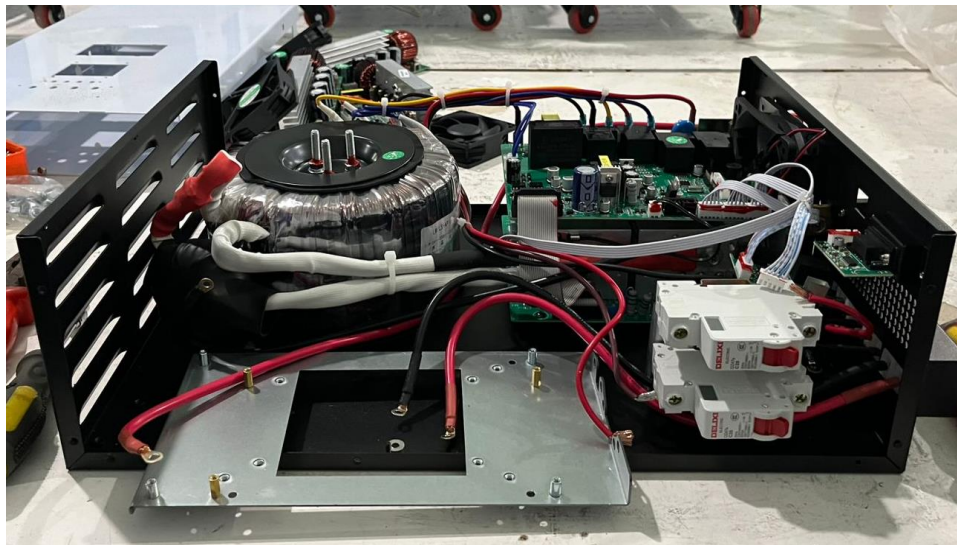
Spesifikasi *Battery Pack* Kompak Daya

- Jenis Baterai : *Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4)*
- Tipe Cell : *Prismatik Lithium Ferro Phosphate*
- Pabrikan Cell : Narada
- Konfigurasi Baterai : 8S1P (8 seri, 1 paralel)
- Jumlah Cell : 8 sel
- Tegangan Nominal Pack : 25,2 V
- Tegangan per Cell : 3,2 V
- Tegangan Minimum (*Low Voltage*) : 18 V
- Tegangan Maksimum (*Max Voltage*) : 29,2 V
- Kapasitas Baterai : 100 Ah

- Arus Discharge Maksimum : 1C
- Sistem Manajemen Baterai (BMS) : Smart BMS 8S 24V 100A
- Material Cover : *Epoxy Fiberglass + PVC Heat Shrink*

2.1.4 Sistem Konversi Daya atau Inverter

Sistem konversi daya atau inverter merupakan komponen penting dalam produk peralatan Kompak Daya yang berfungsi untuk mengubah energi listrik arus searah (DC) yang berasal dari baterai dan panel surya menjadi arus bolak-balik (AC) yang dapat digunakan oleh peralatan listrik rumah tangga dan fasilitas umum. Inverter yang digunakan pada sistem Kompak Daya adalah *Hybrid Inverter Low Frequency* dengan kemampuan menghasilkan gelombang sinus murni (*pure sine wave*). Jenis inverter ini dipilih karena memiliki tingkat keandalan tinggi, stabilitas tegangan yang baik, serta mampu melayani beban induktif maupun beban sensitif seperti peralatan elektronik.



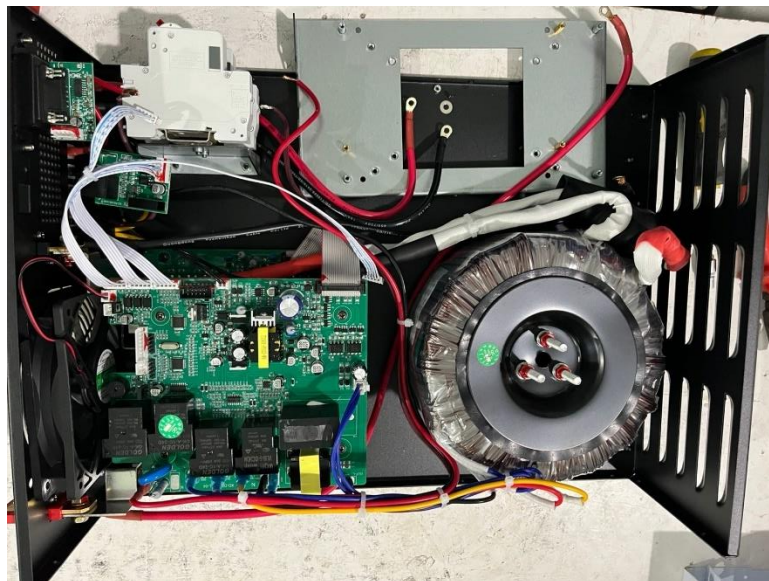
Gambar 2.5 Inverter Kompak Daya

Pada sistem Kompak Daya, inverter bekerja terintegrasi dengan *Battery Energy Storage System* (BESS) dan panel surya dalam konfigurasi *off-grid*. Energi listrik dari baterai dengan tegangan DC (sekitar 24–25 VDC) dikonversikan oleh inverter menjadi tegangan AC 220–230 VAC dengan frekuensi 50 Hz, sesuai dengan standar kelistrikan nasional. Dengan demikian, sistem dapat menyuplai beban listrik secara langsung tanpa ketergantungan pada jaringan PLN.

Selain fungsi konversi daya, inverter Kompak Daya juga dilengkapi dengan berbagai fitur proteksi, antara lain proteksi arus lebih (*over current*), beban lebih (*overload*), hubung singkat (*short circuit*), tegangan rendah baterai (*low voltage*), serta pembalikan polaritas baterai. Fitur-fitur ini bertujuan untuk menjaga keamanan sistem, melindungi peralatan, serta meningkatkan umur pakai inverter dan baterai.

Inverter Kompak Daya juga mendukung mode pengisian dari sumber AC eksternal, seperti PLN atau genset, sehingga memungkinkan pengisian baterai saat energi surya tidak mencukupi. Kemampuan ini menjadikan sistem lebih fleksibel dan andal dalam menghadapi berbagai kondisi operasional di lapangan.

Secara keseluruhan, sistem konversi daya pada Kompak Daya berperan sebagai penghubung utama antara sumber energi, sistem penyimpanan, dan beban, sehingga mampu memastikan pasokan listrik yang stabil, aman, dan berkelanjutan, khususnya untuk penerapan di wilayah 3T (Tertinggal, Terdepan, dan Terluar).



Gambar 2.6 Inverter Kompak Daya

Spesifikasi Inverter Hybrid

- Jenis : *Hybrid Inverter Low Frequency*
- Daya nominal : 1000 W
- Tegangan input AC : 230 VAC $\pm 10\%$
- Frekuensi : 50 Hz
- Bentuk gelombang output : *Pure Sine Wave*

- Tipe baterai : LFP / Gel
- Rentang tegangan input baterai : 21 – 21 VDC
- Waktu transfer relay : ± 20 ms (INV)
- Daya puncak (surge) : 2000 W (3 detik)

Fungsi proteksi :

- *Over Current (OC)*
- *Overload*
- *Short Circuit (SC)*
- *Low Voltage (LV)*
- *Battery Reverse Polarity (Fuse)*

Dimensi : 325 × 235 × 110 mm

2.1.5 SCC (Solar Charge Controller)

Solar Charge Controller (SCC) adalah perangkat elektronik yang berfungsi untuk mengatur dan mengendalikan aliran energi listrik dari panel surya menuju baterai, serta dari baterai ke beban (*load*). SCC merupakan komponen krusial dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), khususnya pada sistem *off-grid* dan *hybrid*.



Gambar 2.7 Solar Charge Controller

Tanpa SCC, baterai berisiko:

- *Overcharging* (pengisian berlebih)
- *Overdischarging* (pengosongan berlebih)
- Penurunan umur pakai
- Kerusakan permanen

Fungsi Utama Solar Charge Controller

1. Mengatur Proses Pengisian Baterai

SCC memastikan baterai diisi sesuai karakteristiknya dengan tahapan pengisian yang tepat, seperti:

- *Bulk charging* (pengisian awal cepat)
- *Absorption charging* (pengisian mendekati penuh)
- *Float charging* (menjaga baterai tetap penuh)

Hal ini mencegah baterai mengalami kerusakan akibat tegangan dan arus yang tidak terkendali.

2. Melindungi Baterai dari *Overcharge* dan *Overdischarge*

SCC secara otomatis:

- Menghentikan pengisian saat baterai penuh
- Memutus beban saat tegangan baterai terlalu rendah
- Fungsi ini sangat penting untuk menjaga kesehatan dan umur baterai.

3. Mengoptimalkan Pemanfaatan Energi Surya

Pada SCC tipe tertentu (MPPT), perangkat mampu:

- Menyesuaikan titik kerja panel surya agar menghasilkan daya maksimum
- Meningkatkan efisiensi sistem hingga 20–30% dibanding sistem tanpa kontrol optimal

4. Menjaga Stabilitas Sistem

SCC membantu menjaga:

- Tegangan sistem tetap stabil
- Distribusi energi ke beban berjalan aman
- Kinerja sistem tetap andal meskipun intensitas matahari berubah

2.1.6 Peralatan Proteksi

Peralatan proteksi adalah perangkat atau sistem pengaman yang digunakan dalam instalasi tenaga listrik untuk melindungi manusia, peralatan, dan sistem dari kondisi gangguan atau abnormal, seperti:

- a. Arus lebih (*overcurrent*)
- b. Hubung singkat (*short circuit*)
- c. Arus bocor ke tanah (*earth leakage*)
- d. Tegangan lebih (*overvoltage*)
- e. Tegangan rendah (*undervoltage*)
- f. Sambaran petir dan lonjakan tegangan

Tujuan utama peralatan proteksi adalah memutus atau membatasi gangguan secepat mungkin agar tidak menimbulkan kerusakan, kebakaran, atau bahaya keselamatan.

2.1.6.1 Surge Arrester

Surge arrester adalah peralatan proteksi listrik yang berfungsi untuk melindungi peralatan listrik dan elektronik dari lonjakan tegangan (*overvoltage*) yang bersifat sementara, baik akibat petir (*lightning surge*) maupun gangguan switching pada sistem tenaga listrik. *Surge arrester* bekerja dengan mengalihkan tegangan lebih ke tanah (*grounding*) sehingga tegangan yang masuk ke peralatan tetap berada pada batas aman.



Gambar 2.8 Surge Arrester

Prinsip kerja *surge arrester* adalah sebagai berikut: dalam kondisi normal, surge arrester memiliki impedansi yang sangat tinggi sehingga tidak mengalirkan arus ke tanah. Namun, saat terjadi lonjakan tegangan, impedansinya akan turun secara drastis sehingga arus lonjakan dialihkan ke sistem *grounding* dan tegangan dijepit (*clamped*) pada nilai yang aman. Setelah lonjakan tegangan berakhir, *surge arrester* kembali ke kondisi impedansi tinggi dan sistem dapat beroperasi kembali secara normal seperti semula.

Dalam sistem Kompak Daya berbasis baterai, surge arrester berperan penting dalam melindungi *Solar Charge Controller* (SCC), mengamankan inverter dan baterai, serta menjaga keandalan sistem monitoring dan IoT dari gangguan lonjakan tegangan. Keberadaan *surge arrester* sangat krusial terutama pada instalasi yang berada di daerah terbuka, wilayah rawan petir, dan area terpencil (3T), karena lokasi tersebut memiliki risiko lonjakan tegangan yang lebih tinggi akibat sambaran petir maupun gangguan lingkungan.

Kelebihan *surge arrester* antara lain memiliki respon yang cepat, memberikan proteksi yang efektif terhadap lonjakan tegangan, serta mudah dalam pemasangan. Namun, *surge arrester* juga memiliki keterbatasan, yaitu tidak mampu melindungi sistem dari arus lebih yang bersifat kontinu, memerlukan sistem grounding yang baik agar dapat bekerja optimal, serta memiliki umur pakai yang terbatas akibat degradasi komponen seiring waktu dan frekuensi gangguan.

2.1.6.2 RCBO (Residual Current Breaker with Overcurrent protection)

RCBO (*Residual Current Breaker with Overcurrent Protection*) adalah perangkat pengaman listrik yang menggabungkan dua fungsi proteksi utama dalam satu alat, yaitu proteksi terhadap arus bocor (*earth leakage atau residual current*) serta proteksi terhadap arus lebih dan hubung singkat (*overcurrent dan short circuit*). RCBO merupakan kombinasi dari RCCB (ELCB) dan MCB, sehingga mampu memberikan perlindungan yang menyeluruh pada satu jalur instalasi listrik.



Gambar 2.9 RCBO (*Residual Current Breaker with Overcurrent Protection*)

Prinsip kerja RCBO adalah sebagai berikut: dalam kondisi normal, arus yang masuk sama dengan arus yang keluar sehingga RCBO tetap berada pada kondisi ON. Ketika terjadi arus bocor, arus pada konduktor fasa tidak sama dengan arus pada konduktor netral, sehingga RCBO akan melakukan trip dalam waktu yang sangat singkat (dalam orde milidetik). Selain itu, saat terjadi beban lebih (*overload*) atau hubung singkat (*short circuit*) yang menyebabkan arus melebihi nilai rating, mekanisme proteksi termal dan magnetik pada RCBO akan bekerja untuk memutus rangkaian secara otomatis.

RCBO pada sistem Kompak Daya digunakan untuk memberikan proteksi pada jalur AC keluaran inverter, mengamankan beban rumah tangga, melindungi pengguna dari risiko sengatan listrik, serta mencegah terjadinya kebakaran akibat kebocoran arus. Perangkat ini sangat penting diterapkan pada sistem *off-grid*, sistem hybrid, serta instalasi yang menggunakan inverter dan baterai, karena kondisi tersebut memiliki potensi gangguan listrik yang lebih tinggi dan membutuhkan sistem proteksi yang andal.

Kelebihan RCBO antara lain mampu memberikan proteksi yang lengkap dalam satu perangkat, sehingga lebih hemat ruang pada panel listrik, memiliki respon yang cepat dan akurat terhadap gangguan, serta meningkatkan tingkat keselamatan pengguna. Namun demikian, RCBO juga memiliki beberapa keterbatasan, seperti harga yang relatif lebih mahal dibandingkan MCB, sensitivitas yang tinggi terhadap kualitas sistem *grounding*, serta kebutuhan pemilihan tipe yang tepat agar sesuai dengan karakteristik instalasi dan beban yang digunakan.

2.1.6.3 MCB (Miniature Circuit Breaker)

MCB (*Miniature Circuit Breaker*) adalah perangkat pengaman listrik yang berfungsi untuk melindungi instalasi listrik dan peralatan dari gangguan arus lebih (*overload*) dan hubung singkat (*short circuit*). MCB akan memutus aliran listrik secara otomatis ketika arus yang mengalir melebihi batas aman yang telah ditentukan. MCB banyak digunakan pada instalasi listrik rumah tangga, gedung, panel distribusi, serta sistem tenaga listrik skala kecil hingga menengah.

Fungsi utama MCB adalah melindungi kabel dan peralatan listrik dari panas berlebih akibat arus lebih, mencegah kerusakan pada instalasi listrik, serta mengurangi risiko terjadinya kebakaran listrik. Selain itu, MCB juga berfungsi sebagai pemutus dan penghubung rangkaian listrik secara manual, sehingga memudahkan proses pengamanan dan perawatan instalasi.



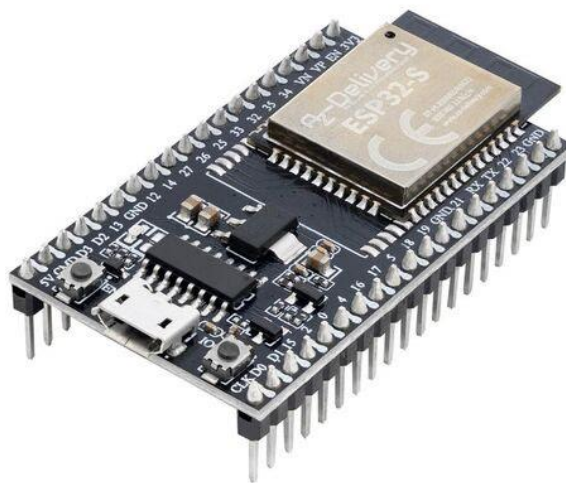
Gambar 2.10 MCB (*Miniature Circuit Breaker*)

Prinsip kerja MCB didasarkan pada dua mekanisme utama, yaitu mekanisme termal dan mekanisme magnetik. Mekanisme termal menggunakan elemen bimetal yang akan melengkung akibat panas saat terjadi beban lebih (*overload*) dan selanjutnya memutus kontak rangkaian. Sementara itu, mekanisme magnetik bekerja sangat cepat ketika terjadi hubung singkat (*short circuit*) dengan arus besar secara tiba-tiba melalui gaya elektromagnet. Kombinasi kedua mekanisme tersebut membuat MCB mampu merespons gangguan listrik secara cepat dan andal.

2.1.7 Mikrokontroler ESP32

ESP32 adalah sebuah mikrokontroler (*microcontroller unit/MCU*) yang dikembangkan oleh *Espressif Systems* dan dirancang khusus untuk aplikasi *Internet of Things* (IoT) serta sistem tertanam (*embedded system*). ESP32 mengintegrasikan kemampuan pemrosesan data, komunikasi nirkabel, dan antarmuka input–output dalam satu chip, sehingga sangat efisien untuk sistem monitoring dan kontrol berbasis digital.

Secara arsitektur, ESP32 menggunakan prosesor 32-bit berbasis *Xtensa* (*single-core* atau *dual-core*, tergantung varian) yang mampu bekerja hingga 240 MHz. Kemampuan pemrosesan ini memungkinkan ESP32 menangani berbagai tugas secara bersamaan, seperti pembacaan sensor, pengolahan data, dan pengiriman data ke server secara *real-time*. ESP32 juga dilengkapi memori RAM dan Flash yang cukup besar untuk mendukung aplikasi monitoring dan logging data.



Gambar 2.11 Mikrokontroler ESP32

Salah satu keunggulan utama ESP32 adalah fitur komunikasi nirkabel terintegrasi, yaitu *Wi-Fi (802.11 b/g/n)* dan *Bluetooth (Classic dan BLE)*. Dengan fitur ini, ESP32 dapat langsung terhubung ke jaringan internet atau perangkat lain tanpa memerlukan modul tambahan. Hal tersebut menjadikan ESP32 sangat cocok digunakan pada sistem monitoring energi, *dashboard* IoT, dan *smart device* seperti Modul Monitoring Kompak Daya.

Dari sisi antarmuka, ESP32 memiliki berbagai pin *input dan output (GPIO)* yang mendukung banyak protokol komunikasi, seperti *UART, SPI, I²C, PWM, ADC*, dan *DAC*. Fitur ini memungkinkan ESP32 terhubung dengan berbagai sensor, modul komunikasi (misalnya *LoRa*), RTC, GPS, relay, dan perangkat pendukung lainnya. Selain itu, ESP32 juga memiliki ADC internal yang dapat digunakan untuk membaca sinyal analog seperti tegangan dan arus.

ESP32 juga dikenal memiliki efisiensi daya yang baik, karena mendukung beberapa mode hemat energi seperti *sleep mode, deep sleep*, dan *hibernation*. Fitur ini sangat penting untuk aplikasi berbasis baterai, karena dapat memperpanjang umur pakai sistem dengan menurunkan konsumsi daya saat perangkat tidak aktif.

Dalam konteks sistem Kompak Daya dan modul monitoring, ESP32 berperan sebagai pusat kendali sistem. Mikrokontroler ini bertugas membaca data dari sensor kelistrikan dan baterai, mengolah serta memberi timestamp data (bersama RTC), lalu mengirimkan data tersebut ke server atau dashboard monitoring melalui jaringan IoT. Dengan kemampuan pemrosesan, komunikasi, dan efisiensi daya yang dimilikinya, ESP32 menjadi solusi yang andal dan ekonomis untuk membangun sistem monitoring energi yang modern dan terintegrasi.

2.1.8 PZEM-004T

PZEM-004 (sering disebut PZEM-04 atau PZEM-004T) adalah modul sensor pengukur parameter listrik AC yang digunakan untuk mengukur dan memantau tegangan, arus, daya aktif, dan energi listrik pada sistem satu fasa. Modul ini banyak digunakan pada aplikasi monitoring energi, smart meter, dan sistem IoT, termasuk pada sistem Peralatan Kompak Daya.

PZEM-004 bekerja dengan cara membaca tegangan AC secara langsung dari jalur listrik dan arus AC melalui *current transformer (CT)*. Dari nilai tegangan dan arus tersebut, modul ini menghitung daya aktif (Watt) serta mengakumulasi energi listrik (*Watt-hour/Wh*) yang digunakan oleh beban. Energi yang tercatat akan tetap tersimpan meskipun sistem mengalami pemadaman, sehingga cocok digunakan untuk pencatatan konsumsi energi.



Gambar 2.12 Modul sensor PZEM-004

Dalam sistem komunikasi, PZEM-004 menggunakan protokol *Modbus* RTU melalui antarmuka UART/TTL yang umumnya dikombinasikan dengan konverter RS-485 (MAX485). Dengan metode ini, data hasil pengukuran dapat dikirim secara stabil dan akurat ke mikrokontroler seperti ESP32 untuk diproses lebih lanjut dan dikirim ke sistem monitoring berbasis IoT.

Keunggulan utama PZEM-004 adalah kemudahan integrasi, akurasi pengukuran yang baik, serta kemampuan mengukur energi secara langsung tanpa memerlukan perhitungan manual. Modul ini juga memiliki rentang pengukuran yang cukup luas, sehingga dapat digunakan pada berbagai aplikasi kelistrikan rumah tangga maupun sistem energi terbarukan skala kecil.

Dalam konteks sistem Kompak Daya, PZEM-004 berperan sebagai sensor utama pencatat energi. Data yang dihasilkan menjadi dasar dalam pemantauan kinerja inverter, evaluasi konsumsi daya, serta pencatatan transaksi energi dalam satuan Wh. Dengan demikian, PZEM-004 mendukung penerapan sistem monitoring energi yang transparan, terukur, dan terintegrasi.

2.2 Penelitian yang Relevan

Pada penelitian ini, penulis melakukan beberapa tinjauan literatur pada penelitian yang relevan agar dapat dijadikan topik referensi. Referensi yang berasal dari jurnal, skripsi, artikel ataupun buku lain yang relevan. Beberapa jurnal yang dijadikan referensi penulis antara lain:

1. Kim et al. (2017) – Korea Selatan

Kim et al. (2017), *IoT-Based Monitoring System for Small-Scale Solar Power Plants* (2017) : meneliti sistem monitoring energi berbasis IoT pada pembangkit listrik tenaga surya skala kecil. Penelitian ini mengembangkan sistem pemantauan real-time untuk tegangan, arus, dan daya yang dapat diakses melalui platform web. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem IoT mampu meningkatkan keandalan pemantauan dan mempercepat proses evaluasi performa PLTS. Namun, penelitian ini belum membahas pencatatan transaksi energi dan penyimpanan data cadangan saat jaringan internet terputus.

2. Lopes et al. (2018) – Portugal

Lopes et al. (2018), *Energy Management of Battery Storage in Renewable Microgrids* (2018): mengkaji microgrid berbasis energi terbarukan yang dilengkapi dengan *Battery Energy Storage System* (BESS). Fokus penelitian ini adalah pengelolaan aliran energi dan efisiensi baterai dalam sistem *off-grid*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi BESS meningkatkan stabilitas sistem, tetapi belum mengintegrasikan sistem monitoring energi berbasis IoT dan pelacakan lokasi aset.

3. Ahmed et al. (2019) – Inggris

Ahmed et al. (2019), *Smart Energy Monitoring and Peer-to-Peer Energy Trading System* (2019): mengembangkan smart energy monitoring system untuk rumah tangga berbasis energi surya. Sistem ini mampu memantau konsumsi energi secara *real-time* dan mendukung konsep *peer-to-peer energy sharing*. Penelitian ini relevan dengan aspek transaksi energi, namun tidak membahas sistem cadangan data lokal serta penerapan di wilayah terpencil dengan keterbatasan jaringan.

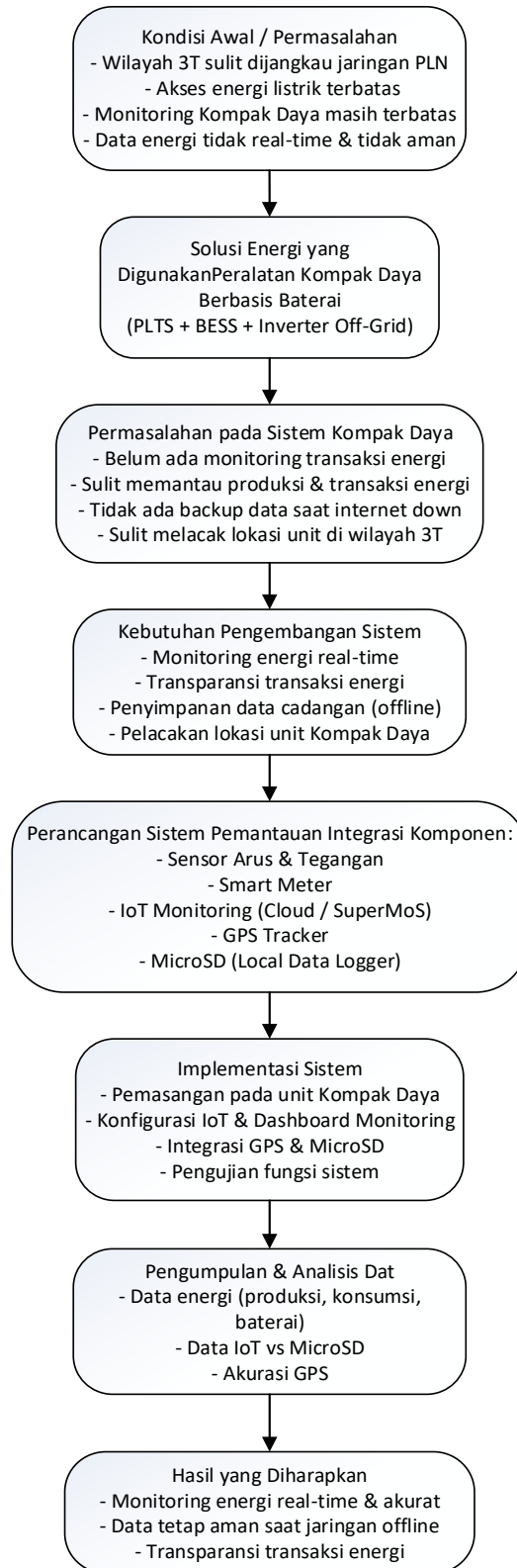
4. Zhang et al. (2020) – Tiongkok

Zhang et al. (2020), *Cloud-Based IoT Monitoring for Distributed Photovoltaic Systems* (2020): meneliti penerapan IoT dan *cloud computing* untuk monitoring PLTS terdistribusi. Sistem yang dikembangkan mampu menampilkan data performa energi secara terpusat dan *real-time*. Penelitian ini menekankan keunggulan integrasi cloud, tetapi belum mempertimbangkan penggunaan media penyimpanan lokal sebagai solusi saat terjadi gangguan komunikasi.

5. García et al. (2021) – Spanyol

García et al. (2021), *Smart Microgrid Implementation for Rural Electrification* (2021): meneliti sistem smart microgrid berbasis PLTS dan baterai untuk daerah pedesaan. Penelitian ini menyoroti pentingnya digitalisasi sistem monitoring guna meningkatkan transparansi dan efisiensi energi. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan keandalan sistem, namun belum mengintegrasikan fitur pelacakan lokasi (GPS) untuk pengawasan aset energi.

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2.13 Kerangka Pemikiran

Pemerataan akses energi listrik di wilayah 3T (Tertinggal, Terdepan, dan Terluar) masih menjadi tantangan utama dalam sistem ketenagalistrikan nasional akibat keterbatasan infrastruktur jaringan dan kondisi geografis yang sulit dijangkau. Untuk menjawab permasalahan tersebut, PT PLN (Persero) PUSHARLIS mengembangkan Peralatan Kompak Daya berbasis baterai yang mengintegrasikan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan *Battery Energy Storage System* (BESS) sebagai solusi penyediaan listrik mandiri (*off-grid*) yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Meskipun sistem peralatan Kompak Daya mampu menyediakan pasokan listrik secara mandiri, permasalahan baru muncul dalam aspek pemantauan energi, pencatatan transaksi energi, transparansi penggunaan daya, serta pengawasan aset di wilayah 3T (Tertinggal, Terdepan, dan Terluar) yang tersebar luas. Sistem konvensional yang masih bersifat manual dan menyebabkan keterbatasan dalam memantau performa sistem secara *real-time*, menyulitkan evaluasi efisiensi energi, serta berisiko kehilangan data ketika terjadi gangguan jaringan komunikasi.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini memandang perlu adanya pembaruan sistem Peralatan Kompak Daya melalui perancangan alat pemantauan transaksi energi digital yang terintegrasi. Sistem ini dirancang untuk memantau aliran energi mulai dari produksi energi PLTS sampai penyimpanan energi pada baterai, dengan menggunakan sensor arus dan tegangan yang terhubung ke modul *Internet of Things* (IoT). Data energi yang diperoleh dikirimkan ke platform monitoring berbasis *cloud* (SuperMoS) agar dapat diakses secara *real-time* oleh operator dan pemangku kepentingan.

Untuk meningkatkan keandalan dan kontinuitas data, sistem pemantauan ini dilengkapi dengan media penyimpanan *MicroSD* sebagai *local data logger*. *MicroSD* berfungsi sebagai cadangan data lokal yang merekam parameter penting seperti tegangan, arus, kapasitas baterai, dan riwayat transaksi energi ketika jaringan internet tidak tersedia. Data yang tersimpan kemudian dapat disinkronkan kembali ke sistem cloud saat koneksi jaringan kembali normal, sehingga kontinuitas pencatatan data tetap terjaga.

Selain itu, penelitian ini juga mengintegrasikan teknologi GPS (*Global Positioning System*) pada sistem peralatan Kompak Daya untuk mendukung pelacakan

lokasi unit secara akurat. Fitur ini berperan penting dalam pengawasan distribusi aset, pemetaan lokasi perangkat, serta mempermudah koordinasi pemeliharaan dan inspeksi teknis di wilayah 3T (Tertinggal, Terdepan, dan Terluar) yang memiliki akses terbatas.

Keseluruhan sistem yang terdiri dari PLTS, BESS, inverter, SCC, perangkat proteksi, *smart meter*, modul IoT, GPS, dan MicroSD dirancang untuk bekerja secara terintegrasi dalam satu arsitektur sistem pemantauan transaksi energi. Melalui integrasi ini, diharapkan sistem Kompak Daya tidak hanya mampu menyediakan listrik, tetapi juga mendukung transparansi transaksi energi, peningkatan efisiensi konversi energi, keandalan operasional, serta penerapan konsep *smart energy management* di tingkat komunitas dan rumah tangga.

Dengan demikian, kerangka pemikiran penelitian ini menempatkan permasalahan keterbatasan pemantauan dan pengelolaan energi sebagai dasar pengembangan sistem pemantauan transaksi energi berbasis IoT, GPS, dan *MicroSD*, yang selanjutnya dievaluasi melalui pengujian teknis, analisis efisiensi energi, akurasi data, serta dampak sosial dan operasional di wilayah 3T. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan keandalan sistem, namun belum mengintegrasikan fitur pelacakan lokasi (GPS) untuk pengawasan aset energi.