

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pada era industri 4.0 ini Indonesia masih bergantung pada sumber bahan bakar fosil termasuk untuk pembangkitan listrik yang kebanyakan menggunakan bahan bakar gas alam dan bahan bakar minyak bumi. Pemakaian bahan bakar fosil untuk pembangkitan listrik selama ini membuat ketersediaannya semakin sedikit dan dalam jangka waktu yang tak lama lagi pasti akan habis, padahal pembaharuan energi dari sumber bahan bakar fosil akan membutuhkan proses yang memakan waktu cukup lama. Oleh karena itu, pemerintah dan para akademisi merencanakan dan mempersiapkan peralihan energi mencari alternatif energi lain untuk menggantikan pembangkit listrik yang masih menggunakan bahan bakar fosil.

Salah satu solusi terbaik sebagai alternatif energi dari bahan bakar fosil adalah Energi Baru dan Terbarukan (dikenal dengan EBT) yang sangat potensial, dapat diperbaharui terus menerus dan sangat ramah lingkungan. EBT yang sangat potensial dan sesuai untuk iklim tropis Indonesia adalah energi matahari. Energi matahari memancarkan radiasinya ke bumi yang kemudian akan dikonversi menjadi energi listrik oleh panel surya sebagai modul pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Proses pembangkitan listrik dari PLTS juga tidak menimbulkan kebisingan dan pencemaran lingkungan serta biaya operasional yang lebih murah.

Pemerintah melalui BUMN yaitu PT Wijaya Karya Industri Energi dan PT Surya Utama Nuansa (SUN) Energy sedang gencar-gencarnya melakukan pembangunan PLTS On-Grid sebagai tahap awal riset dan pengenalan EBT sebagai alternatif pembangkit listrik yang menggunakan bahan bakar fosil. Berkat anugerah Tuhan, pengajuan proposal dari Universitas HKBP Nommensen Medan sebagai tempat untuk pembangunan PLTS On-Grid kepada BUMN PT Wijaya Karya Industri Energi (WIKA) dan PT SUN Energy diterima dengan baik sehingga WIKA dan SUN menjadi mitra UHN selama 25 tahun mendatang. Awalnya kapasitas yang direncanakan untuk dibangun adalah 1 MWp, tetapi

dikarenakan Peraturan Menteri ESDM Nomor 49 Tahun 2018 yang menyatakan bahwa kapasitas maksimum pemasangan PLTS On-Grid tidak harus 100% dari daya yang tersambung dari PLN. Sementara daya yang tersambung dari PLN di Universitas HKBP Nommensen Medan hanya sebesar 1200 KVA, sehingga kapasitas daya maksimum PLTS On- Grid yang dapat dibangun hanya 618.9 KWp. Pembangunan PLTS On-Grid di UHN dilaksanakan sejak awal bulan November 2021 hingga 17 Januari 2022 dan telah dilakukan commissioning selama 3 hari pada bulan Januari 2022.

Rampungnya pembangunan PLTS On-Grid memberikan kesempatan yang lebih besar kepada mahasiswa untuk melakukan riset dan penelitian untuk memperoleh data dan pengetahuan secara langsung di lapangan. Penulis masih awam dengan PLTS On-grid karena umumnya PLTS menggunakan baterai. Oleh karena itu, penulis tidak ingin menyia-nyiakan kesempatan tersebut untuk menjadi mahasiswa yang pertama melakukan penelitian dan riset di PLTS On-Grid Universitas HKBP Nommensen Medan dengan mengangkat kajian tentang “Studi Realisasi PLTS On-Grid di Universitas HKBP Nommensen Medan” sebagai judul Tugas Akhir untuk memenuhi syarat kelulusan sarjana Program Studi Teknik Elektro.

1.2. Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan diselesaikan pada penulisan ini adalah bagaimana analisis teknis dan realisasi perancangan pembangkit listrik tenaga surya yang dapat diaplikasikan untuk memenuhi sebagian kebutuhan listrik Universitas HKBP Nommensen Medan.

1.3. Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis realisasi perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) On-Grid yang dapat diaplikasikan untuk kebutuhan listrik Universitas HKBP Nommensen.

Adapun manfaat dari penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai referensi dan literatur untuk penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) On-Grid untuk meningkatkan sebuah keandalan dalam sistem distribusi listrik di suatu gedung.

1.4. Batasan Masalah

Pada penelitian ini permasalahan yang dibahas dibatasi dalam hal sebagai berikut:

- a. Pembahasan tentang perancangan PLTS On-Grid di Universitas HKBP Nommensen Medan pada faktor teknis.
- b. Pembahasan distribusi panel surya dan energi listrik yang diproduksi PLTS Universitas HKBP Nommensen Medan.
- c. Tidak membahas tentang sistem pentanahan (*Grounding*) PLTS On-Grid di Universitas HKBP Nommensen Medan.

1.5. Metodologi Penelitian

Metode penelitian yang akan dilakukan adalah dengan melakukan langkah-langkah sebagai berikut :

- a. Studi literatur
Studi literatur ialah pendekatan penelitian yang dilakukan dengan cara mencari referensi atas landasan teori yang relevan dengan kasus atau permasalahan yang ditemukan. Referensi tersebut bisa dicari dari buku, jurnal, artikel, laporan penelitian dan situs-situs online di internet. Output yang dihasilkan dari studi literatur ialah terkoleksinya referensi yang relevan dengan rumusan masalah.
- b. Observasi Lapangan
Melakukan Observasi Lapangan dengan pengamatan secara langsung ke lapangan. Analisis dan kesimpulan data sampai dengan penulisannya mempergunakan aspek pengukuran, perhitungan, rumus dan kepastian data numerik.
- c. Analisa dan pengujian
Analisa adalah aktivitas yang memuat sejumlah kegiatan seperti mengurai, membedakan, memilah sesuatu untuk digolongkan dan dikelompokkan kembali menurut kriteria tertentu kemudian dicari

kaitannya dan ditafsirkan maknanya, sedangkan pengujian merupakan percobaan untuk mengetahui mutu sesuatu (ketulenan, kecakapan, ketahanan dan sebagainya).

1.6. Kontribusi Penulisan

Dari hasil penulisan yang telah dilakukan diharapkan dapat memberikan kontribusi kepada:

- a. Mahasiswa Teknik Elektro
- b. Penelitian bidang energi baru dan terbarukan (EBT) terkhusus bidang PLTS.

1.7. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dari laporan penelitian ini diuraikan menjadi beberapa bagian:

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini membahas latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan manfaat penulisan, metodologi penulisan dan sistematika penulisan.

BAB II : LANDASAN TEORI

Bab ini membahas dasar-dasar teori mengenai penelitian ini, yaitu mengenai penelitian terkait sistem PLTS dan komponen PLTS

BAB III : METODOLOGI PENULISAN

Bab ini membahas langkah-langkah dalam menyelesaikan penelitian di mulai dari jenis penelitian, sumber data, tahapan metode penelitian, analisa hasil, kesimpulan dan saran serta jadwal penelitian.

BAB IV : ANALISA DAN HASIL

Bab ini membahas penyelesaian penelitian dimulai dari pembahasan, potensi energi surya, rancangan teknis PLTS, komponen sistem PLTS serta komponen pendukung sistem PLTS.

BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini membahas rangkuman penelitian dari BAB I hingga BAB V menjadi kesimpulan untuk penelitian selanjutnya terkait penelitian ini.

BAB II

LANDASAN TEORI

1. Pendahuluan

Peningkatan kebutuhan energi listrik nasional sangat pesat yaitu 8,65% per tahun. Sedangkan sumber energi primer nasional untuk pembangkitan listrik konvensional akan habis, contohnya cadangan batubara Indonesia tersisa 21,1 milyar ton yang diperkirakan akan habis dalam waktu 50 tahun apabila tidak dilakukan eksplorasi baru. Untuk mengatasi kebutuhan energi listrik yang pesat beberapa regulasi telah diterbitkan dan mulai direalisasikan pemerintah, seperti pemanfaatan sumber energi terbarukan berupa pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). Pengembangan dan pemanfaatan energi surya sangat menjanjikan bagi Indonesia, karena merupakan daerah tropis yang berada pada garis khatulistiwa dengan potensi iradiasi matahari rata-rata sebesar 4,8 kWh/m² per hari.

PLTS adalah suatu pembangkit listrik yang menggunakan sinar matahari melalui sel surya (*Photovoltaic*) untuk mengkonversikan radiasi elektromagnetik berupa gelombang dan sinar foton matahari menjadi energi listrik. Sel surya merupakan lapisan-lapisan tipis terbuat dari bahan semikonduktor silikon (Si) murni atau bahan semikonduktor lainnya, yang kemudian tersusun menjadi modul surya. PLTS memanfaatkan cahaya matahari untuk menghasilkan listrik DC yang dapat diubah menjadi listrik AC apabila diperlukan.

Pada umumnya PLTS terdiri atas beberapa komponen utama yaitu, generator sel surya (*PV generator*) yang merupakan susunan modul surya, inverter untuk mengkonversi arus DC menjadi arus AC baik sistem satu fasa atau tiga fasa untuk kapasitas besar, serta sistem kontrol dan monitoring operasi PLTS.

Berdasarkan lokasi pemasangannya sistem PLTS dibagi menjadi dua jenis yaitu, sistem pola tersebar (*distributed PV plant*) dan sistem terpusat (*centralized PV plant*). Berdasarkan aplikasi dan konfigurasinya, PLTS diklasifikasikan menjadi dua yaitu, sistem tidak terhubung jaringan (*off-grid PV plant*) atau dikenal dengan PLTS berdiri sendiri (*stand-alone*) dan sistem PLTS terhubung jaringan (*grid-connected PV plant*). Apabila dalam penggunaannya PLTS digabung dengan jenis pembangkit listrik lain maka disebut sistem hibrid.

Faktor utama yang mempengaruhi variasi produksi energi listrik PLTS adalah iradiasi matahari, temperatur modul surya dan *shading* yang terjadi selama waktu operasi. Iradiasi mempengaruhi arus listrik yang dihasilkan PLTS, temperatur modul mempengaruhi tegangan yang dihasilkan PLTS, sedangkan *shading* mempengaruhi iradiasi matahari yang diterima modul surya pada proses pembangkitan yang sekaligus berpengaruh terhadap unjuk kerja PLTS.

Performa PLTS jika dilihat berdasarkan alat ukur kWh meter sendiri sangat mudah untuk dianalisa, namun ketika tujuannya sebagai perbandingan kelayakan antara pembangkit-pembangkit tersendiri, tidak sesederhana itu. Pertama, iklim dari matahari berbeda dari satu lokasi dengan lokasi lainnya dan data cuaca tidak selalu dapat diperkirakan dengan tepat. Selanjutnya, energi terpasang real pada umumnya tidak diketahui secara persis akibat efek dari *shading* yang tidak diketahui, pemanasan berlebih dan ketersediaan jaringan. Tetapi standar persentasi performa PLTS sudah dikembangkan dari waktu ke waktu dan yang biasa digunakan pada umumnya untuk mengetahui keluaran energi dari suatu PLTS selama periode tahunan atau bulanan berdasarkan hal berikut:

- a. Performa spesifik dalam kWh bersih (*net kWh*) yang terkirim ke jaringan per kW dari daya nominal modul surya yang terpasang.
- b. Faktor kapasitas (*capacity factor*).
- c. Rasio performa bulanan dan tahunan.

2. Cahaya Matahari

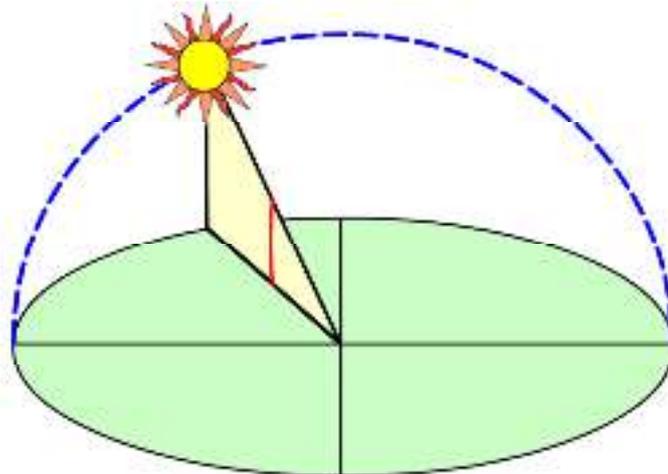
Matahari adalah sumber energi utama yang memancarkan energi yang luar biasa besar ke permukaan bumi. Saat cerah, permukaan bumi menerima energi matahari sekitar 1000 W/m^2 . Kurang dari 30% energi tersebut dipantulkan kembali ke angkasa, 47% dikonversikan menjadi panas, 23% digunakan untuk seluruh sirkulasi kerja yang ada di atas permukaan bumi, sebagian kecil 0,25% ditampung angin, gelombang dan arus, serta 0,025% disimpan melalui proses fotosintesis di dalam tumbuh-tumbuhan yang digunakan dalam proses pembentukan batubara dan minyak bumi (bahan bakar fosil, proses fotosintesis yang memakan jutaan tahun) yang saat ini digunakan secara ekstensif dan

eksploratif bukan hanya untuk bahan bakar tetapi juga untuk bahan pembuat plastik, formika, bahan sintesis lainnya. Sehingga bisa dikatakan bahwa sumber segala energi adalah energi matahari. Energi matahari dapat dimanfaatkan dengan sel surya (sel fotovoltaik) yang menjanjikan sebagai sumber energi listrik karena sel surya menyediakan energi listrik tanpa polusi, mudah dipindahkan, dekat dengan beban sehingga penyaluran energi sangat sederhana. Sebagai negara tropis, Indonesia mempunyai karakteristik cahaya matahari yang baik (intensitas cahaya tidak fluktuatif) dibanding tenaga angin. Sel surya relatif efisien, tidak ada pemeliharaan yang spesifik dan bisa mencapai umur yang panjang serta mempunyai keandalan yang tinggi.

Saat cuaca cerah, sel surya menghasilkan tegangan konstan sebesar 0.5 V sampai 0.7 V dengan arus sekitar 20 mA. Jumlah energi yang diterima akan optimal jika posisi sel surya 90° (tegak lurus) terhadap sinar matahari dan juga tergantung dari konstruksi sel surya itu sendiri. Artinya, sebuah sel surya akan menghasilkan daya $0.6 \text{ V} \times 20 \text{ mA} = 12 \text{ mW}$. Jika matahari memancarkan energinya ke permukaan bumi sebesar 1000 W/m^2 atau 100 mW/cm^2 , maka bisa dibayangkan energi yang dihasilkan sel surya yang rata-rata mempunyai luas 1 cm^2 dibandingkan bahan bakar fosil (BBM) dengan proses fotosintesis yang memakan waktu jutaan tahun.

Sudut Elevasi Matahari

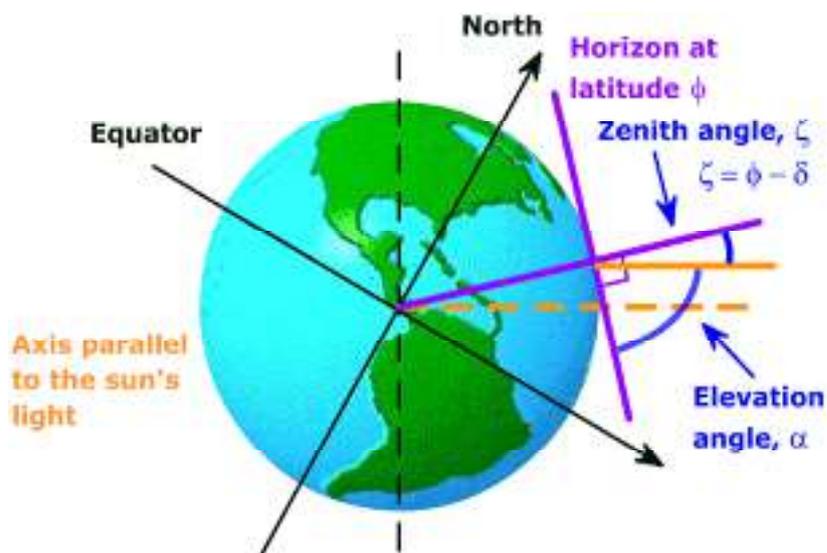
Sudut elevasi (sudut ketinggian) merupakan tinggi sudut matahari di langit yang diukur secara horizontal. Ketinggian dan elevasi juga digunakan untuk menjelaskan ketinggian dalam meter di atas permukaan laut. Elevasi adalah 0° saat matahari terbit dan 90° saat matahari tepat di atas kepala. Sudut elevasi bervariasi sepanjang hari tergantung pada garis lintang lokasi tertentu dan hari dalam setahun.



Gambar 2.1. Sudut Elevasi

Sudut Zenith Matahari

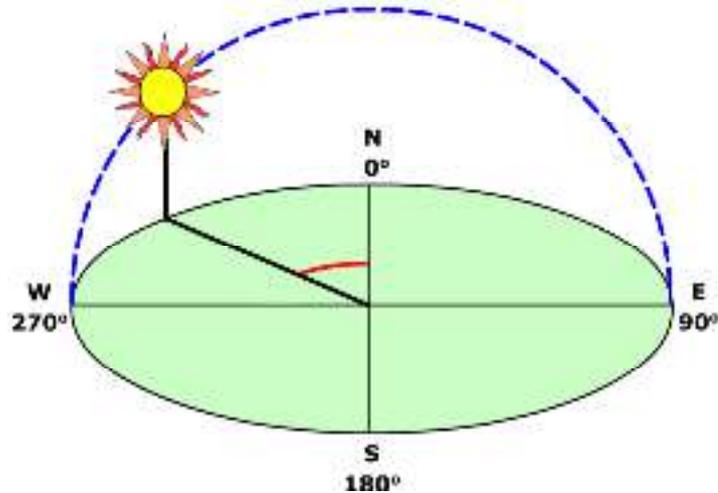
Ini adalah sudut antara matahari dan vertikal. Ini mirip dengan sudut elevasi tetapi diukur dari vertikal bukan horizontal. Oleh karena itu, sudut zenith adalah $90^\circ - \text{sudut elevasi}$.



Gambar 2.2. Sudut Elevasi dan Sudut Zenith

Sudut Azimut Matahari

Ini adalah arah kompas dari mana sinar matahari datang. Pada siang hari, matahari berada tepat di selatan di belahan bumi utara dan tepat di utara di belahan bumi selatan. Sudut azimut bervariasi sepanjang hari. Pada saat ekuinoks, matahari terbit langsung ke timur dan terbenam di barat terlepas dari garis lintangnya. Oleh karena itu, sudut azimut adalah 90° saat matahari terbit dan 270° saat matahari terbenam.



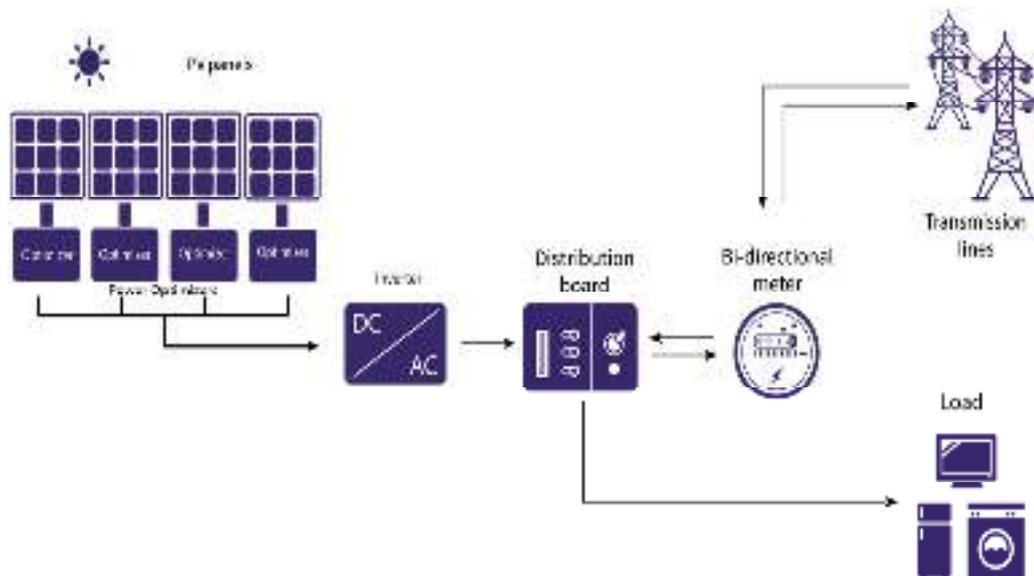
Gambar 2.3. Sudut Azimut

3. PLTS On-Grid

Grid Connected PV System atau PLTS On-Grid merupakan solusi energi yang ramah lingkungan bagi penduduk perkotaan, perumahan ataupun gedung 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 dan memberikan nilai tambah pada pemiliknya. Sesuai dengan namanya, PLTS On-Grid maka sistem ini akan tetap berhubungan dengan jaringan PLN dengan mengoptimalkan pemanfaatan energi PV untuk menghasilkan energi listrik semaksimal mungkin (ABB, 2010).

Prinsip kerja PLTS sistem on-grid pada umumnya dapat diuraikan sebagai berikut:

- a. Pada siang hari, modul surya yang terpasang akan mengkonversi sinar matahari menjadi energi listrik arus searah (DC). Selanjutnya komponen inverter merubah listrik arus DC tersebut dari PV menjadi listrik arus bolak-balik (AC) yang kemudian dapat digunakan untuk menyuplai listrik ke beban. Jadi pada siang hari, kebutuhan energi listrik disuplai langsung oleh modul surya. Ketika panel surya menghasilkan energi listrik yang berlebih dari kebutuhan, kelebihan listrik tersebut akan dikirim otomatis ke jaringan PLN sesuai peraturan.
- b. Pada malam hari atau jika kondisi cuaca mendung maka peralatan akan disuplai oleh jaringan PLN. Hal ini dimungkinkan karena sistem ini tetap terkoneksi dengan jaringan PLN.



Gambar 2.4. Prinsip Kerja PLTS On-Grid pada Umumnya

4. Panel Surya

Energi yang dikeluarkan oleh sinar matahari sebenarnya hanya diterima oleh permukaan bumi sebesar 69% dari total energi pancaran matahari. Suplai energi surya dari sinar matahari yang diterima oleh permukaan bumi sangat luar biasa besarnya yaitu mencapai 3×10^{24} Joule/tahun, energi ini setara dengan 2×10^{17} Watt. Jumlah energi sebesar itu setara dengan 10.000 kali konsumsi energi di seluruh dunia saat ini. Dengan kata lain, dengan menutup 0.1% saja permukaan bumi dengan perangkat solar sel yang memiliki efisiensi 10% sudah mampu untuk menutupi kebutuhan energi di seluruh dunia saat ini.

Cara kerja sel surya adalah dengan memanfaatkan teori cahaya sebagai partikel. Sebagaimana diketahui bahwa cahaya baik yang tampak maupun yang tidak tampak memiliki dua sifat yaitu sebagai gelombang dan sebagai partikel yang disebut dengan photon. Ini pertama kali diungkapkan oleh Einstein pada tahun 1905. Energi yang dipancarkan oleh sebuah cahaya dengan panjang gelombang λ dan frekuensi photon dirumuskan dengan persamaan:

$$E = h \frac{c}{\lambda} \dots \dots \dots (2.1)$$

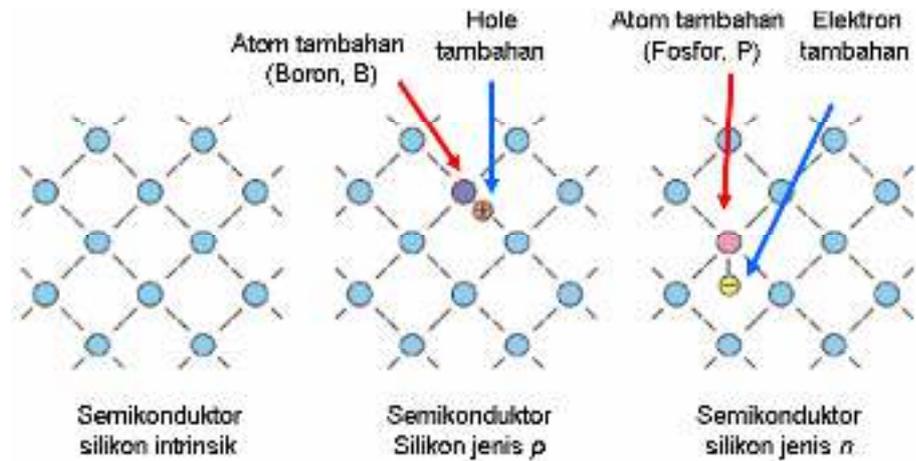
Dengan h adalah konstanta Plancks (6.62×10^{-34} J.s) dan c adalah kecepatan cahaya dalam vakum (3×10^8 m/s). Persamaan di atas juga menunjukkan bahwa photon dapat dilihat sebagai sebuah partikel energi atau sebagai gelombang dengan panjang gelombang dan frekuensi tertentu. Dengan menggunakan sebuah perangkat semikonduktor yang memiliki permukaan yang luas dan terdiri dari

rangkaian dioda tipe p dan n, cahaya yang datang akan mampu dirubah menjadi energi listrik.

Pada prinsipnya, sel surya identik dengan piranti semikonduktor dioda. Hanya saja saat ini strukturnya menjadi lebih rumit karena perancangannya yang lebih cermat untuk meningkatkan efisiensinya. Untuk penggunaan secara luas dalam bentuk arus AC masih diperlukan peralatan tambahan seperti inventer, baterai penyimpanan dan lain-lain. Kemajuan dari penelitian akan material semikonduktor sebagai bahan inti sel surya menjadi kunci bagi pengembangan teknologi ini. Dalam teknologi sel surya, terdapat berbagai pilihan penggunaan material intinya. *Mono-crystalline* sebagai pioner dari sel surya masih menjadi pilihan utama karena bisa mencapai efisiensi lebih dari 20% untuk skala riset. Sedangkan sel surya kristal silikon yang sudah diproduksi berefisiensi sekitar 12%. Namun, penggunaan material ini dalam bentuk lempengan masih tergolong mahal dan volume produksi lempeng silikon tidak dapat mencukupi kebutuhan pasar bila terjadi penggunaan sel surya secara massal. Sehingga untuk penggunaan secara massal harus mempertipis lapisan silikonnya dari ketebalan sel yang sekarang.

4.1. Proses Konversi

Proses konversi cahaya matahari menjadi listrik ini dimungkinkan karena bahan material yang menyusun sel surya berupa semikonduktor jenis n dan jenis p. Semikonduktor jenis n adalah semikonduktor yang memiliki kelebihan elektron, sehingga kelebihan muatan negatif ($n = \text{negatif}$). Sedangkan semikonduktor jenis p memiliki kelebihan hole, sehingga disebut dengan p ($p = \text{positif}$) karena kelebihan muatan positif. Dengan menambahkan unsur lain ke dalam semikonduktor, maka kita dapat mengontrol jenis semikonduktor tersebut, sebagaimana diilustrasikan pada gambar di bawah ini.



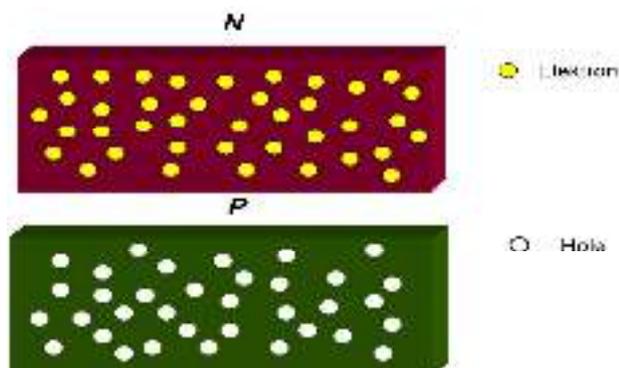
Gambar 2.5. Semikonduktor

Pembuatan dua jenis semikonduktor ini dimaksudkan untuk meningkatkan kemampuan daya hantar listrik dan panas semikonduktor alami yang diakibatkan oleh kelebihan elektron atau hole. Di dalam semikonduktor alami (semikonduktor intrinsik) ini, elektron maupun hole memiliki jumlah yang sama.

Semikonduktor intrinsik ialah silikon (Si) yang tidak mengandung unsur tambahan. Semikonduktor jenis p dibuat dengan menambahkan boron (B), aluminium (Al), gallium (Ga) atau Indium (In) ke Si yang akan menambah jumlah hole. Sedangkan semikonduktor jenis n dibuat dengan menambah unsur nitrogen (N), fosfor (P) atau arsen (As) ke dalam Si sehingga diperoleh tambahan elektron. Usaha menambahkan unsur tambahan ini disebut *doping* yang jumlahnya tidak lebih dari 1% dibandingkan dengan berat Si yang hendak di-*doping*.

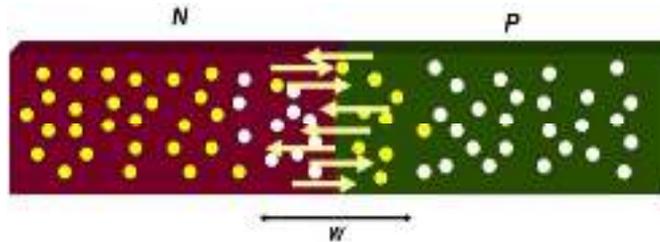
Semikonduktor n dan p jika disatukan akan membentuk sambungan p-n atau dioda p-n (sambungan metalurgi/*metallurgical junction*) yang dapat digambarkan sebagai berikut:

- a. Semikonduktor jenis p dan n sebelum disambung.



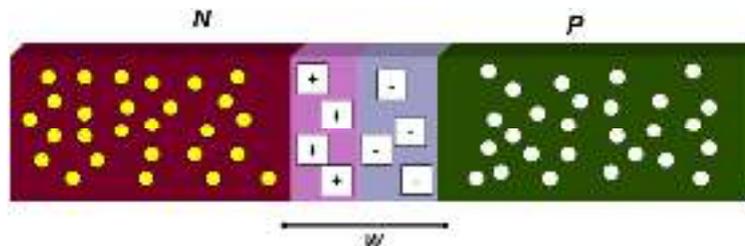
Gambar 2.6. Semikonduktor Jenis p dan n

- b. Sesaat setelah dua jenis semikonduktor ini disambung terjadi perpindahan elektron dari semikonduktor n menuju semikonduktor p dan perpindahan hole dari semikonduktor p menuju semikonduktor n. Perpindahan elektron maupun hole ini hanya sampai jarak tertentu dari batas sambungan awal.



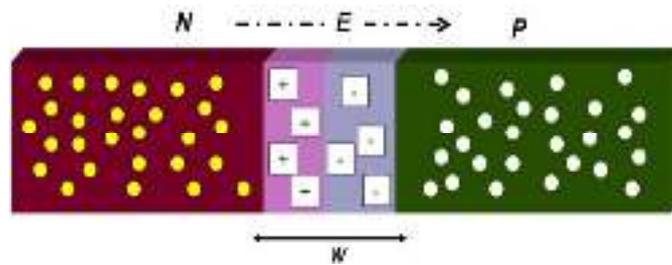
Gambar 2.7. Perpindahan Elektron dan Hole pada Semikonduktor

- c. Elektron dari semikonduktor n bersatu dengan hole pada semikonduktor p yang mengakibatkan jumlah hole pada semikonduktor p akan berkurang, daerah ini akhirnya berubah menjadi lebih bermuatan negatif. Pada saat yang sama hole dari semikonduktor p bersatu dengan elektron yang ada pada semikonduktor n mengakibatkan jumlah elektron di daerah ini berkurang, daerah ini akhirnya lebih bermuatan positif.
- d. Daerah negatif dan positif ini disebut dengan daerah deplesi (*depletion region*) ditandai dengan huruf W.



Gambar 2.8. Terbentuk Daerah Deplesi

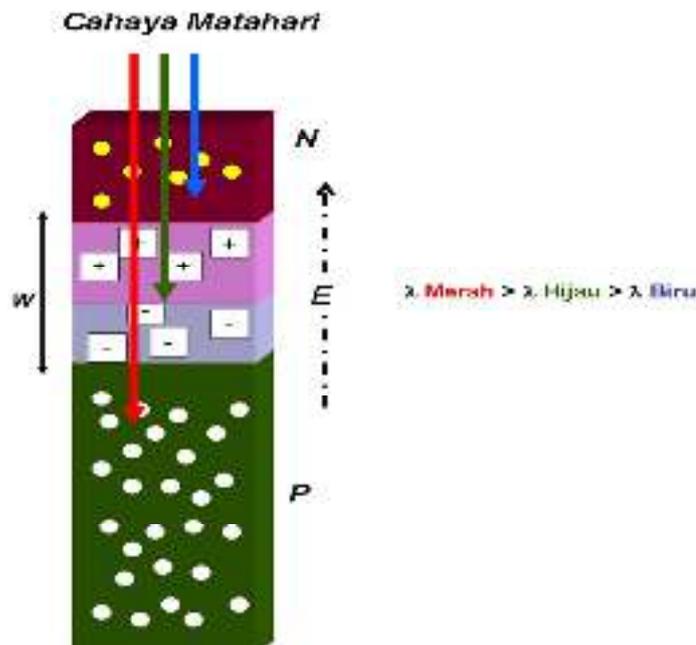
- e. Elektron maupun hole pada daerah deplesi disebut dengan pembawa muatan minoritas (*minority charge carriers*) karena keberadaannya pada jenis semikonduktor yang berbeda.
- f. Adanya perbedaan muatan positif dan negatif di daerah deplesi, maka timbul medan listrik internal (E) dari sisi positif ke sisi negatif yang mencoba menarik kembali hole ke semikonduktor p dan elektron ke semikonduktor n. Medan listrik ini cenderung berlawanan dengan perpindahan hole maupun elektron pada awal terjadinya daerah deplesi (nomor 1 di atas).



Gambar 2.9. Timbulnya Medan Listrik Internal (E)

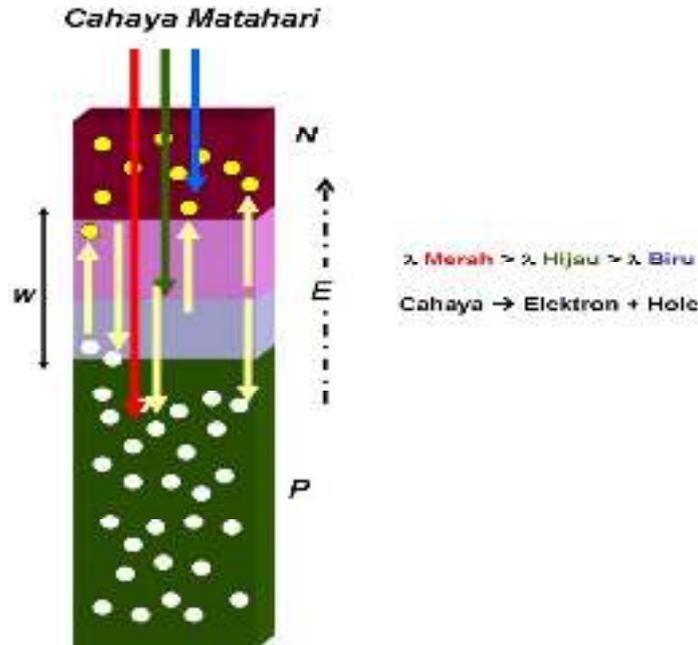
- g. Adanya medan listrik (E) mengakibatkan sambungan p-n berada pada titik setimbang dengan cara mencegah seluruh elektron dan hole berpindah dari semikonduktor yang satu ke semikonduktor yang lain. Jumlah hole yang berpindah dari semikonduktor p ke n dikompensasi sesuai dengan jumlah hole yang tertarik kembali ke arah semikonduktor p. Jumlah elektron yang berpindah dari semikonduktor n ke p dikompensasi dengan mengalirnya kembali elektron ke semikonduktor n akibat tarikan medan listrik (E).

Pada sambungan p-n inilah proses konversi cahaya matahari menjadi listrik terjadi. Pada sel surya, semikonduktor n berada pada lapisan atas sambungan p yang menghadap ke arah datangnya cahaya matahari dan dibuat jauh lebih tipis daripada semikonduktor p sehingga cahaya matahari yang jatuh ke permukaan sel surya dapat terus diserap dan masuk ke daerah deplesi dan semikonduktor p.



Gambar 2.10. Konversi Cahaya Matahari menjadi Listrik

Ketika sambungan semikonduktor ini terkena cahaya matahari, maka elektron mendapat energi dari cahaya matahari untuk melepaskan dirinya dari semikonduktor n, daerah deplesi maupun semikonduktor. Terlepasnya elektron ini mengakibatkan fotogenerasi elektron-hole (*electron-hole photogeneration*) yakni, proses terbentuknya pasangan elektron dan hole akibat cahaya matahari.

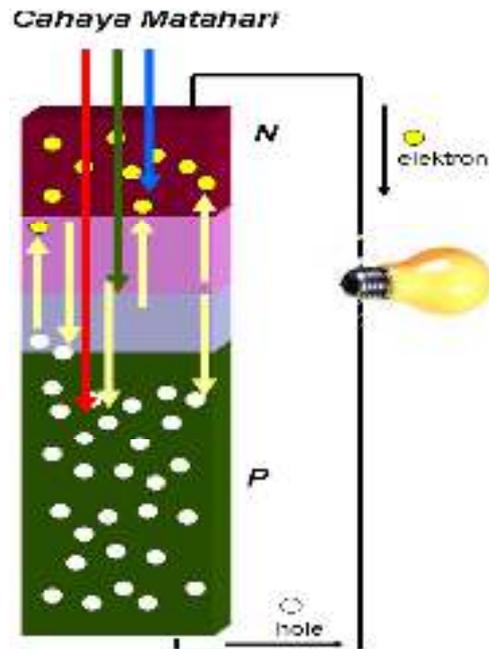


Gambar 2.11. Fotogenerasi *Electron-Hole*

Cahaya matahari dengan panjang gelombang (“lambda (λ)”) yang berbeda membuat fotogenerasi pada sambungan p-n berada pada bagian yang berbeda pula.

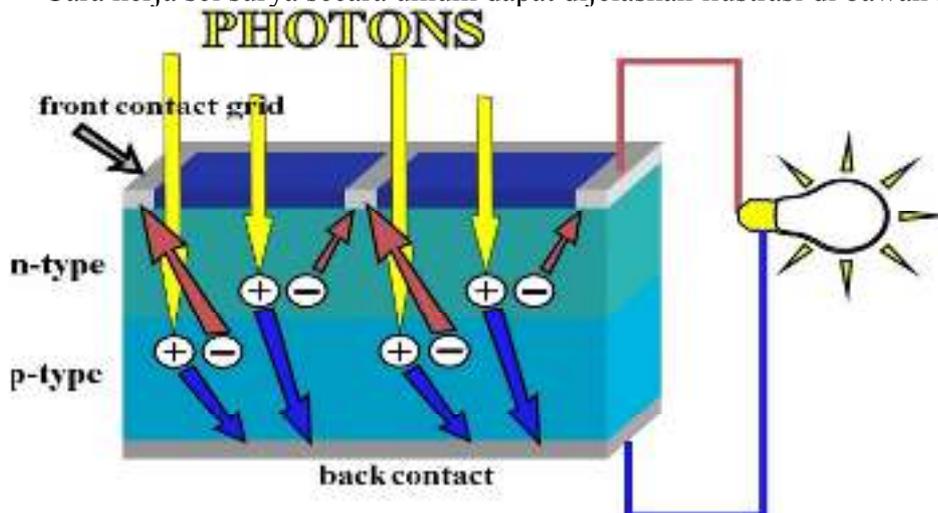
Spektrum merah dari cahaya matahari yang memiliki panjang gelombang lebih panjang menembus daerah deplesi hingga terserap di semikonduktor p yang akhirnya menghasilkan proses fotogenerasi disana. Spektrum biru dengan panjang gelombang yang jauh lebih pendek hanya terserap di daerah semikonduktor n. Pada sambungan p-n terdapat medan listrik (E), sehingga elektron hasil fotogenerasi tertarik ke arah semikonduktor n dan hole tertarik ke arah semikonduktor p.

Apabila rangkaian kabel dihubungkan ke dua bagian semikonduktor, maka elektron akan mengalir kabel. Jika sebuah lampu kecil dihubungkan ke kabel akan menyala dikarenakan mendapat arus listrik yang timbul akibat pergerakan elektron.



Gambar 2.12. Elektron Mengalir Melalui Kabel ke Lampu

Cara kerja sel surya secara umum dapat dijelaskan ilustrasi di bawah ini.



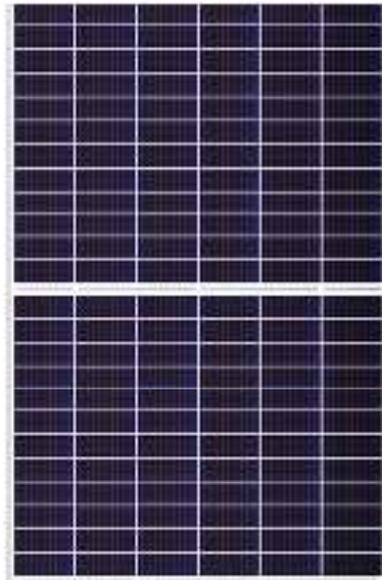
Gambar 2.13. Proses Konversi Cahaya Matahari menjadi Energi Listrik

4.2. Jenis-jenis Panel Surya

Tegangan listrik yang dihasilkan oleh sebuah sel surya sangat kecil, sekitar 0,6 V tanpa beban atau 0,45 V dengan beban. Untuk mendapatkan besar tegangan yang sesuai keinginan diperlukan beberapa sel surya disusun secara seri. Gabungan dari beberapa sel surya disebut panel/modul surya. Susunan sekitar 10-20 atau lebih panel surya menghasilkan arus dan tegangan tinggi yang cukup untuk kebutuhan sehari-hari. Berikut ini adalah jenis-jenis panel surya:

a) Monokristal (Mono-crystalline)

Merupakan panel paling efisien yang dihasilkan dengan teknologi terkini & menghasilkan daya listrik persatuan luas yang paling tinggi. Monokristal dirancang untuk yang memerlukan konsumsi listrik besar pada tempat beriklim ekstrem. Efisiensi panel ini sampai dengan 15%. Kelemahan dari panel ini adalah tidak berfungsi dengan baik apabila cahaya matahari kurang (teduh), efisiensinya akan turun drastis dalam cuaca berawan.



Gambar 2.14. Panel Surya *Mono-crystalline*

b) Polikristal (Poly-Crystalline)

Merupakan panel surya yang memiliki susunan kristal acak karena dibuat dengan proses pengecoran. Polikristal memerlukan permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan monokristal untuk menghasilkan daya listrik yang sama. Efisiensi polikristal lebih rendah dibandingkan monokristal sehingga harganya cenderung lebih murah.



Gambar 2.15. Panel Surya *Poly-crystalline*

c) Thin Film Photovoltaic

Merupakan panel surya terdiri dari lapisan tipis mikrokristal-silicon dan *amorphous* dengan efisiensi 8.5% sehingga diperlukan permukaan lebih besar daripada monokristal & polykristal untuk per watt daya yang dihasilkan. Inovasi terbaru adalah *Thin Film Triple Junction Photovoltaic* (dengan tiga lapisan) dapat berfungsi sangat efisien dalam udara yang sangat berawan dan dapat menghasilkan daya listrik sampai 45% lebih tinggi dari panel jenis lain dengan daya yang ditera setara.

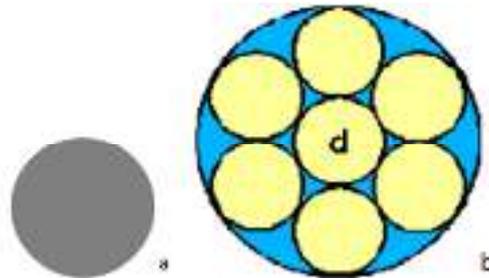


Gambar 2.16. Panel Surya *Thin Film Photovoltaic*

5. Kabel

Kabel terbuat dari bahan konduktor agar mudah menghantarkan listrik dari satu piranti ke piranti. Semakin besar ukuran diameter kabel, semakin mudah elektron mengalir sehingga penggunaan kabel tidak lepas dengan perhitungan ukuran diameter kabel yang akan digunakan.

Kabel dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu kabel solid dan kabel *stranded*. Kabel solid adalah kabel yang terbuat dari konduktor solid sepanjang kabel tersebut, sementara kabel *stranded* adalah kabel yang terbuat dari kabel-kabel solid yang lebih kecil (*strand*) dan digulung hingga membentuk satu kabel yang lebih besar. Kabel *stranded* memiliki keunggulan dalam hal fleksibilitas karena kabel jenis ini lebih mudah untuk ditekuk dan digulung daripada kabel solid.



Gambar 2.17. a) Kabel Solid dan (b) Kabel Stranded dengan 7 Strand

Ukuran diameter pada sebuah kabel dapat diukur dengan satuan panjang pada umumnya. Selain ukuran diameter, ukuran luas penampang melintang kabel juga dapat dihitung dengan satuan mils. Bentuk ukuran luas penampang kabel adalah lingkaran, sehingga satuannya disebut *circular mils*. Satu *circular mils* adalah luas penampang lingkaran yang diameternya 1/1.000 inch (Saputra, 2015).

Dalam penentuan perhitungan panjang kabel pada buku GSES dalam satu lokasi semua peralatan telah diperhitungkan untuk menentukan rute kabel. Rute kabel mencakup:

1. Dari PV array ke *junction box* dan *junction box* ke inverter, atau
2. Dari PV array langsung ke inverter dan
3. Inverter untuk switch board atau distribution board

Jarak kabel ini perlu diukur karena jarak akan digunakan untuk memilih ukuran kabel dan perhitungan kerugian system. Menurut (Srisadad, 2016) untuk menentukan ukuran kabel, menggunakan rumus:

$$q = \frac{L.N}{y.ev.E} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana: q = Ukuran penampang kabel (mm²)

L = Panjang kabel (m)

N = Daya (Watt)

y = Daya hantar jenis tembaga

ev = Drop tegangan (perkiraan losses kabel & terminal)
(V)

E = Tegangan yang melewati penghantar (V)

Jenis kebanyakan kabel yang tersedia di pasaran dapat digunakan untuk sistem panel surya. Acuan pemilihan kabel menurut standar GSES, yaitu:

1. Memiliki banyak inti
2. Memiliki lapisan yang tahan sinar UV dan tahan air
3. Pemilihan kapasitas tegangan dan arus maksimum kabel bergantung dari nilai dan jumlah string.

6. Inverter

Inverter merupakan suatu perangkat elektronik yang berfungsi untuk mengubah energi listrik DC menjadi energi listrik AC. Energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya adalah arus DC sehingga pada sistem PLTS dibutuhkan inverter untuk mengubah energi listrik dari panel tersebut agar dapat menyuplai kebutuhan energi listrik AC pada beban. Pemilihan inverter yang tepat untuk aplikasi tertentu, tergantung pada kebutuhan beban dan juga apakah inverter akan menjadi bagian dari sistem yang tersambung jaringan listrik PLN (On-Grid) atau sistem yang berdiri sendiri (Off-grid) (Wiyadinata, 2013).



Gambar 2.18. Inverter

Inverter mempunyai 4 fungsi yang mendasar, yaitu :

➤ Memaksimalkan daya

Panel surya memiliki titik daya maksimum saat keadaan tertentu. Inverter dilengkapi dengan *Maximum Power Point Trackers* (MPPT) terus mencari *sweet spot* dan memaksimalkan energi yang tersedia dari array surya.

➤ Konversi

Panel surya menghasilkan listrik arus searah (DC) dengan kebanyakan array surya menghasilkan 200-600 Volt DC sementara beban menggunakan listrik AC. Jadi, inverter akan mengubah listrik DC menjadi listrik AC.

➤ Regulasi

Karena sinar matahari, output matahari dan kondisi grid bervariasi, inverter akan mengatur dan menyinkronkan semua variabel ini sehingga kualitas daya sesuai spesifikasi dan panen daya dimaksimalkan. Regulasi juga mencakup pemantauan dan pemutusan inverter dan modul surya dari jaringan jika diperlukan untuk alasan keamanan atau lainnya.

➤ Pemantauan

Inverter mengukur dan menampilkan informasi, sehingga dapat diperiksa apakah sistemnya berkinerja seperti yang diharapkan atau mendiagnosis kesalahan jika terjadi. Ada banyak pilihan untuk mengakses data termasuk

layar tampilan pada inverter, web dan aplikasi berbasis ponsel pintar. Ini akan berupa ethernet atau terhubung secara nirkabel ke router.

Berdasarkan buku GSES untuk menentukan inverter yang sesuai dengan kebutuhan beban harus dilakukan perhitungan jumlah string yang diperlukan system serta susunan panel yang berdasarkan tegangan input inverter dan tegangan output dari panel surya. Secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\text{Jumlah string} = \frac{\text{Tegangan input inverter}}{\text{Tegangan PV}} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\text{Jumlah paralel} = \frac{\text{Jumlah panel surya}}{\text{Jumlah string}} \dots\dots\dots (2.4)$$

Inverter pada PLTS On-Grid dapat menghasilkan kembali tegangan yang sama besar dengan tegangan jaringan PLN pada waktu yang bersamaan dengan tujuan untuk mengoptimalkan dan memaksimalkan output energi listrik yang dihasilkan oleh modul surya.

7. Moulded Case Circuit Breaker (MCCB)

Moulded Case Circuit Breaker (MCCB) adalah suatu alat yang digunakan untuk membatasi arus sekaligus pengaman pada suatu instalasi listrik apabila terjadi kelebihan muatan listrik atau terjadi hubungan arus pendek. MCCB dapat menanggulangi *reverse current* serta *earth fault* dan juga biasa digunakan pada jalur yang memiliki arus cukup besar. Pemasangan MCCB sangat berguna untuk keadaan *maintenance* dimana komponen ini dapat mematikan satu jalur apabila ada kerusakan komponen yang harus diganti atau sekedar perawatan (Saputra, 2015).



Gambar 2.19. *Moulded Case Circuit Breaker* (MCCB)

Pada sistem PLTS, panel surya biasanya dipasang diantara PLTS dan inverter. Alat tersebut digunakan sebagai saklar penghubung dan pemutus yang harus dipasang pada arus DC. MCCB harus berupa *Single Pole* (SP), *Double Pole* (DP), *Triple Pole* (TP) atau *Four Pole* (4P) seperti ditentukan dalam spesifikasi. Kontruksi dan pengoperasian *circuit breaker* harus sedemikian rupa sehingga jika *fault* muncul, semua kutub *circuit breaker* harus beroperasi serentak untuk mengisolasi dan menghilangkan *fault* tersebut secara efisien dan aman tanpa resiko terhadap operator atau instalasi tersebut.

Menurut buku GSES, rangkaian pemutus yang biasa digunakan pada MCCB terdapat pada:

1. PV array tanpa pembumian dengan inverter berisolasi
2. PV array menggunakan pembumian dengan inverter berisolasi
3. PV array tanpa pembumian menunggunakan inverter tanpa isolasi.

Peletakan isolasi saklar manual harus dipasang diantara inverter dan jaringan listrik. Sisi pemasangan isolator terdapat pada perangkat metering PV di papan hubung dan haruslah mematuhi peraturan berikut:

- Akan terkunci pada saat posisi terbuka
- Berada di ketinggian 2.44 meter dari permukaan tanah
- Saat beban mati, tidak ada aliran listrik atau lebih baik mempunyai peralatan perlindungan

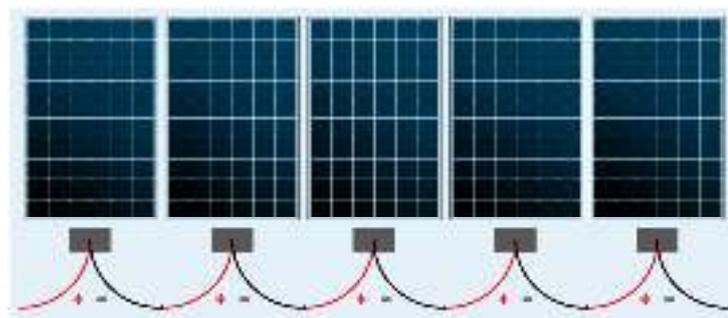
- Mematuhi semua spesifikasi lainnya sesuai kewenangan *Central Electricity* regulasi 2012.

Pemilihan MCCB sesuai dengan variabel yang menjadi acuan yang akan digunakan menurut standar GSES yaitu:

- Nilai untuk tegangan operasi sesuai perhitungan desain sistem tegangan.
- Nilai untuk arus operasi sesuai perhitungan tegangan desain sistem arus.

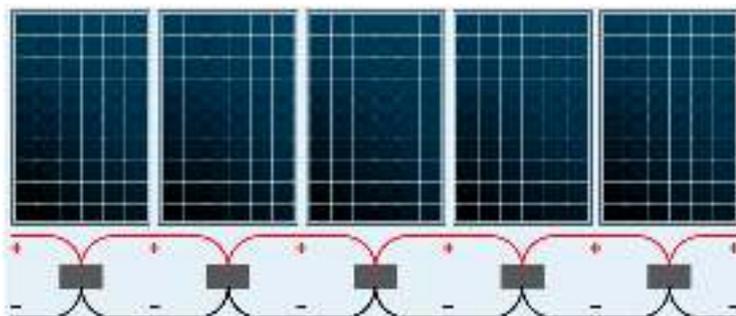
8. Rangkaian Seri-Paralel

Cara merangkai panel surya secara seri adalah dengan menghubungkan terminal positif dari satu panel surya ke terminal negatif dari panel surya yang lain. Apabila dua atau lebih panel dihubungkan seperti ini maka disebut sebagai *PV Source Circuit* (rangkaian sumber PV).



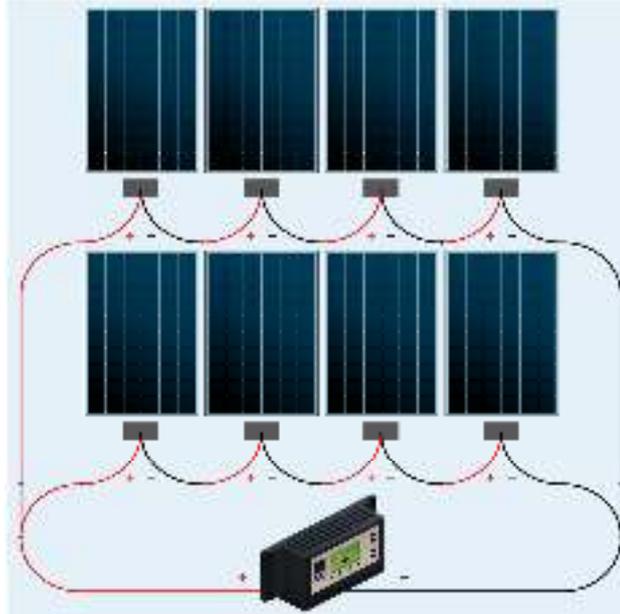
Gambar 2.20. Rangkaian Seri pada Panel Surya

Pada saat terminal positif dari satu panel dihubungkan ke terminal positif panel lain dan terminal negatif dari kedua panel dihubungkan bersama di dalam kotak penggabungan, maka rangkaian ini disebut hubungan paralel pada panel surya. Ketika beberapa panel dihubungkan secara paralel maka disebut *PV Output Circuit* (rangkaian keluaran PV).



Gambar 2.21. Rangkaian Paralel pada Panel Surya

Panel surya harus dihubungkan menggunakan kombinasi seri-paralel pada saat dihubungkan dengan string inverter, hal ini bertujuan untuk menyesuaikan arus dan tegangan operasional yang optimal pada inverter.



Gambar 2.22. Rangkaian Kombinasi Seri-Paralel pada Panel Surya

Secara umum hubungan pada rangkaian listrik digolongkan menjadi tiga, yaitu:

a. Hubungan Seri

Hubungan seri adalah rangkaian dengan komponen atau beban saling terhubung satu sama lain secara sejajar, maka rangkaian ini mengalirkan arus ke seluruh komponennya yang besarnya sama dengan arus sumber.



Gambar 2.23. Rangkaian Seri

Kirchoff Voltage Law (KVL): $\sum V = 0$

$$V_1 + V_2 + V_3 - V = 0 \dots\dots\dots (2.5)$$

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = iR_1 + iR_2 + iR_3 \dots\dots\dots (2.6)$$

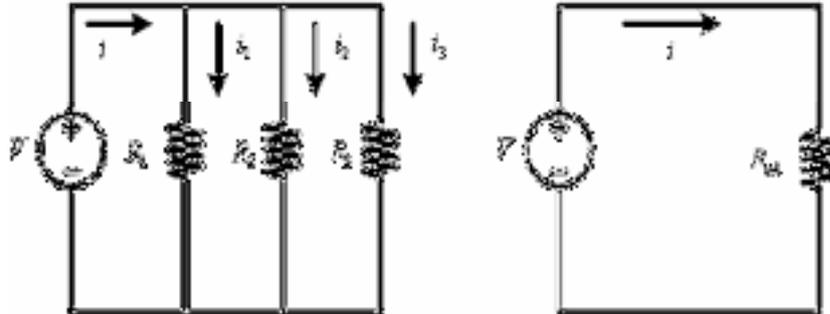
$$V = i(R_1 + R_2 + R_3) \dots\dots\dots (2.7)$$

$$\frac{V}{i} = R_1 + R_2 + R_3 \dots\dots\dots (2.8)$$

$$R_{ekivalen} = R_1 + R_2 + R_3 \dots\dots\dots (2.9)$$

b. Hubungan paralel

Merupakan rangkaian listrik yang hambatannya disusun bertingkat atau bercabang. Jika semua terminal terhubung dengan komponen lain, maka tegangan diantaranya akan sama besar dengan tegangan sumbernya.



Gambar 2.24. Rangkaian Paralel

Kirchoff Current Law (KCL) = $\sum i = 0$

$$i - i_1 - i_2 - i_3 = 0 \dots\dots\dots(2.10)$$

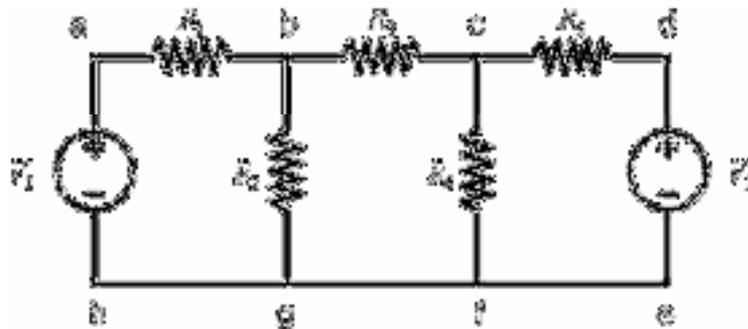
$$i = i_1 + i_2 + i_3 \dots\dots\dots(2.11)$$

$$\frac{V}{R_{ekivalen}} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3} \dots\dots\dots(2.12)$$

$$\frac{1}{R_{ekivalen}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \dots\dots\dots(2.13)$$

c. Hubungan Kombinasi Seri-Paralel

Hubungan kombinasi seri-paralel adalah rangkaian yang terdiri dari gabungan rangkaian seri dan rangkaian paralel.



Gambar 2.25. Rangkaian Kombinasi Seri-Paralel

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Pendahuluan

Metode penelitian yang digunakan adalah dengan melakukan penelitian terkait **Studi Realisasi PLTS On-Grid di Universitas HKBP Nommensen Medan** dan pengumpulan data secara langsung di UHN Medan pada Kamis, 24 Maret 2022 sampai Sabtu, 23 April 2022 yang meliputi hal-hal sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Langkah pertama yang dilakukan berupa studi literatur yang berguna mengetahui hasil penelitian yang didapat dari penelitian terdahulu yang bertujuan sebagai referensi atau bahan acuan dalam penelitian Pembangkit Listrik Tenaga Surya yang akan dikerjakan.

2. Pengambilan Data Lapangan

Kemudian pada tahap selanjutnya dilakukan pengambilan data secara langsung di lapangan. Pengambilan data dilakukan meliputi penyusunan panel surya dan string ke inverter, radiasi matahari dan energi listrik yang dapat dihasilkan oleh PLTS On-Grid di Universitas HKBP Nommensen Medan.

3. Perhitungan Data

Selanjutnya, melakukan perhitungan terhadap data radiasi matahari, spesifikasi panel surya dan energi listrik yang dihasilkan.

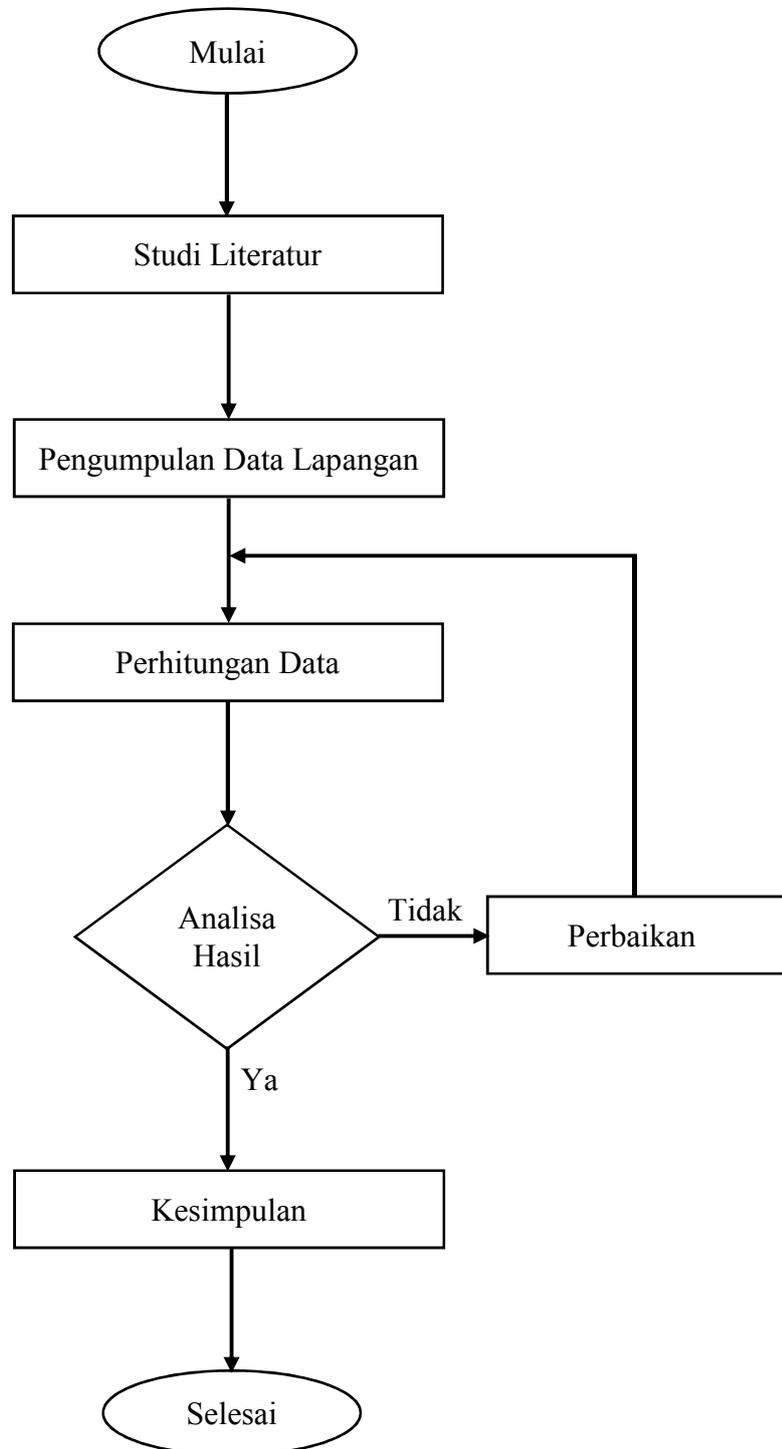
4. Analisa Hasil Perhitungan

Kemudian dilakukan analisa terhadap hasil perhitungan dari data-data yang ada. Analisa ini bertujuan untuk mengetahui analisis teknis dan desain dari perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) On-Grid yang dapat diaplikasikan untuk sebagian kebutuhan listrik UHN Medan.

5. Tahapan Kesimpulan

Apabila ada kesalahan perhitungan maka dilakukan perbaikan, jika tidak maka dari analisa tersebut dapat diambil kesimpulan.

Diagram Alir



Gambar 3.1. Flowchart Tahapan Penulisan

3.2. Perancangan Sistem

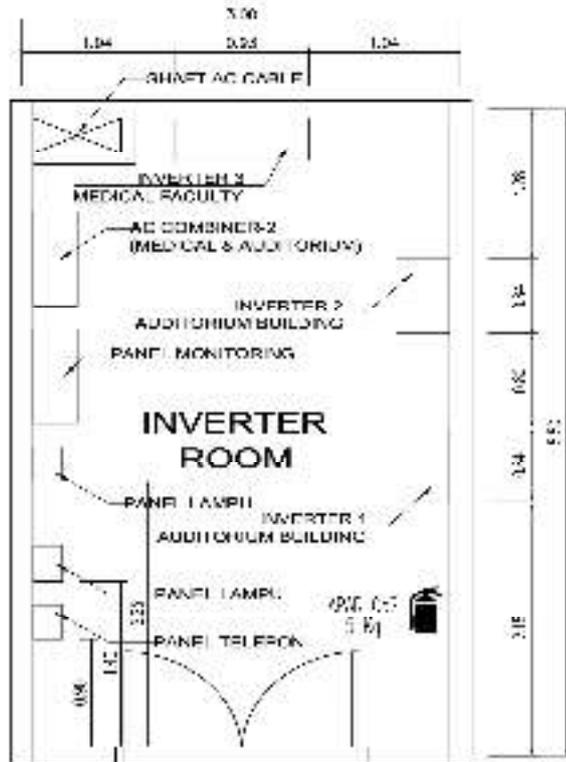
3.2.1. Perancangan Power House

Power House atau disebut juga pusat pembangkit merupakan bangunan yang berfungsi sebagai tempat semua peralatan pembangkit tenaga listrik dan sebagai tempat operasional pembangkitan listrik. Pada *Power House*, arus DC yang dihasilkan panel surya dari radiasi matahari diubah menjadi arus AC oleh inverter. *Power House* didesain untuk melindungi peralatan pembangkit dari perubahan cuaca sehingga setiap *Power House* harus memiliki AC (*Air Conditioner*) demi menjaga suhu ruangan tetap sejuk mungkin agar inverter dan peralatan lainnya tidak mengalami kerusakan.

PLTS On-Grid di Universitas HKBP Nommensen Medan mempunyai dua unit Power House yaitu *Power House 1* (PH1) dan *Power House 2* (PH2). *Power House 1* (PH1) mencakup panel surya yang ada pada atap Gedung Biro Rektor Prof. Dr. Amudi Pasaribu atau kita kenal juga dengan Gedung I dan pada atap Gedung Fakultas Teknik Mayjen TNI A.E Manihuruk atau kita kenal juga dengan Gedung L. Sedangkan *Power House 2* (PH2) mencakup panel surya yang ada pada atap miring Fakultas Kedokteran Gedung Murni Sadar dan atap miring auditorium Gedung Dr.Ir. Nurdin Tampubolon, M.M.

3.2.2. Power House 1 (PH 1)

Power House 1 (PH1) memiliki ukuran bangunan 4×6 m yang didalamnya terdapat 4 unit inverter, AC Combiner dan Monitoring. Inverter 1, 2 dan 3 dipasang berdampingan dengan jarak 0.80 m sedangkan inverter 4 dipasang di sisi lainnya. Terdapat AC combiner yang berdampingan dengan unit computer monitoring dengan jarak 0.55 m. Untuk menjaga keamanan ruangan ini dilengkapi dengan satu unit kamera CCTV dan satu unit APAR (Alat Pemadam Api Ringan) sebagai alat pemadam bila terjadi kebakaran akibat konslet. PH 1 berfungsi untuk mengelola arus DC yang dihasilkan dari panel surya Gedung I dan Gedung L yaitu sebesar 443,88 kWp. Dari PH 1 juga bisa memonitoring kondisi panel surya melalui unit computer yang terhubung dengan CCTV pada atap Gedung I dan Gedung L.



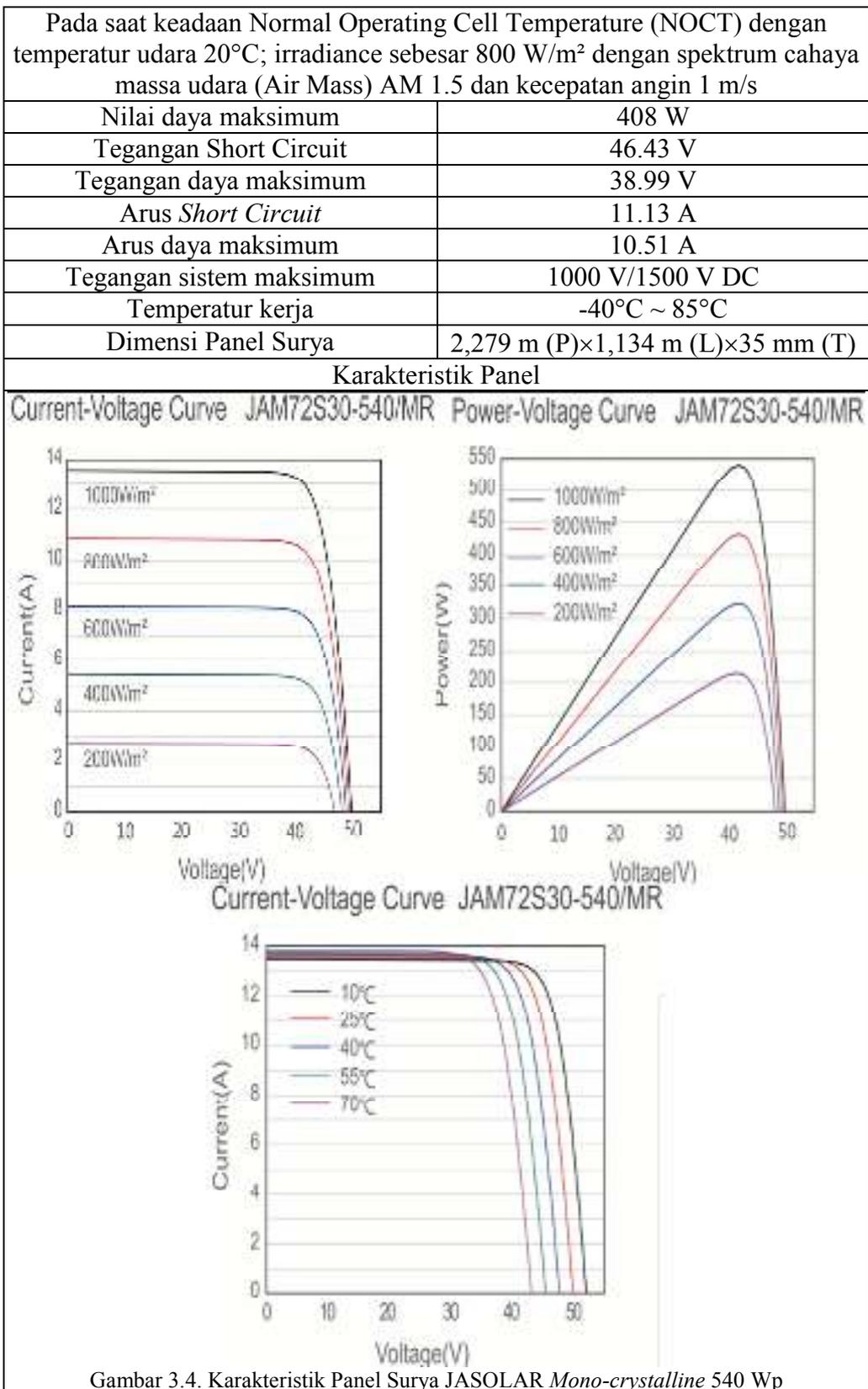
Gambar 3.3. Power House 2 PLTS On-Grid di UHN Medan

3.3. Panel Surya yang Digunakan

Panel Surya yang digunakan adalah panel surya merek JASOLAR jenis *Mono-crystalline* yang berkapasitas 540 Wp type JAM72S30-540/MR dibuat oleh Tiongkok. Berikut data spesifikasi panel surya JASOLAR yang digunakan:

Tabel 3.1. Spesifikasi Panel Surya JASOLAR *Mono-crystalline* 540 Wp yang Digunakan

Spesifikasi	JASOLAR JAM72S30-540/MR
Pada saat <i>Standard Test Condition (STC)</i> dengan temperatur panel stabil 25°C; irradiance sebesar 1000 W/m ² dengan spektrum cahaya massa udara (Air Mass) AM 1.5 dan kecepatan angin 0 m/ s	
Nilai daya maksimum	540 W
Tegangan Short Circuit	49.60 V
Tegangan daya maksimum	41.64 V
Arus <i>Short Circuit</i>	13.86 A
Arus daya maksimum	12.97 A
Efisiensi modul	20.9%
Toleransi daya	0-5 W
Koefisien suhu dari arus short circuit	+0.045% /°C
Koefisien suhu dari tegangan short circuit	-0.275% /°C
Koefisien suhu dari daya maksimum	-0.35% /°C
Dimensi Panel Surya	2,279 m (P)×1,134 m (L)×35 mm (T)



3.4. Kabel yang Digunakan

Kabel yang digunakan adalah kabel PV, kabel DC dan kabel AC merek Zhongli buatan Tiongkok. Kabel yang digunakan adalah kabel PV ukuran 2×6 mm²; kabel DC NYA Y/G ukuran 10 mm², ukuran 35 mm², ukuran 50 mm² dan ukuran 150 mm²; kabel AC NYY ukuran 4×16 mm², 4×35 mm², 4×95 mm² dan ukuran 4×185 mm² serta kabel AC NYFGbY ukuran 4×95 mm² dan ukuran 4×185 mm². Berikut adalah tabel spesifikasi kabel-kabel yang digunakan:

Tabel 3.2. Spesifikasi Kabel PV Merek Zhongli

Spesifikasi	Kabel PV Zhongli (2×6 mm ²)
Nilai tegangan (U _o /U)	<ul style="list-style-type: none"> • AC: 1000/1000 V • DC: 1500/1500 V
Tegangan maksimum (U _{max})	1800 V
Tegangan saat pengujian	6.5 KV AC
Temperatur	- 40°C sampai 90°C
Radius tekuk minimum	5× diameter total
Temperatur maksimum konduktor	120°C (untuk 20000 jam)
Resistansi DC maksimum konduktor pada 20°C	3.39 Ω/km
Resistansi DC maksimum konduktor pada 90°C	4.332 Ω/km
Kapasitas mengalirkan arus	57 A

Tabel 3.3. Spesifikasi Kabel DC NYA Y/G Merek Zhongli

Spesifikasi	Zhongli DC NYA Y/G (10 mm ²)	Zhongli DC NYA Y/G (35 mm ²)	Zhongli DC NYA Y/G (50 mm ²)	Zhongli DC NYA Y/G (150 mm ²)
Resistansi DC maksimum konduktor pada 20°C	1.83 Ω/km	0.524 Ω/km	0.387 Ω/km	0.124 Ω/km
Resistansi AC maksimum konduktor pada 70°C	2.19 Ω/km	0.627 Ω/km	0.464 Ω/km	0.15 Ω/km
Resistansi Isolasi minimal pada 70°C	0.007 M.Ω/km	0.004 M.Ω/km	0.005 M.Ω/km	0.003 M.Ω/km
Induktansi	0.274 mH/km	0.249 mH/km	0.248 mH/km	0.235 mH/km
Kapasitas maksimal arus pembawa pada 30°C	<ul style="list-style-type: none"> • 45 A (pada pipa) • 73 A (di udara) 	<ul style="list-style-type: none"> • 103 A (pada pipa) • 158 A (di udara) 	<ul style="list-style-type: none"> • 132 A (pada pipa) • 197 A (di udara) 	390 A (di udara)
Arus Short circuit maksimum	1.16 KA	4.07 KA	5.81 KA	17.44 KA

Tabel 3.4. Spesifikasi Kabel AC NYY Merek Zhongli

Spesifikasi	Zhongli AC NYY (4×16 mm ²)	Zhongli AC NYY (4×35 mm ²)	Zhongli AC NYY (4×95 mm ²)	Zhongli AC NYY (4×185 mm ²)
Resistansi DC maksimum konduktor pada 20°C	1.15 Ω/km	0.524 Ω/km	0.193 Ω/km	0.099 Ω/km
Resistansi AC maksimum konduktor pada 70°C	1.376 Ω/km	0.627 Ω/km	0.232 Ω/km	0.121 Ω/km
Resistansi Isolasi minimal pada 20°C	40 M.Ω/km	40 M.Ω/km	30 M.Ω/km	20 M.Ω/km
Induktansi	0.255 mH/km	0.246 mH/km	0.238 mH/km	0.233 mH/km
Kapasitas maksimal arus pembawa pada 30° C	<ul style="list-style-type: none"> • 89 A (di tanah) • 80 A (di udara) 	<ul style="list-style-type: none"> • 138 A (di tanah) • 130 A (di udara) 	<ul style="list-style-type: none"> • 250 A (di tanah) • 245 A (di udara) 	<ul style="list-style-type: none"> • 355 A (di tanah) • 370 A (di udara)
Arus Short circuit maksimum pada 1 detik	1.86 KA	4.07 KA	11.05 KA	21.51 KA

Tabel 3.5. Spesifikasi Kabel AC NYFGbY Merek Zhongli

Spesifikasi	Zhongli AC NYFGbY (4×95 mm ²)	Zhongli AC NYFGbY (4×185 mm ²)
Resistansi DC maksimum konduktor pada 20°C	0.193 Ω/km	0.099 Ω/km
Resistansi AC maksimum konduktor pada 70°C	0.232 Ω/km	0.121 Ω/km
Resistansi Isolasi minimal pada 20°C	30 M.Ω/km	20 M.Ω/km
Induktansi	0.238 mH/km	0.233 mH/km
Kapasitas maksimal arus pembawa pada 30°C	<ul style="list-style-type: none"> • 250 A (di tanah) • 245 A (di udara) 	<ul style="list-style-type: none"> • 355 A (di tanah) • 370 A (di udara)
Arus Short circuit maksimum pada 1 detik	11.05 KA	21.51 KA

3.5. Inverter yang Digunakan

Inverter yang digunakan adalah inverter merek Huawei buatan Tiongkok. Pada *Power House 1* (PH1) terdapat 4 unit inverter yaitu 1 unit Inverter Huawei tipe SUN2000-60KTL-M0 dan 3 unit Inverter Huawei tipe SUN2000-100KTL-M1. Sedangkan pada *Power House 2* (PH2) terdapat 1 unit Inverter Huawei tipe SUN2000-20KTL-M0 dan 2 unit Inverter Huawei tipe SUN2000-60KTL-M0. Berikut data spesifikasi Inverter Huawei yang digunakan:

Tabel 3.6. Spesifikasi Inverter Huawei yang Digunakan.

Spesifikasi	SUN2000-20KTL-M0	SUN2000-60KTL-M0	SUN2000-100KTL-M1
Efisiensi Maksimal	98.65%	<ul style="list-style-type: none"> • 98.9% (480 V) • 98.7% (380 V/400 V) 	<ul style="list-style-type: none"> • 98.8% (480V) • 98.6% (380 V/400 V)
INPUT			
Tegangan input maksimum	1,080 V	1100 V	1100 V
Arus maksimum per MPPT	22 A	22 A	26 A
Arus <i>short circuit</i> maksimum per MPPT	30 A	30 A	40 A
Tegangan awal	200 V	200 V	200 V
Tegangan kerja MPPT	160V~950V	200 V ~ 1,000 V	200 V ~ 1000 V
Tegangan Input Nominal	600 V	<ul style="list-style-type: none"> • 600V (380Vac/400 Vac) • 720V(480Vac) 	<ul style="list-style-type: none"> • 720V (480Vac) • 600V (400Vac) • 570V (380Vac)
Jumlah input MPPT	2	6	10
Input maksimal per MPPT	2	2	2
OUTPUT			
Daya aktif AC nominal	20,000 W	60,000 W	100,000 W
Daya semu AC maksimum	22,000 VA	66,000 VA	110,000 VA
Daya aktif AC maksimum ($\cos\phi=1$)	22,000 VA	66,000 W	110,000 W
Tegangan Output Nominal	<ul style="list-style-type: none"> • 220Vac/380Vac, • 230Vac/400Vac, 3W+N+PE 	<ul style="list-style-type: none"> • 220 V/380 V, • 230 V/400 V, 3W+N+PE; 3W+PE • 277 V/480 V, 3W+PE 	480V/400V/380V, 3W+(N)+PE
Frekuensi	50 Hz/60 Hz	50 Hz/60 Hz	50 Hz/60 Hz
Arus output nominal	-	<ul style="list-style-type: none"> • 72.2 A (480 V) • 86.7 A (400 V) • 91.2 A (380 V) 	<ul style="list-style-type: none"> • 120.3 A (480V) • 144.4 A (400V) • 152 A (380 V)
Arus output maksimum	33.5 A	<ul style="list-style-type: none"> • 100 A (380 V) • 95.3 A (400 V) • 79.4 A (480 V) 	<ul style="list-style-type: none"> • 133.7 A (480V) • 160.4 A (400V) • 168.8 A (380V)
Faktor Daya	<ul style="list-style-type: none"> • 0.8 Lagging • 0.8 Leading 	<ul style="list-style-type: none"> • 0.8 Lagging • 0.8 Leading 	<ul style="list-style-type: none"> • 0.8 Lagging • 0.8 Leading
Distorsi Harmonik Total Maksimum	$\leq 3\%$	$< 3\%$	$< 3\%$
Temperatur kerja	-25°C ~ 60°C	-25°C ~ 60°C	-25°C ~ 60°C

3.6. Moulded Circuit Breaker (MCCB) yang Digunakan

MCCB yang digunakan adalah MCCB merek Schneider Electric type Compact NSX100N, Compact NSX250N, Compact NSX400N dan Compact NSX630N yang dibuat oleh Indonesia. Berikut ini adalah data spesifikasi dari MCCB yang digunakan:

Tabel 3.7. Spesifikasi MCCB Schneider Electric Tipe Compact NSX

Spesifikasi	MCCB SE Compact NSX100N	MCCB SE Compact NSX250N	MCCB SE Compact NSX400N	MCCB SE Compact NSX630N
Jumlah kutub	3 kutub	3 kutub	3 kutub	4 kutub
Arus nominal (In)	100 A (40°C)	200 A (40°C)	400 A (40°C)	630 A (40°C)
Tegangan Kerja (Ue)	690 V AC	690 V AC	690 V AC	690 V AC
Frekuensi	50/60 Hz	50/60 Hz	50/60 Hz	50/60 Hz
Kapasitas pemutusan arus hubung singkat maksimum (Icu)	<ul style="list-style-type: none"> • 90 KA pada 220/240 V • 85 KA pada 240 V • 50 KA pada 380/415 V • 50 KA pada 440 V • 50 KA pada 480 V • 36 KA pada 500 V • 35 KA pada 525 V • 15 KA pada 600 V • 10 KA pada 660/690 V 	<ul style="list-style-type: none"> • 90 KA pada 220/240 V • 85 KA pada 240 V • 50 KA pada 380/415 V • 50 KA pada 440 V • 50 KA pada 480 V • 36 KA pada 500 V • 35 KA pada 525 V • 15 KA pada 600 V • 10 KA pada 660/690 V 	<ul style="list-style-type: none"> • 85 KA pada 220/240 V • 85 KA pada 240 V • 50 KA pada 380/415 V • 50 KA pada 480 V • 42 KA pada 440 V • 30 KA pada 500 V • 22 KA pada 525 V • 20 KA pada 600 V • 10 KA pada 660/690 V 	<ul style="list-style-type: none"> • 85 KA pada 220/240 V • 85 KA pada 240 V • 50 KA pada 380/415 V • 50 KA pada 480 V • 42 KA pada 440 V • 30 KA pada 500 V • 22 KA pada 525 V • 20 KA pada 600 V • 10 KA pada 660/690 V
Nilai Tegangan Isolasi (Ui)	800 V AC	800 V AC	800 V AC	800 V AC
Tegangan yang terukur saat diuji (Uimp)	8 KV	8 KV	8 KV	8 KV
Arus short circuit maksimum (Ics)	<ul style="list-style-type: none"> • 10 KA pada 660/690 V • 35 KA pada 525 V • 36 KA pada 500 V • 50 KA pada 	<ul style="list-style-type: none"> • 10 KA pada 660/690 V • 35 KA pada 525 V • 36 KA pada 500 V • 50 KA pada 	<ul style="list-style-type: none"> • 10 KA pada 660/690 V • 11 KA pada 525 V • 30 KA pada 500 V • 42 KA pada 	<ul style="list-style-type: none"> • 10 KA pada 660/690 V • 11 KA pada 525 V • 30 KA pada 500 V • 42 KA pada

	380/415 V • 50 KA pada 440 V* • 90 KA pada 220/240 V	380/415 V • 50 KA pada 440 V • 90 KA pada 220/240 V	440 V • 50 KA pada 380/415 V • 85 KA pada 220/240 V	440 V • 50 KA pada 380/415 V • 85 KA pada 220/240 V
Rentang arus yang diproteksi untuk jangka panjang (I_r)	0.7...1 x In	0.7...1 x In	160...400 A	250...630 A
Nilai arus untuk proteksi hubung singkat (I_{sd})	800 A	5...10 x In	1.5...10 x I_r	1.5...10 x I_r
Nilai arus Tripping seketika (I_i)	-	-	4800 A	6900 A

3.7. Data Radiasi Matahari di UHN Medan

Lokasi atap Gedung Universitas HKBP Nommensen Medan yang digunakan untuk pembangunan PLTS On-Grid ditentukan dengan melakukan survei dan observasi langsung ke lapangan. Kampus UHN Medan berada di Jalan Sutomo No. 4A, Kota Medan, Provinsi Sumatera Utara dengan koordinat garis lintang ($latitude = 3.5984^\circ$) dan garis bujur ($longitude = 98.6829^\circ$).



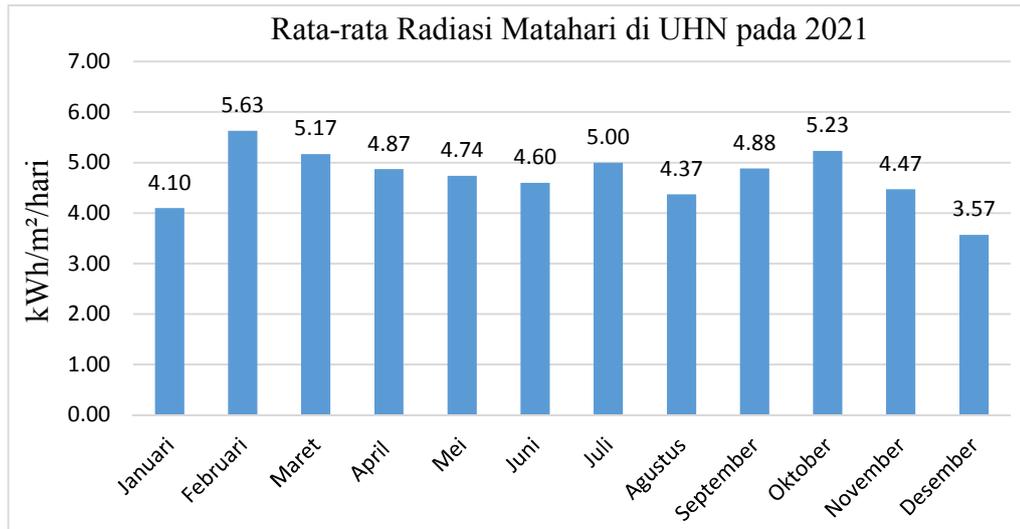
Gambar 3.5. Lokasi PLTS On-Grid Dibangun di UHN Medan

Berikut ini data radiasi matahari di UHN Medan pada bulan Januari 2021 sampai bulan Desember 2021 yang digunakan oleh penulis untuk studi ini.

Tabel 3.8. Data Radiasi Matahari di UHN Medan pada Tahun 2021

Tgl	Radiasi Matahari (kWh/m ² /hari)											
	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Agu	Sep	Okt	Nov	Des
1	4,05	4,33	5,03	5,11	5,28	5,62	5,79	4,97	4,88	3,38	5,29	4,69
2	3,72	4,22	6,4	5,02	4,94	3,17	4,76	4,87	5,4	6,31	5,26	2,66
3	2,01	6,18	3,42	4,74	5,45	2,96	5,73	5,56	5,46	6,85	3,54	2,49
4	4,98	4,44	6,5	5,11	4,54	3,54	5,24	4,68	2,79	6,69	3,78	4,85
5	3,83	5,22	5,95	5,12	5,45	4,54	3,69	5,06	5,94	4,72	4,86	2,07
6	2,59	6,21	3,37	5,23	5,19	6,09	3,4	5,78	6,37	4,45	4,95	0
7	4,77	5,45	4,13	3,19	4,43	5,83	5,28	3,49	5,56	5,46	4,34	3,91
8	3,95	5,44	6,16	5,77	3,32	5,49	4,63	2,78	5,62	5,27	4,91	4,44
9	4,11	5,55	5,86	5,56	4,78	4,34	4,1	4,08	5,53	5,86	5,52	4,67
10	2,99	5,32	6,13	4,49	4,28	3,68	3,44	4,64	5,71	6,32	3,31	2,2
11	4,29	4,3	5,74	4,53	5,26	5,9	3,04	3,18	5,35	6,42	3,86	5,09
12	4,05	5,73	4,28	5,12	4,26	3,46	3,62	5,3	4,05	5,39	3,96	2,8
13	2,86	6,05	5,83	2,97	5,45	5,12	4,19	4,91	3,06	6,59	4,65	5,04
14	4,59	6,42	5,86	5,02	4,24	4,74	4,37	4,17	5,97	6,3	5,16	4,96
15	4,6	5,83	5,05	5,23	5,42	4	4,61	3,6	4,56	6,57	5,43	3,51
16	4,05	6,09	5,46	4,68	4,76	5,3	6,37	2,47	4,37	6,23	5,2	2,91
17	5,18	6,51	5,74	4,63	4,51	5,79	6,79	4,73	4,18	4,19	3,31	1,23
18	2,79	5,91	5,9	6,16	3,78	3,63	6,33	1,9	3,1	5,3	3,66	1,14
19	4,79	4,31	5,57	5,03	4,01	5,28	5,92	4,12	3,67	4,55	5,3	2,34
20	3,6	5,62	6,03	5,79	4,63	3,29	6,37	3,16	5,05	3,39	4,15	3,37
21	5,15	6,13	5	5,57	2,56	4,77	5,99	5,77	6,24	4,48	4,01	4,04
22	3,7	5,65	5,29	4,39	5,37	5,05	5,56	4,01	4,43	4,77	4,73	0
23	4,16	6,11	4,06	4,45	6,08	4,35	6,08	4,54	7,15	5,68	4,32	4,14
24	4,37	5,62	2,68	4,46	5,84	5,56	4,84	3,09	5,26	3,94	4,14	5,41
25	4,54	5,15	5,15	5,55	5,43	5,15	5,68	4,78	5,73	5,21	5,21	5,46
26	4,79	6,24	5,57	5,47	3,6	4,24	3,62	5,52	2,82	5,55	3,78	5,09
27	4,97	6,93	4,23	2,77	2,77	5,61	5,45	3,69	5,1	3,53	4,77	5,09
28	3,41	6,61	5,43	5,22	5,13	4,76	6,03	5,06	4,93	4,96	3,83	5,16
29	3,95	-	4,74	5,15	5,75	1,35	5,18	5,17	3,18	5,13	3,98	5,94
30	5,14	-	4,89	4,55	5,22	6,48	3,17	5,32	4,87	4,46	4,99	3,79
31	5,25	-	4,85	-	5,34	-	5,66	5,03	-	4,27	-	2,14
Rata-rata	4,10	5,63	5,17	4,87	4,74	4,64	5,00	4,37	4,88	5,23	4,47	3,57
Rata-rata seluruhnya	4,72 kWh/m ² /hari											

Dari Tabel 3.8. dapat kita lihat bahwa data radiasi matahari di kampus UHN Medan pada tahun 2021 memiliki rata-rata radiasi matahari dalam setahun mencapai 4,72 kWh/m²/hari.



Gambar 3.6. Grafik Data Rata-rata Radiasi Matahari di UHN

Berdasarkan gambar 3.4. Grafik diatas menyatakan data rata-rata radiasi matahari setiap bulannya sepanjang tahun 2021. Rata-rata radiasi matahari yang paling besar terjadi pada bulan Februari dengan nilai 5.63 kWh/m²/hari, sedangkan untuk rata-rata radiasi matahari yang paling kecil terjadi pada bulan Desember dengan nilai 3.57 kWh/m²/hari.

3.8. Perealisasian

3.8.1. Pengoperasian Sistem PLTS di UHN

Sebuah PLTS akan beroperasi setelah inverter dinyalakan, cara menyalakan inverter adalah sebagai berikut:

- a. Menyalakan “*Inverter DC Switch*” yang terletak di bagian bawah inverter.
- b. Menyalakan “*Inverter AC Breaker*” yang terletak di Panel Distribusi.

Setelah semua system menyala maka PLTS akan mulai memproduksi energi listrik yang nantinya akan disalurkan ke beban.

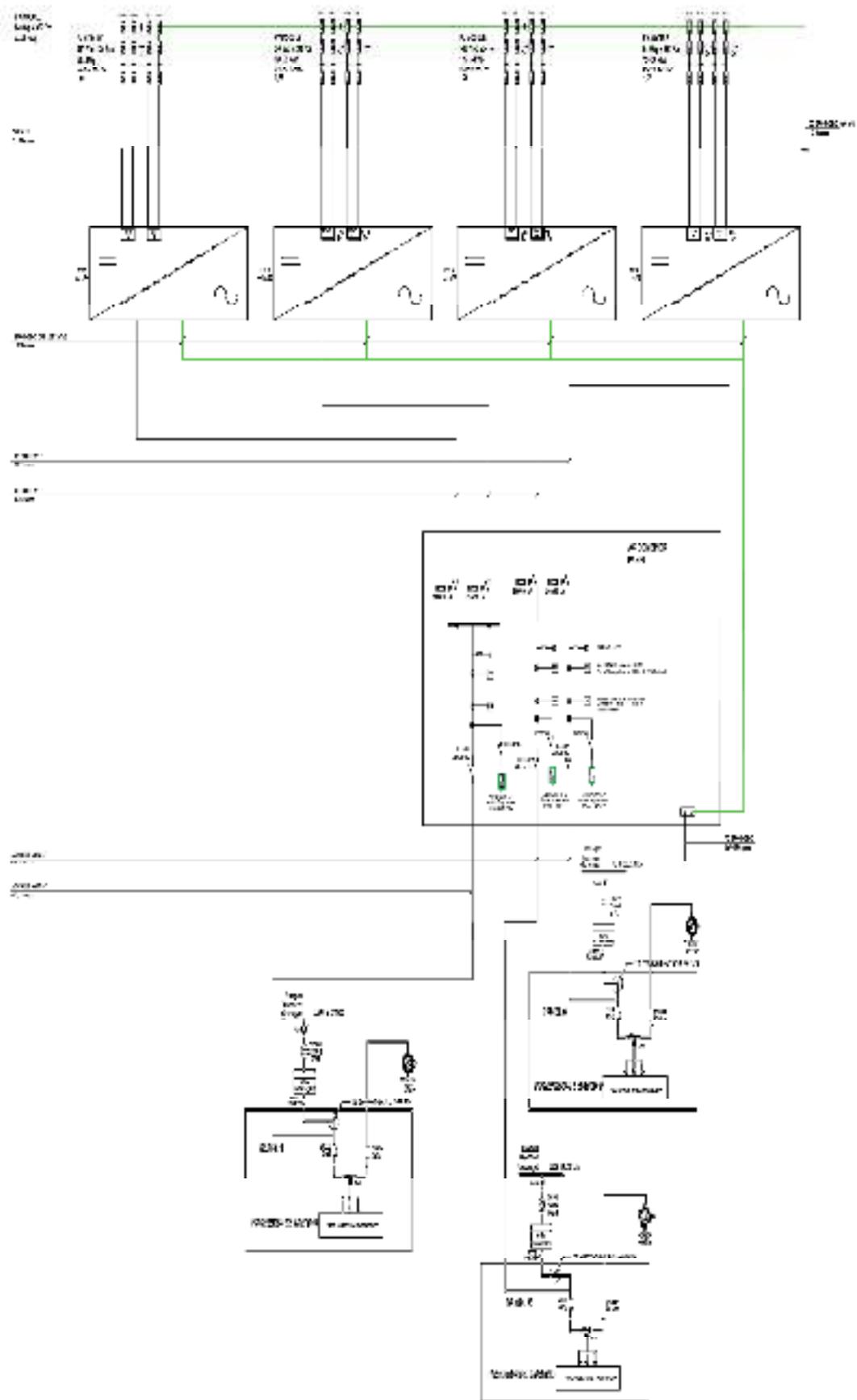
a. Prinsip Kerja Sistem *Power House* 1 PLTS On-Grid

Berikut ini adalah bagaimana prinsip kerjanya:

- Panel surya menangkap sinar foton matahari kemudian mengubahnya menjadi arus listrik searah (DC).
- Semua string panel surya yang ada di atap Gedung Rektorat dan Gedung Fakultas Teknik dihubungkan ke inverter dengan kabel PV 2×6 mm² dengan memperhatikan MPPT yang sesuai.

- Inverter akan mengubah arus DC yang dihasilkan panel menjadi arus bolak-balik (AC) sesuai dengan kapasitasnya.
- Setelah mengubah arus DC menjadi arus AC, output dari inverter dialirkan ke *AC Combiner Panel* dengan kabel AC NYY dengan tujuan untuk menyesuaikan tegangan listriknya dengan tegangan dari PLN.
- Inverter 1.1 dihubungkan ke MCCB 3P 200A 50kA dan inverter 2.1 dihubungkan ke MCCB 3P 125A 50kA, kemudian inverter 3.1 dan 4.1 masing-masing dihubungkan ke MCCB 3P 200A dan 50kA.
- Inverter 1.1 dan inverter 2.1 diserikan kemudian dihubungkan ke MCCB 4P 350A 50kA sedangkan inverter 3.1 dan 4.1 masing-masing dihubungkan ke MCCB 4P 200A 50kA.
- Setelah tegangannya disesuaikan dengan tegangan dari PLN di *AC Combiner Panel*, energi listrik yang diperoleh inverter 1.1 dan 2.1 disalurkan ke titik interkoneksi dengan trafo listrik PLN Gedung I pada Panel 1 *Power House Existing*, energi listrik yang dihasilkan Inverter 3.1 disalurkan ke titik interkoneksi dengan trafo Gedung Fakultas Ekonomi dan Hukum pada Panel 2 *Power House Existing*, sedangkan energi listrik dari inverter 4.1 disalurkan ke titik interkoneksi dengan trafo listrik PLN Gedung L pada Panel 3 *Power House Existing*.
- Untuk pentanahan semua string panel surya dihubungkan dengan menggunakan kabel DC Grounding NYA 10 mm².
- Sedangkan untuk arus semua inverter dan *AC Combiner Panel* dihubungkan secara parallel dengan menggunakan kabel Grounding NYA 50 mm² kemudian ditanahkan dengan menggunakan kabel AC Grounding NYA 150 mm².
- Energi listrik yang dihasilkan *Power House 1* dialirkan ke beban listrik Gedung Rektorat, Gedung Fakultas Ekonomi dan Hukum serta Gedung Fakultas Teknik.

Berikut ini adalah gambar 3.7. yang merupakan *Single Line Diagram Power House 1* yang mencakup produksi energi listrik 443,9 kWp dari 822 panel surya pada atap Gedung Rektorat dan Gedung Fakultas Teknik



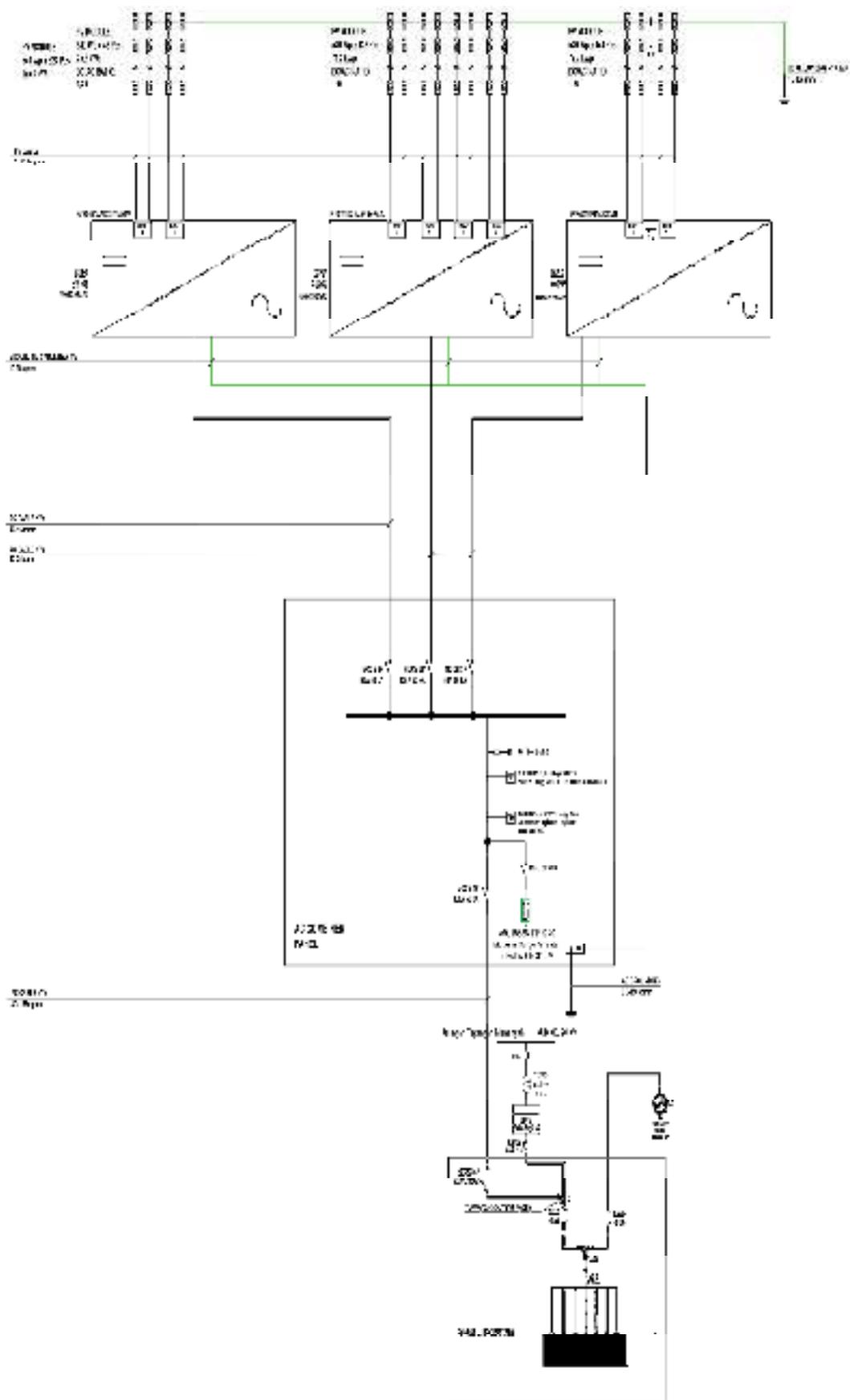
Gambar 3.7. Diagram PLTS On-Grid pada Panel Surya di Atap Gedung I dan Gedung L

b. Prinsip Kerja Sistem *Power House 2* PLTS On-Grid

Berikut ini adalah prinsip kerja produksi energi listrik *Power House 2* :

- Panel surya menangkap sinar foton matahari kemudian mengubahnya menjadi arus listrik searah (DC).
- Semua string panel surya yang ada di atap miring Gedung Auditorium dan Gedung Fakultas Kedokteran dihubungkan ke inverter dengan kabel PV 2×6 mm² dengan memperhatikan MPPT yang sesuai.
- Inverter akan mengubah arus DC yang dihasilkan panel menjadi arus bolak-balik (AC) sesuai dengan kapasitasnya.
- Setelah mengubah arus DC menjadi arus AC, output dari inverter dialirkan ke *AC Combiner Panel* dengan kabel AC NYY dengan tujuan untuk menyesuaikan tegangan listriknya dengan tegangan dari PLN.
- Inverter 1.2 dan inverter 2.2 dihubungkan ke MCCB 3P 125A 50kA sedangkan inverter 3.2 dihubungkan ke MCCB 3P 50A 50kA.
- Kemudian seluruhnya dihubungkan dan disambungkan ke MCCB 4P 350A 50kA.
- Setelah tegangannya disesuaikan dengan tegangan dari PLN di *AC Combiner Panel*, energi listrik yang diperoleh inverter 1.2, inverter 2.2 dan inverter 3.2 disalurkan ke titik interkoneksi dengan trafo listrik PLN Gedung Fakultas Kedokteran pada Panel *Power House 2*.
- Untuk pentanahan semua string panel surya dihubungkan dengan menggunakan kabel DC Grounding NYA 10 mm².
- Sedangkan untuk arus semua inverter dan *AC Combiner Panel* dihubungkan secara parallel dengan menggunakan kabel Grounding NYA 35 mm² kemudian ditanahkan dengan menggunakan kabel AC Grounding NYA 150 mm².
- Energi listrik yang dihasilkan *Power House 2* dialirkan ke beban listrik Gedung Fakultas Kedokteran dan Gedung Auditorium.

Berikut ini adalah gambar 3.8. *Single Line Diagram Power House 2* yang mencakup produksi energi listrik 175 kWp dari 324 panel surya pada atap miring Gedung Auditorium dan Gedung Fakultas Kedokteran.

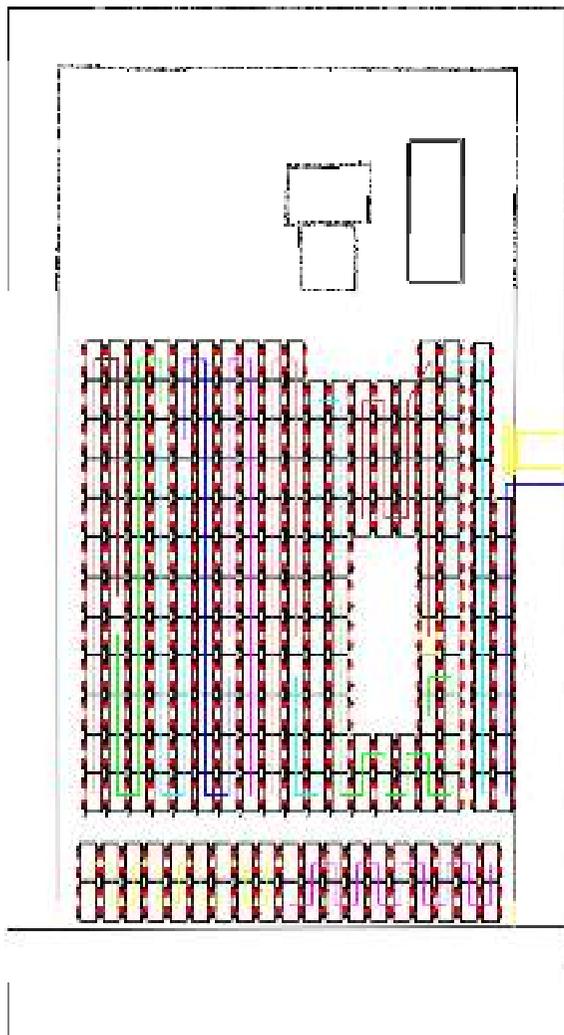


Gambar 3.8. Diagram PLTS On-Grid pada Panel Surya di Atap Miring Gedung Kedokteran

3.8.2. Penyusunan Rangkaian String Panel Surya ke Inverter

Pada PLTS On-Grid di UHN Medan terdapat 1146 panel surya yang tersebar di atap Gedung Rektorat dan Gedung Fakultas Teknik sebanyak 822 unit panel surya yang dipasang menghadap utara (Kampus IT&B) dengan kemiringan 10° , sedangkan di atap miring Gedung Auditorium sebanyak 180 unit panel surya dan di atap miring Gedung Fakultas Kedokteran sebanyak 144 unit panel surya dipasang dengan kemiringan 15° . Untuk menyederhanakan penyaluran energi listrik yang dihasilkan panel ke inverter, panel surya dirangkai menjadi beberapa string. String adalah beberapa unit modul surya yang dirangkai dan dihubungkan secara seri dengan tujuan mengumpulkan output daya dari modul surya.

Panel surya yang terdapat di atap Gedung Rektorat dan Gedung Fakultas Teknik (lihat gambar 3.9.) terbagi menjadi 42 string dihubungkan ke empat inverter pada *Power House* 1 (gambar.3.2.). Inverter 1.1 berkapasitas 60 kW dihubungkan pada 3 MPPT dengan muatan 6 string panel yang terdapat di tepi sebelah barat Gedung Rektorat. Setiap string yang dihubungkan dengan inverter 1.1 merupakan gabungan dari 20 panel surya, sehingga total panel surya yang dihubungkan sebanyak 120 panel surya. Inverter 2.1 berkapasitas 100 kW dihubungkan pada 6 MPPT dengan muatan 12 string yang terdapat pada bagian selatan Gedung Rektorat. String 1 sampai 6 yang dihubungkan ke inverter 2.1 merupakan gabungan 20 panel surya sedangkan string 7 sampai 12 merupakan gabungan 19 panel surya, sehingga jumlah panel yang dihubungkan pada inverter 2.1 sebanyak 234 panel surya. Sama halnya dengan inverter 2.1, kapasitas inverter 3.1 dan 4.1 juga sebesar 100 kW dihubungkan pada 6 MPPT dengan muatan 12 string. Inverter 3.1 dihubungkan dengan panel yang terdapat pada bagian utara Gedung Rektorat sedangkan inverter 4.1 mencakup seluruh panel yang ada pada atap Gedung Fakultas Teknik. String 1 sampai 6 pada Inverter 3.1 dan 4.1 merupakan gabungan 20 panel surya sedangkan string 7 sampai 12 merupakan gabungan 19 panel surya, sehingga inverter 3.1 dan 4.1 masing-masing dihubungkan ke 234 panel surya.

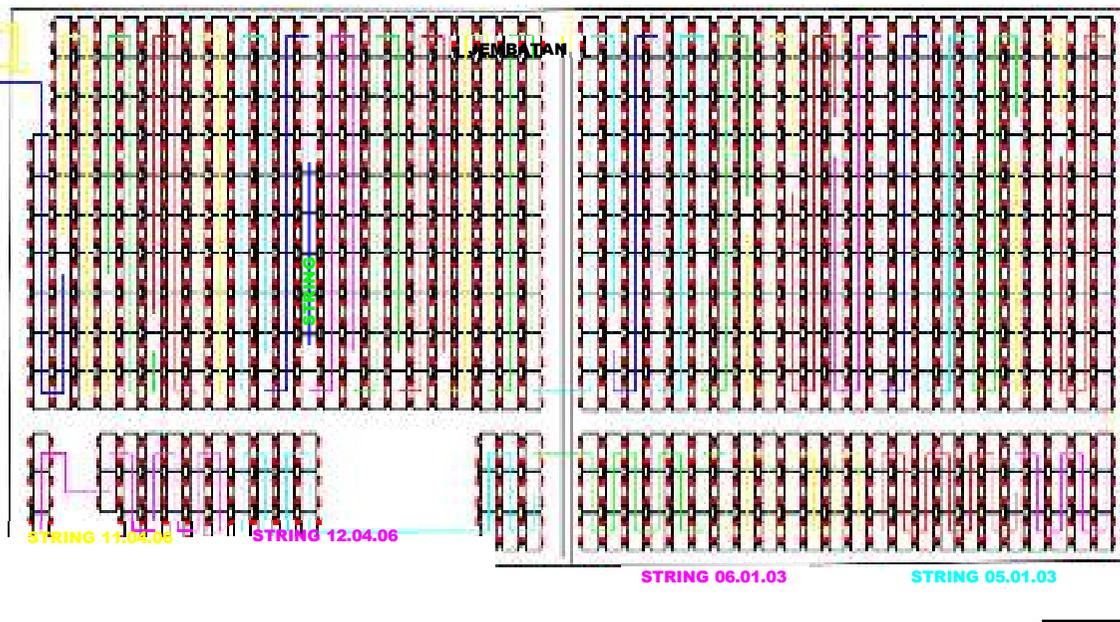


ENGINEERING



RECTORATE BERAU

- STRING 10.04.05
- STRING 09.04.05
- STRING 08.04.04
- STRING 07.04.04
- STRING 06.04.03
- STRING 05.04.03
- STRING 04.04.02
- STRING 03.04.02
- STRING 01.04.01
- STRING 12.03.06
- STRING 11.03.06
- STRING 10.03.05
- STRING 09.03.05
- STRING 08.03.04
- STRING 07.03.04
- STRING 06.03.03
- STRING 05.03.03
- STRING 04.03.02
- STRING 03.03.02
- STRING 02.03.01
- STRING 01.03.01
- STRING 12.02.06
- STRING 11.02.06
- STRING 10.02.05
- STRING 09.02.05

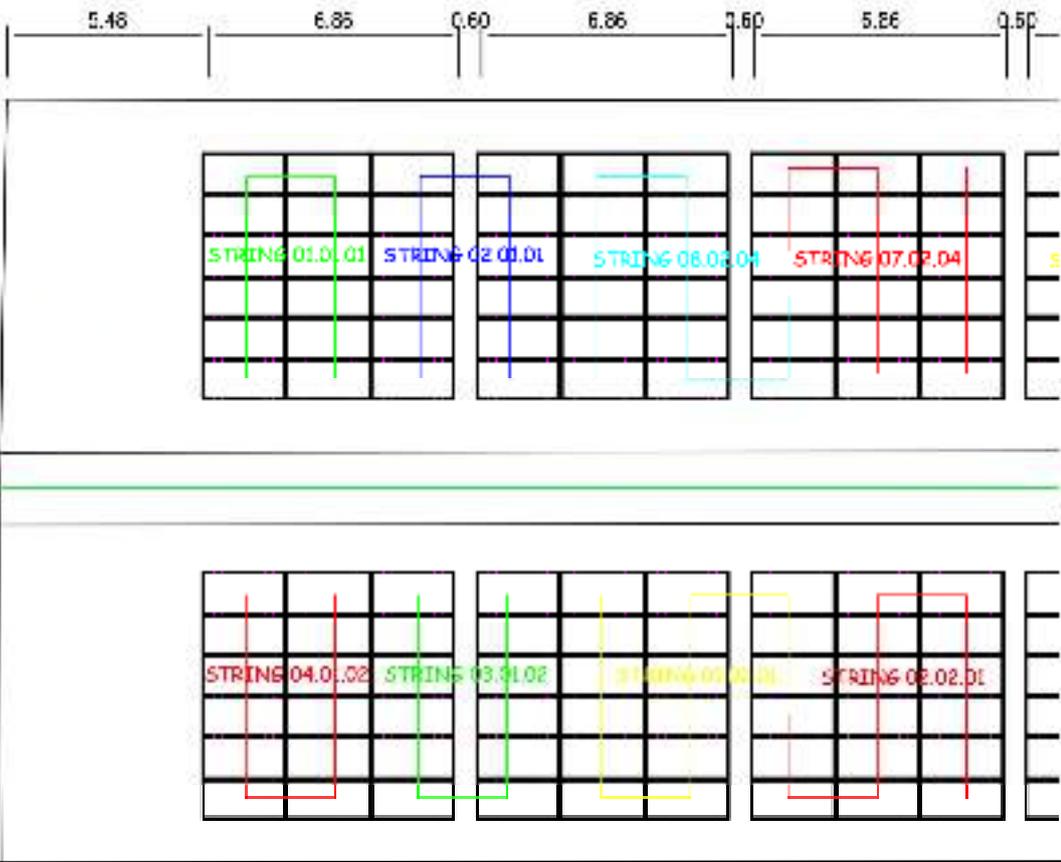


Gambar 3.9. Penyusunan Rangkaian Panel Surya pada Atap Gedung Rektorat (Gedung I) dan Gedung Fakultas Teknik (Gedung L)

Panel surya yang berada di atap miring Gedung Fakultas Kedokteran dan Gedung Auditorium dihubungkan ke tiga inverter yang berada di *Power House 2* (lihat gambar 3.3.). Berdasarkan gambar 3.10. dapat kita lihat ada sebanyak 180 panel surya yang dibagi menjadi 12 string. Inverter 1.2 berkapasitas 20 kW dihubungkan pada 2 MPPT dengan muatan 4 string panel yang terdapat pada bagian tepi barat Gedung Auditorium. Setiap string yang dihubungkan ke inverter 1.2 merupakan gabungan dari 12 panel surya, sehingga total panel surya yang terhubung adalah 48 panel. Inverter 2.2 berkapasitas 60 kW dihubungkan pada 4 MPPT dengan muatan 8 string sisanya. String 1,2,7 dan 8 masing-masing dihubungkan dengan 15 panel surya sedangkan string 3,4,5 dan 6 masing-masing dihubungkan dengan 18 panel surya. Jadi, total panel surya yang dihubungkan ke inverter 2.2 adalah sebanyak 132 panel.

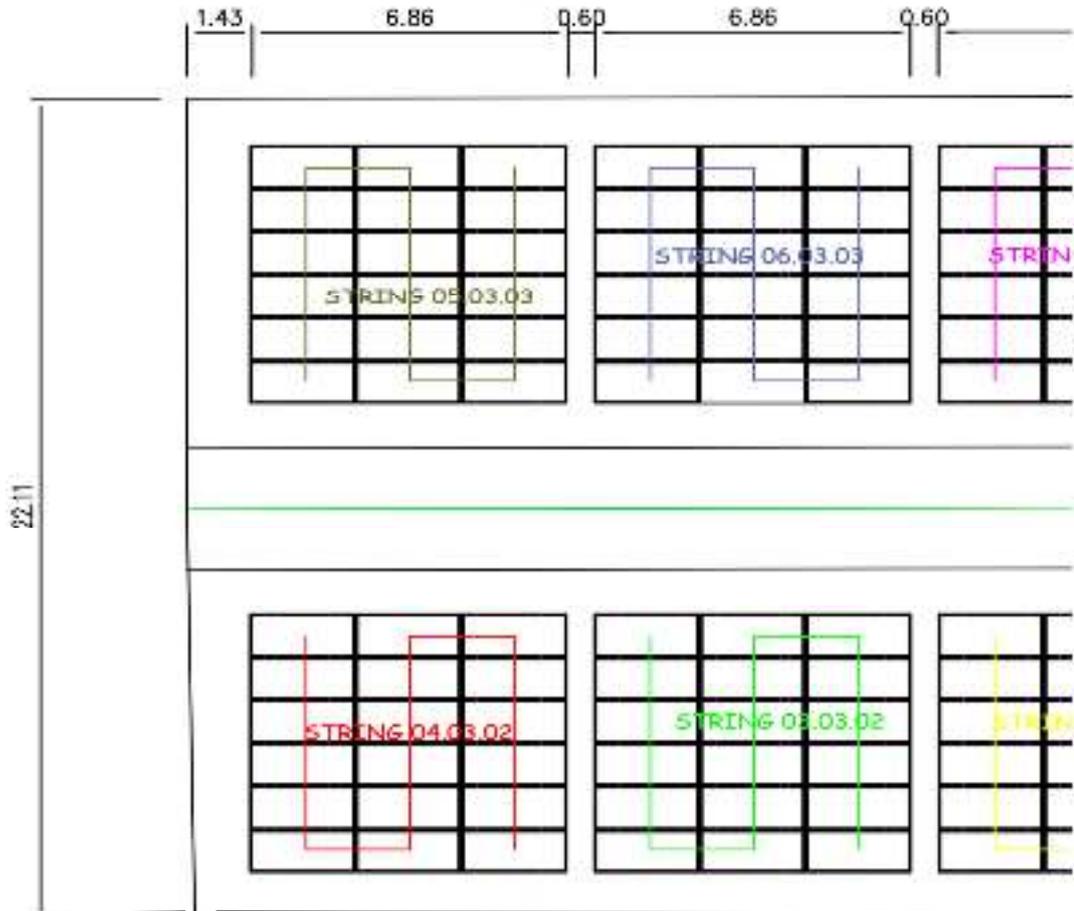
Pada gambar 3.11. merupakan detail denah string yang ada pada atap miring Gedung Fakultas Kedokteran, terdapat sebanyak 144 panel surya dibagi menjadi 8 string. Seluruh panel yang ada pada Gedung Fakultas Kedokteran dihubungkan ke 4 MPPT inverter 3.2 yang berkapasitas 60 kW.

AUDITORIUM



Gambar 3.10. Penyusunan Rangkaian Panel Surya pada Atap Miring Gedung Auditorium

MEDICAL FACULTY B



Gambar 3.11. Penyesunan Rangkaian Panel Surya pada Atap Miring Gedung Fakultas Kedokteran