

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Studi Literatur

Dalam penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh WanQuan dan rekan-rekan pada tahun 2020 dengan judul "*Analysis of Electrical Characteristics and Performance of Poly-Crystalline Solar PV Module by I-V Tester Under Temperature and Solar Irradiance Variation in Spring Season*", dijelaskan bahwa Performa panel fotovoltaik (PV) tenaga surya secara utama bergantung pada dua elemen lingkungan, yakni temperatur dan radiasi matahari. Elemen-elemen ini mempengaruhi parameter-output PV seperti daya puncak, arus hubung singkat, serta tegangan sirkuit terbuka. Studi ini menginvestigasi perilaku karakteristik elektrik panel PV *polycrystalline* dalam menghadapi variasi suhu dan radiasi surya pada musim semi. Pendekatan ini dilakukan melalui eksperimen dan hasilnya diverifikasi melalui simulasi dengan perangkat lunak Matlab. Hasil eksperimen diperbandingkan dengan hasil simulasi dan mengindikasikan bahwa output listrik modul mengalami perubahan seiring variasi suhu dan radiasi surya. Kedua faktor ini memengaruhi performa modul PV selama musim semi dan output-nya menjadi lebih efisien karena variasi suhu permukaan yang menguntungkan dan radiasi surya yang mengenai modul selama puncak aktivitas di siang hari (WanQuan dkk., 2020).

Penelitian lain yang dilakukan oleh Abu Syed dan rekan-rekannya pada tahun 2019 dengan judul "*Outdoor Performance Study of Poly and Mono Crystalline Photovoltaic Modules under Varying Environmental Conditions*" mengeksplorasi pengaruh kondisi lingkungan terhadap kinerja panel surya

monocrystalline dan *polycrystalline*. Studi ini melibatkan pengukuran kinerja luar ruangan dari kedua jenis modul *photovoltaic* dengan memperhatikan beberapa parameter seperti suhu, kelembaban, dan kecepatan angin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu permukaan panel surya berhubungan dengan nilai arus hubung singkat, dengan suhu yang lebih tinggi menghasilkan nilai arus hubung singkat yang lebih tinggi. Kelembaban juga mempengaruhi kinerja, dan terdapat perbedaan dalam kinerja antara panel surya *polycrystalline* dan *monocrystalline*. Modul *polycrystalline* menunjukkan nilai arus hubung singkat yang lebih tinggi dibandingkan dengan modul *monocrystalline* selama periode penelitian. Dengan demikian, kedua penelitian ini menyajikan informasi penting mengenai efisiensi dan kinerja panel *photovoltaic* dalam lingkungan yang berbeda, serta menyoroti peran penting dari pemahaman tentang cacat dan kondisi lingkungan untuk memaksimalkan penggunaan energi terbarukan secara efisien (Tanjil dkk., 2019).

Sebuah penelitian lain dilaksanakan oleh Hidayat F dan timnya pada tahun 2019 dengan judul "Analisis Prestasi Sistem PLTS 1000 Wp di Iteas Bandung". Sejak awal tahun 2018, Institut Teknologi Nasional Bandung (Iteas) telah menerapkan pembangunan instalasi PLTS berkapasitas 1000 Wp yang terhubung dengan jaringan listrik umum. Studi ini menjalankan pengukuran terhadap variabel utama pada modul fotovoltaik dalam instalasi PLTS di Institut Teknologi Nasional Bandung. Pengukuran dilaksanakan selama enam hari dari tanggal 15 sampai 20 Juli 2017, antara jam 08:00 hingga 15:00 WIB (dengan waktu operasi selama 7 jam), mempertimbangkan lama penyinaran matahari efektif sekitar 5 jam/hari di wilayah Indonesia. Hasil pengukuran variabel utama dari modul PV kemudian

digunakan untuk menghitung performa instalasi PLTS serta total produksi energi dari instalasi tersebut (Hidayat dkk., 2019).

2.2 Energi Surya

Energi surya sebagai salah satu sumber energi terbarukan yang menjanjikan dapat mengatasi masalah energi global secara ramah lingkungan. Ketersediaan energi matahari di permukaan tanah menjadi salah satu faktor pertimbangan dalam menerapkan sistem energi matahari di suatu wilayah (Afif & Martin, 2022).

Energi surya di Indonesia mempunyai potensi sebesar 4,8 kWh/m² yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik. Radiasi matahari di Indonesia memiliki durasi sekitar 4 hingga 5 jam setiap harinya. Energi dari sumber matahari di suatu wilayah dapat diestimasi menggunakan persamaan berikut (Diantari dkk., 2018) :

$$E = I \times A \dots\dots\dots(2.1)$$

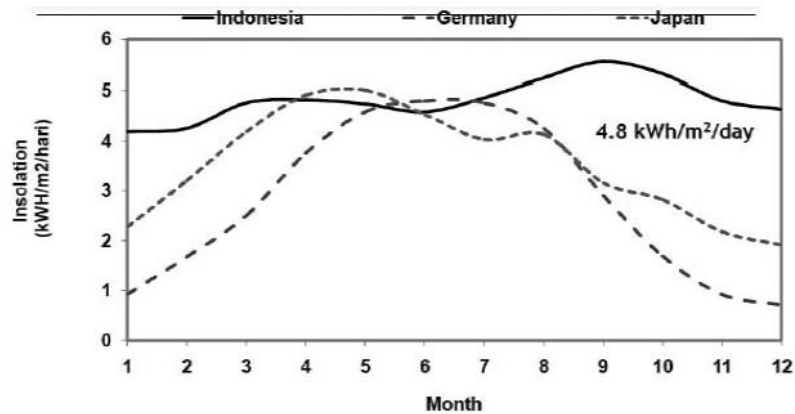
Dalam persamaan di atas,

E = Jumlah energi matahari (Watt)

I = Rata-rata intensitas radiasi matahari (Watt per meter persegi)

A = Luas area yang terkena radiasi (meter persegi)

Perbandingan distribusi radiasi matahari di Indonesia menunjukkan kestabilan distribusinya setiap bulannya dibandingkan dengan beberapa negara seperti Jerman dan Jepang (Afif & Martin, 2022). Kondisi ini dipengaruhi oleh Indonesia yang memiliki iklim tropis dan letak geografis di garis khatulistiwa. Hal ini menegaskan potensi yang menjanjikan dari energi surya di Indonesia. Sebagaimana tergambar pada ilustrasi berikut.



Gambar 2.1 Perbandingan distribusi radiasi matahari dengan berbagai negara (Afif & Martin, 2022)

2.3 Aplikasi Energi Surya

Energi adalah kebutuhan mendasar bagi keseharian manusia, digunakan dalam berbagai aktivitas rumah tangga maupun perindustrian. Energi memiliki peran yang mendukung dalam aktivitas perekonomian dan berfungsi sebagai sarana dalam mencapai tujuan di bidang sosial, ekonomi, dan lingkungan. Namun, semakin lama, penggunaan energi mengalami peningkatan sementara energi fosil semakin berkurang. Oleh karena itu, diperlukan suatu energi alternatif sebagai solusinya. Salah satu contoh energi alternatif yang tidak terbatas dan dapat diperbaharui disini adalah energi surya (Raja dkk., 2022). Berikut beberapa aplikasi energi surya :

1. Termal Surya untuk Memanaskan Air

Kota Pontianak terletak di garis Khatulistiwa pada garis lintang 0^0 , yang membuatnya menjadi daerah bersuhu udara tinggi dan terpapar sinar matahari sekitar 10-15 jam per hari. Kondisi ini memungkinkan energi matahari menjadi sumber energi alternatif untuk memanaskan air.

Pemanas air tenaga matahari berfungsi untuk memproduksi air panas dengan memanfaatkan matahari untuk mencapai temperatur tertentu. Alat ini dilengkapi dengan kolektor surya yang berfungsi mengabsorpsi dan mengumpulkan sinar matahari yang kemudian mengonversikannya menjadi energi termal untuk memanaskan air yang mengalir pada pipa kolektor. Radiasi panas yang diserap oleh kolektor surya kemudian disalurkan melalui penutup kolektor yang transparan dan dirubah menjadi panas pada pelat *absorber* kolektor surya.

Pengembangan desain pemanas air tenaga matahari dilakukan berdasarkan prinsip-prinsip mekanika fluida, yang mempertimbangkan perpindahan panas melalui prinsip radiasi, konduksi, dan konveksi. Sumber energi utama dalam memanaskan air berasal dari radiasi matahari. Demi mengoptimalkan penyerapan energi oleh kolektor surya, sejumlah metode bisa diimplementasikan. Salah satunya adalah dengan memperluas area penyerapan pada permukaan kolektor surya serta memilih bahan dengan konduktivitas termal yang sesuai. Selain itu, memvariasikan sudut kemiringan kolektor surya juga dapat meningkatkan penyerapan radiasi sinar matahari dan meningkatkan efisiensi kolektor.

Berdasarkan penelitian Raja dan rekan-rekannya yang dilakukan di tahun 2022, alat pemanas air tenaga surya tipe pelat datar berhasil diciptakan seperti pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.2 Alat Pemanas Air Tenaga Surya Tipe Pelat Datar (Raja dkk.,
2022)**

Keterangan:

1. Termometer Termokopel
2. *Flowmeter*
3. Tangki
4. Rangka
5. Kolektor surya
6. Pipa tembaga

Kolektor surya dilengkapi dengan pelat penyerap, pipa *absorber*, isolator serta kaca penutup yang bersifat transparan dan tembus cahaya. Cara kerja dari alat Pemanas Air Tenaga Surya dimulai dengan menggunakan pompa untuk mengalirkan air dari tangki ke kolektor surya dengan aliran air yang telah ditentukan. Air yang berada dalam kolektor dinaikkan suhunya oleh sinar matahari

dan kemudian disirkulasikan menuju tangki kembali. Proses ini berkelanjutan sehingga pasokan air panas terus berjalan.

2. Energi Matahari Untuk Produksi Listrik.

Pemanfaatan sumber energi terbarukan melibatkan penggunaan radiasi matahari sebagai sumber energi melalui penggunaan sel surya dengan tujuan mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Pada cahaya matahari terdapat foton atau partikel energi matahari kemudian dirubah ke energi listrik melalui penggunaan sel surya. Efisiensi kerja dari sel surya tergantung pada jumlah cahaya matahari yang diserap. Pada kondisi cuaca berawan dan berkabut dapat mempengaruhi seberapa banyak energi sinar matahari yang bisa diabsorpsi oleh sel surya dan bisa mengakibatkan penurunan kinerjanya (Hayati, 2021).

2.4 Struktur Sel Surya

Dengan kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi, panel surya mengalami perkembangan yang signifikan. Struktur komponen dari panel surya menggunakan bahan silikon seperti berikut ini :

1. Substrat

Substrat merupakan bahan dasar yang membentuk landasan bagi semua komponen dalam panel surya, dan memiliki kemampuan konduksi yang baik. Bahan ini juga berperan sebagai penghubung termal yang positif dalam panel surya. Bahan yang sering digunakan untuk substrat adalah logam, seperti molybdenum atau aluminium.

2. Material Semikonduktor

Bahan semikonduktor menjadi inti dari panel surya, dengan lapisan tipis

yang berperan dalam menyerap cahaya matahari. Bagian ini melibatkan *junction*, yaitu penggabungan dari material semikonduktor yang membentuk p-n *junction*. Selain substrat yang bertindak sebagai kontak positif, bahan semikonduktor ini umumnya dilapisi dengan material logam transparan pada permukaannya untuk bertindak sebagai kontak negatif, dan dikenal sebagai *contact grid*.

3. Lapisan Anti Reflektif

Lapisan anti reflektif yaitu lapisan material tipis dengan indeks refraktif optik yang berada pada bahan semikonduktor dan udara. Lapisan ini berfungsi untuk mengurangi pemantulan cahaya, sehingga cahaya dapat lebih optimal diserap oleh semikonduktor.

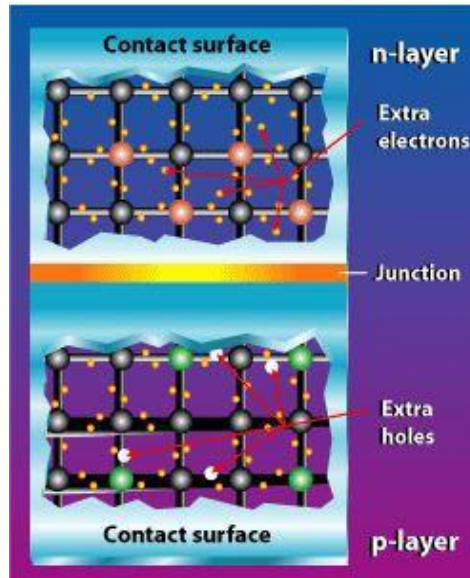
4. Enkapsulasi

Enkapsulasi memiliki peran penting dalam melindungi modul surya dari dampak kotoran dan air hujan. Selain itu, struktur ini juga memfasilitasi proses pembersihan panel surya dengan lebih mudah.

2.5 Prinsip Kerja Sel Surya

Energi cahaya matahari diubah menjadi listrik dalam sel surya melalui prinsip p-n *junction*, titik pertemuan dua jenis semikonduktor: tipe-p dan tipe-n. Struktur semikonduktor ini dibentuk oleh ikatan atom yang melibatkan elektron sebagai komponen intinya. Tipe-n kelebihan elektron (muatan negatif), sementara tipe-p memiliki kekurangan elektron yang menghasilkan "*hole*" (muatan positif). Keadaan kelebihan dan kekurangan electron ini bisa dicapai dengan menambahkan "*doping*" pada material menggunakan atom dopan tertentu. Contohnya untuk memperoleh semikonduktor silikon tipe-p, silikon diberi *doping* atom boron,

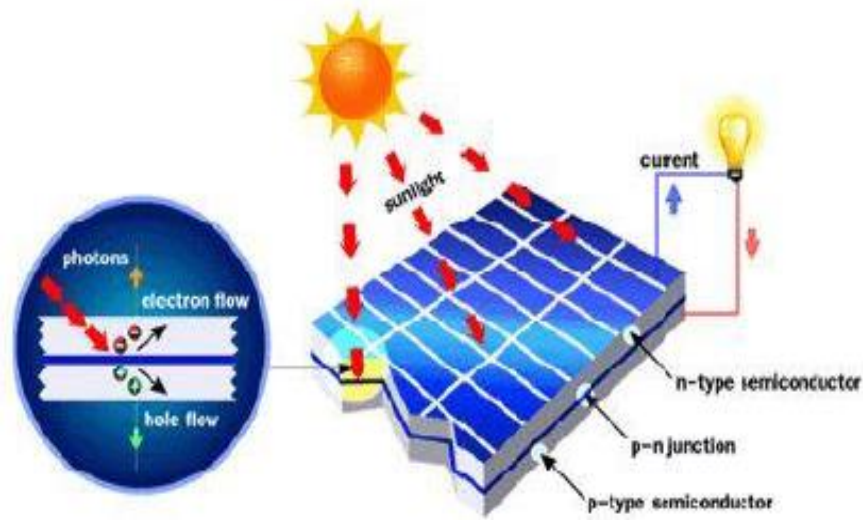
sementara untuk memperoleh semikonduktor silikon tipe-n, silikon diberi *doping* dengan atom fosfor. Gambar di bawah ini mengilustrasikan p-n *junction* pada semikonduktor tipe-p dan tipe-n. (Hardani, 2020).



Gambar 2.3 Junction antara Semikonduktor Tipe-p dan Tipe-n (Hardani, 2020)

P-n junction dapat menghasilkan medan listrik, kemudian arus listrik dihasilkan oleh bahan kontak yang membuat elektron dan *hole* memungkinkan untuk diarahkan. Saat dua semikonduktor disatukan (tipe-n dan tipe-p), elektron berlebih dari semikonduktor tipe-n akan berpindah menuju semikonduktor tipe-p, Hasil perpindahan elektron dan *hole* ini kemudian membentuk medan listrik.

Ketika cahaya matahari menyinari struktur p-n *junction* ini, medan listrik mendorong gerakan elektron ke kontak negatif, dan arus listrik pun tercipta. Sementara itu, *hole* bergerak ke arah kontak positif, menunggu kedatangan elektron untuk mengisi kekosongan tersebut, seperti yang dijelaskan dalam gambar berikut ini.



Gambar 2.4 Cara kerja sel surya (Hardani, 2020)

2.6 Jenis Sel Surya

Terdapat dua jenis sel surya, yaitu sebagai berikut :

1. Sel Surya *Monocrystalline*

Merupakan panel surya dengan efisiensi tertinggi yang didapat dengan menggunakan teknologi terbaru. Sel monocrystalline dipergunakan khusus untuk lokasi-lokasi yang membutuhkan konsumsi listrik besar, terutama di daerah-daerah dengan iklim ekstrim dan kondisi alam yang sangat keras. Efisiensi sel monocrystalline berkisar antara 16 hingga 19%. Namun, panel jenis ini memiliki kelemahan yaitu tidak beroperasi dengan baik di tempat-tempat yang memiliki cahaya matahari yang kurang (seperti area teduh), serta efisiensinya akan mengalami penurunan drastis dalam kondisi cuaca berawan (Purwoto dkk., 2018).



Gambar 2.5 Panel Surya *Monocrystalline*

2. Sel Surya *Polycrystalline*

Pembuatan *solar panel polycrystalline* lebih sederhana dibandingkan dengan *monocrystalline*, dengan demikian harganya lebih terjangkau di pasaran. Jenis solar panel polycrystalline dapat menyerap energi dengan baik dalam kondisi cuaca mendung atau berawan. Namun, kekurangan dari solar panel jenis *polycrystalline* adalah efisiensi yang lebih rendah, yaitu sekitar 13% hingga 17% (Fadilla dkk., 2020).



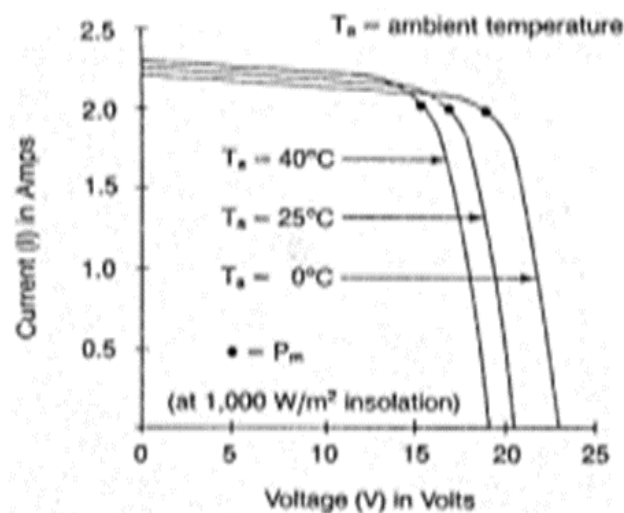
Gambar 2.6 Panel Surya *Polycrystalline*

2.7 Faktor Pengoperasian Sel Surya

Untuk mencapai nilai maksimum dalam pengoperasian sel surya, faktor-faktor berikut perlu diperhatikan:

1. *Air Temperature*

Penting untuk menjaga suhu sel surya tetap dalam kondisi normal, yakni sekitar 25°C. Jika suhu sel surya melebihi nilai normal, hal ini dapat menyebabkan pelemahan tegangan sirkuit terbuka (V_{oc}). Setiap kenaikan suhu sel surya sebesar 1°C di atas 25°C dapat menyebabkan pengurangan 0,4% total daya yang dikeluarkan atau secara keseluruhan setiap kenaikan suhu sel surya sebesar 10°C dapat mengakibatkan penurunan kinerja sel surya sekitar dua kali lipat.



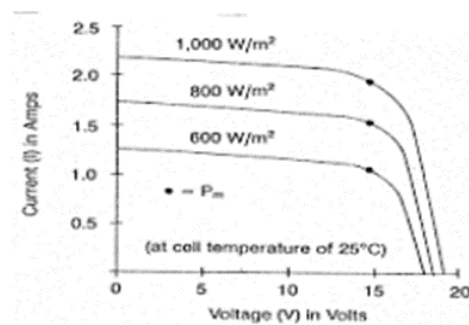
Gambar 2.7 Pengaruh Temperatur Udara Pada Tegangan (Hardani, 2020)

2. Radiasi Matahari (*Insolation*)

Radiasi matahari atau insolasi di berbagai lokasi bumi bervariasi tergantung pada kondisi iklim dan spektrum sinar matahari yang mencapai permukaan bumi. Tingkat radiasi matahari akan memiliki pengaruh besar pada arus (I) yang

dihasilkan oleh sel surya, sedangkan pengaruhnya terhadap tegangan (V) relatif lebih kecil.

Dengan kata lain, tingkat radiasi matahari yang tinggi akan menyebabkan sel surya menghasilkan arus yang lebih besar, sementara tegangan yang dihasilkan hanya sedikit dipengaruhi oleh radiasi matahari. Faktor ini perlu diperhatikan karena ketika sel surya berada di tempat dengan tingkat radiasi matahari rendah, daya yang dihasilkan juga akan berkurang meskipun tegangan masih relatif stabil. Oleh karena itu, untuk mendapatkan nilai maksimum dari sel surya, penting untuk memperhatikan tingkat radiasi matahari di lokasi pengoperasian.



Gambar 2.8 Pengaruh Radiasi Matahari Pada Arus (Hardani, 2020)

3. Kecepatan Angin Bertiup

Ketika angin bertiup, udara sejuk dapat membawa panas dari permukaan sel surya, sehingga mencegah sel surya dari kelebihan panas yang dapat mengurangi efisiensi mereka. Namun, perlu diingat bahwa tingginya kecepatan angin juga bisa menimbulkan kerusakan sel surya, jadi perhatikan batas aman untuk kecepatan angin.

4. Kondisi Atmosfer Bumi

Mendung, berawan, kabut, jumlah partikel debu, polusi, uap air dan asap

akan berpengaruh pada produksi listrik maksimum dari deretan sel surya. Kondisi-kondisi ini dapat memblokir sebagian radiasi matahari yang mencapai sel surya, mengurangi jumlah cahaya yang diserap, dan akibatnya, mengurangi arus listrik yang dihasilkan oleh sel surya.

5. Orientasi Panel

Orientasi dan sudut dari rangkaian sel surya terhadap matahari sangat penting untuk mencapai produksi energi maksimum. Rangkaian sel surya sebaiknya diorientasikan secara optimal menghadap matahari agar mendapatkan sinar matahari yang maksimum sepanjang hari. Di lokasi dengan belahan utara latitude, penempatan sel surya sebaiknya menghadap ke arah selatan agar dapat menyerap sinar matahari secara optimal. Orientasi ke arah timur atau barat dapat mengurangi jumlah sinar matahari yang diterima oleh sel surya.

6. Posisi Sel Surya terhadap Matahari

Penting untuk memastikan sinar matahari tiba secara vertikal pada permukaan panel surya. Ketika sinar matahari datang secara tegak lurus, intensitasnya mencapai nilai maksimum sekitar 1000 W/m^2 atau 1kW/m^2 , yang akan menghasilkan energi maksimum pada sel surya. Posisi sel surya yang optimal terhadap matahari memungkinkan penyerapan sinar matahari yang lebih efisien dan meningkatkan produksi listrik dari sel surya tersebut.

2.8 Efisiensi Panel Surya

Perhitungan efisiensi panel surya didapatkan melalui pembagian antara daya *output* maksimum (P_m) oleh *input* cahaya (E) dan luas permukaan sel surya (A_c) seperti yang tercantum dalam persamaan (2.2) (Rumbayan, 2020).

$$\eta = P_m / (E \times A_c) \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan :

η : Maksimum Efisiensi (%)

P_m : Keluaran daya maksimal (Watt)

E : *Incident Radiation Flux* (W/m^2)

A_c : *Area of Collector* (m^2)

Pada umumnya, efisiensi panel surya berkisar antara 20-30%. Ini berarti hanya sekitar 20-30% energi cahaya yang diterima panel surya yang dapat diubah menjadi daya listrik. Sisanya, sekitar 70-80%, dipantulkan kembali ke lingkungan.

2.9 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

PLTS merupakan sistem pembangkitan listrik yang memanfaatkan cahaya matahari dengan mengkonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik. Energi listrik yang dibangkitkan dapat langsung dipergunakan untuk berbagai keperluan atau disimpan dalam baterai untuk penggunaan di masa yang akan datang (Rumbayan, 2020).

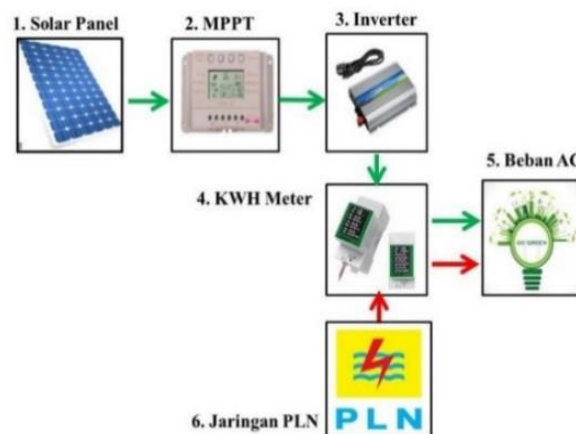
PLTS dibedakan menjadi dua jenis yaitu terintegrasi atau *On-grid* dan independen atau *Off-grid*.

1. PLTS *On grid*

Energi keluaran modul fotovoltaik diubah menjadi listrik AC dan dialirkan ke perangkat listrik AC seperti yang ada di rumah atau kantor. Yang membedakan sistem PLTS jenis *On-grid* ini adalah koneksi langsung dengan jaringan distribusi listrik PLN (Perusahaan Listrik Negara), dengan demikian, energi yang dihasilkan dapat dialirkan ke jaringan listrik milik PLN, dan dalam situasi di mana produksi

energi listrik melebihi kebutuhan, kelebihan energi tersebut bisa diekspor kembali ke jaringan listrik PLN. Inverter sangat penting dalam sistem ini karena berfungsi untuk mendeteksi gangguan dan mengontrol tegangan apabila terjadi perubahan tegangan pada beban dan sumber.

Keuntungan dari sistem PLTS jenis *On-grid* adalah dapat memanfaatkan dan mengalirkan energi listrik langsung ke jaringan distribusi PLN, sehingga tidak memerlukan penyimpanan energi dalam baterai. Komponen-komponen kelistrikan dalam sistem PLTS *On-grid* meliputi sel surya, inverter, panel distribusi, relay, MCB (Miniature Circuit Breaker), kabel penghantar, dan beban. Skema kelistrikan sistem PLTS *On-grid* bisa diamati dalam ilustrasi Gambar 2.9 (Nugroho dkk., 2022).



Gambar 2.9 Skema kelistrikan *On grid*
(Nugroho dkk., 2022)

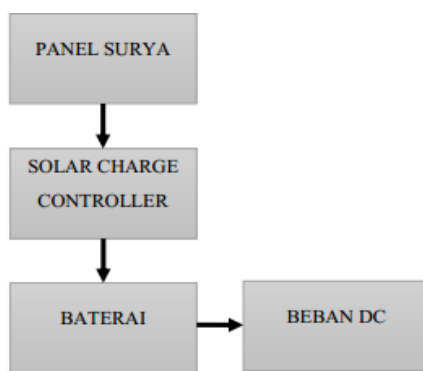
2. PLTS *Off Grid*

Sistem *off-grid* yaitu sistem pembangkit listrik yang beroperasi secara independen dan tidak terhubung dengan jaringan listrik milik Perusahaan Listrik Negara (PLN). Selama siang hari, panel surya akan menghasilkan listrik secara langsung untuk memenuhi kebutuhan daya yang diperlukan. Selain itu, kelebihan

energi listrik dipergunakan untuk pengisian baterai. Pada malam hari atau saat cahaya matahari tidak mencukupi, baterai akan menyuplai listrik ke beban.

Keuntungan dari sistem *Off-grid* adalah kemampuannya untuk menyediakan listrik setiap saat karena memiliki baterai sebagai penyimpan energi. Sistem ini lebih mandiri dan tidak memerlukan koneksi dengan jaringan distribusi listrik PLN. Selain itu, pemasangan sistem ini tidak memerlukan izin khusus dari PLN karena tidak ada koneksi langsung dengan jaringan listrik PLN.

Komponen-komponen kelistrikan dalam sistem *Off-grid* meliputi sel surya, *solar charge controller* (SCC), baterai, relay, *Miniature Circuit Breaker* (MCB), kabel penghantar, dan beban. Skema kelistrikan *Off-grid* dapat dilihat pada gambar 2.10. Dengan menggunakan sistem *Off-grid*, rumah atau tempat lain yang terpencil atau sulit dijangkau oleh jaringan listrik PLN tetap dapat memiliki pasokan listrik yang handal.



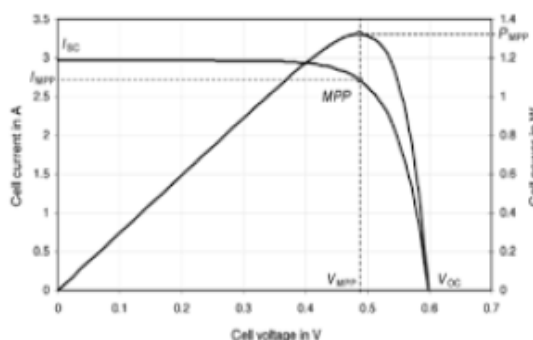
Gambar 2.10 Skema kelistrikan *Off Grid* (Nugroho dkk., 2022)

2.10 Karakteristik Modul *Photovoltaic*

Daya yang dibangkitkan panel surya dipengaruhi oleh kapasitas panel surya dalam menghasilkan tegangan dan arus saat berbeban. Hal ini tergambarkan pada karakteristik kurva (I-V) dan (P-V) seperti yang diilustrasikan dalam Gambar 2.11.

Kurva I-V menggambarkan kondisi operasi normal dari panel surya. (Wirsuyana dkk., 2022). Pada kurva I-V, terdapat tiga poin penting yang perlu diperhatikan:

1. Titik Daya Maksimum (Maximum Power Point, V_{mp} dan I_{mp}): Ini adalah titik operasional di mana panel surya menghasilkan daya maksimum saat beroperasi. Pada titik ini, nilai tegangan (V_{mp}) dan arus (I_{mp}) mencapai nilai maksimum.
2. Tegangan Sirkuit Terbuka (*Open Circuit Voltage*, V_{oc}): Ini merujuk pada nilai tegangan maksimum yang dapat diperoleh oleh panel surya ketika arusnya tidak mengalir ($I=0$).
3. Arus Korsuit (Short Circuit Current, I_{sc}): Ini merujuk pada arus maksimum yang dihasilkan oleh panel surya ketika tegangan pada panel adalah nol ($V=0$).



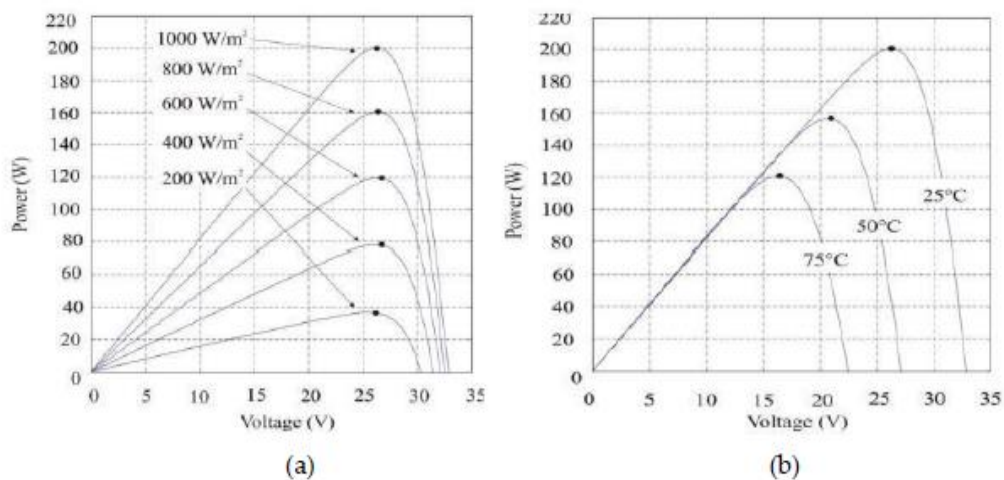
Gambar 2.11 Kurva karakteristik *Photovoltaic* (PV) Kondisi Normal (Wirsuyana dkk., 2022)

Selain itu terdapat beberapa faktor lain yang berperan dalam mempengaruhi besarnya tegangan keluaran panel surya, seperti kondisi temperatur sekitar dan kuatnya radiasi matahari. Intensitas cahaya matahari pada permukaan panel surya mempengaruhi arus output. Intensitas cahaya matahari berbanding lurus dengan arus output sel surya. Radiasi matahari yang tinggi memang memiliki dampak yang signifikan terhadap daya yang dibangkitkan dari panel surya. Pada saat intensitas

cahaya matahari semakin tinggi cenderung membuat daya keluaran panel surya mendekati nilai maksimalnya.

Selain itu, temperatur sel surya juga mempengaruhi kinerja panel surya. Panel surya beroperasi secara optimal pada temperatur sekitar 25°C . Ketika suhu naik melebihi 25°C , tegangan output (V_{oc}) panel surya akan melemah. Setiap kenaikan suhu sebesar 1°C di atas suhu referensi 25°C akan menyebabkan penurunan hingga 0,4% dari total dayanya. Penurunan ini akan mengalami peningkatan yang berlipat ganda setiap kenaikan temperatur sebesar 10°C .

Grafik pada Gambar 2.12a dan 2.12b memperlihatkan perbandingan kurva karakteristik dari panel surya pada berbagai nilai iradiasi matahari dan suhu yang berbeda, dan mempengaruhi energi yang diproduksi oleh panel surya.



Gambar 2.12 Kurva karakteristik *Photovoltaic* (PV)
2.12 (a) iradiasi berbeda 2.12 (b) temperatur berbeda (Wirsuyana dkk., 2022)

2.11 *Solar Charge Controller*

Solar Charge Controller merupakan perangkat yang berfungsi mengontrol aliran listrik yang masuk dan keluar dari baterai pada sistem PLTS. Fungsinya adalah untuk melindungi baterai dari *overcharging* (pengisian berlebihan) dan *over*

discharge (pemakaian berlebihan), yang bisa mempersingkat masa pakai baterai (Priajana dkk., 2020).

Solar Charge Controller pada Gambar 2.13 mengaplikasikan *Pulse Width Modulation* (PWM) dalam proses pengaturan penambahan daya baterai dan penyediaan aliran listrik ke perangkat. Teknologi PWM proses pengaturan arus masuk pada baterai dengan cara mengontrol lebar pulsa sinyal listrik yang diberikan ke baterai. Dengan cara ini, *Solar Charge Controller* dapat menjaga agar tegangan baterai tetap stabil dan mencegah terjadinya *overcharging* yang dapat merusak baterai. Selain itu, ketika daya baterai digunakan untuk menyuplai beban, *Solar Charge Controller* juga mengatur pelepasan arus dengan tepat, sehingga mencegah *over discharge* yang dapat merusak baterai. Dengan adanya *Solar Charge Controller*, baterai pada sistem PLTS dapat dijaga dalam kondisi yang optimal, sehingga umur baterai dapat diperpanjang dan performa sistem PLTS tetap maksimal.



Gambar 2.13 *Solar Charge Controller*

2.12 Baterai

Dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), baterai memiliki peran krusial dalam menyimpan daya lebih dari panel surya saat beban listrik

rendah, serta memberikan suplai daya ke beban ketika energi dari panel surya tidak mencukupi. Kapasitas baterai diukur dalam satuan Ampere-Jam (Ah). Sedangkan daya tampung baterai (Ah) dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$\text{Daya tampung baterai (Ah)} = E_k / (V \times \text{PF}) \dots \dots \dots (2.3)$$

Dalam rumus tersebut, kebutuhan energi beban (E_k) adalah total energi yang dibutuhkan oleh perangkat, tegangan baterai (V) adalah tegangan baterai yang digunakan, umumnya 12 volt, dan faktor daya (PF) adalah faktor yang digunakan untuk menghitung daya aktif yang dikonsumsi oleh beban, biasanya memiliki nilai sekitar 0,90.

Selain itu, dalam penggunaan baterai, *Depth of Discharge* (DOD) mengacu pada sejauh mana baterai di-*discharge* sebelum diisi ulang. Secara umum, baterai *deep cycle* dapat digunakan hingga tingkat DOD sekitar setengah dari kapasitas totalnya. Oleh karena itu, ketika menghitung nilai Ah (Ampere-hour) dari baterai, nilai tersebut sebaiknya dikalikan dengan faktor 2 (Prayogo, 2019). Dengan demikian, kapasitas baterai dapat dihitung dengan rumus :

$$\text{Kapasitas Baterai} = 2 \times \text{Ah yang diperlukan} \dots \dots \dots (2.4)$$

2.13 Inverter

PLTS memerlukan inverter untuk mengonversi tenaga listrik DC dari panel surya menjadi tenaga listrik AC yang diperlukan untuk menyediakan daya kepada perangkat yang memerlukan listrik AC. Terdapat dua jenis konfigurasi umum dalam PLTS, yaitu sistem yang beroperasi secara independen (*mandiri/isolated*) dan sistem yang terhubung ke jaringan (*grid-connected*).

Dalam sistem PLTS yang beroperasi secara *independen* tanpa koneksi ke ja

ringan listrik (*isolated/mandiri*), inverter tipe *stand-alone (off-grid inverter)* digunakan. Inverter ini berfungsi secara *independen* dan tidak terhubung dengan jaringan listrik milik Perusahaan Listrik Negara (PLN). Daya listrik yang dihasilkan oleh inverter sesuai dengan permintaan daya oleh beban peralatan berbasis arus bolak-balik (AC). Sistem PLTS yang beroperasi secara mandiri umumnya dilengkapi dengan baterai yang memiliki fungsi menyimpan kelebihan daya saat kebutuhan beban rendah dan juga bisa memberikan suplai daya tambahan bersamaan dengan *output* daya dari panel surya ketika beban listrik memerlukan daya yang lebih tinggi.

Pada sistem PLTS yang terhubung ke jaringan listrik PLN, digunakan inverter tipe *on-grid*. Inverter ini memiliki kemampuan untuk disinkronkan dengan jaringan dan memungkinkan daya yang dihasilkannya dapat disalurkan ke jaringan PLN. Daya output dari inverter *on-grid* tidak bergantung pada beban yang terhubung, melainkan sesuai dengan daya yang dikeluarkan panel surya saat itu. Inverter jenis *on-grid* umumnya dilengkapi dengan modul pelacakan titik daya maksimum (MPPT) untuk memastikan produksi daya maksimal sejalan dengan potensi radiasi matahari pada waktu tertentu. Inverter jenis ini tidak membutuhkan baterai dan kompensasi fluktuasi daya dari sumber matahari dan beban diatur oleh jaringan PLN.

Ada juga inverter jenis *on/off-grid tie inverter* yang merupakan gabungan dari kedua jenis inverter sebelumnya. Inverter ini bisa sebagai inverter *off-grid* maupun *on-grid*. Ketika pasokan listrik dari jaringan PLN tersedia, inverter jenis ini akan berperan sebagai inverter *on-grid* dan dapat mengurangi konsumsi listrik dari PLN dengan mengalirkan daya ke dalam jaringan. Namun, ketika terjadi

pemadaman listrik dari jaringan PLN, inverter akan beralih ke mode inverter *off-grid*. Dalam mode ini, inverter akan mengalirkan daya dari panel surya dan menggunakan energi yang tersimpan di baterai untuk memenuhi kebutuhan daya perangkat dan beban listrik.

Namun, inverter jenis *on/off-grid tie* ini tidak dilengkapi dengan sistem kontrol penyimpanan daya pada baterai. Ketika beroperasi sebagai inverter *on-grid*, baterai seharusnya terputus dari *inverter* untuk mencegah terjadinya pemakaian berlebihan, karena daya *output* inverter saat dalam mode *on-grid* berfungsi dengan efisiensi maksimal melalui teknologi MPPT. Di sisi lain, saat beroperasi sebagai inverter *off-grid*, penting bahwa baterai tetap terhubung dengan inverter agar keluaran dayanya tetap stabil. Hal ini dilakukan karena terdapat fluktuasi pada sumber daya dan beban peralatan berbasis arus bolak-balik (AC) (Prayogo, 2019).