

BAB II **TINJAUAN PUSTAKA**

2.1 Hidroponik

Hidroponik (*hydroponic*) berasal dari bahasa Yunani yang memiliki dua kata, yaitu *hydro* yang berarti air dan *ponos* yang memiliki makna daya atau kerja. Jadi dapat kita pahami bahwa hidroponik berarti bercocok tanam dengan memanfaatkan air. Seiring perkembangan zaman, jika semula hidroponik hanya diartikan sebagai sistem budidaya tanaman yang mengandalkan air, saat ini hidroponik berkembang menjadi (*soilless sculture*) bercocok tanam tanpa tanah. Hidroponik teknik bercocok tanam dengan menekankan pada pemenuhan kebutuhan nutrisi bagi tanaman, atau dalam pengertian sehari-hari bercocok tanam tanpa tanah. Dari pengertian ini terlihat bahwa munculnya teknik bertanam secara hidroponik diawali oleh semakin tingginya perhatian manusia akan pentingnya kebutuhan pupuk bagi tanaman.



Gambar 2. Contoh Tanaman Hidroponik
Sumber: Hidroponik PLN Jakabring

2.2 Greenhouse

Greenhouse adalah sebuah bangunan yang dibentuk untuk menghindari dan merawat tanaman terhadap berbagai macam cuaca. Jenis tanaman yang tidak sesuai

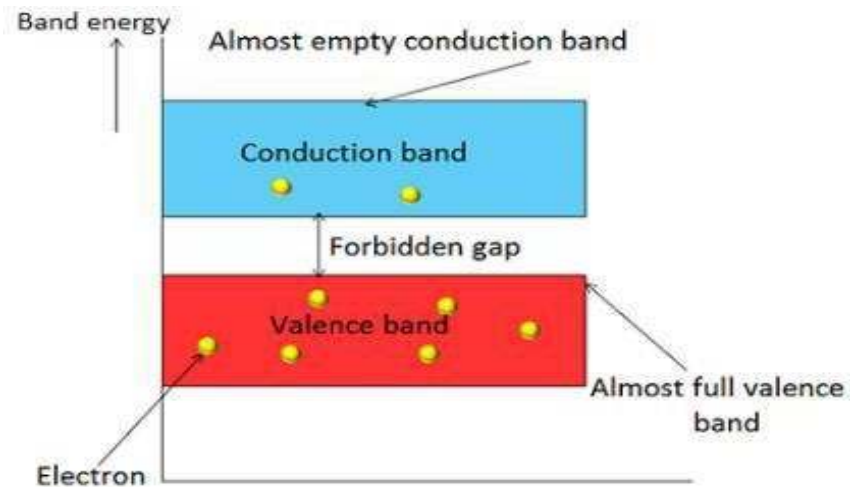
dengan iklim lokal seperti, tanaman hias, sayuran dan buah yang bernilai ekonomi tinggi namun sulit dibudidayakan di lahan luar dapat dibudidayakan melalui pengendalian iklim didalam *greenhouse*. Berbagai manfaat seperti Pengendalian suhu udara, pengaturan tingkat kelembaban, hingga jeda antar waktu penyiraman dapat disesuaikan dengan mudah.



Gambar 3. *Greenhouse* Hidroponik

2.3 Semikonduktor

Bahan yang memiliki konduktivitas listrik antara konduktor dan isolator disebut sebagai semikonduktor. *Silikon* (Si) dan *Germanium* (Ge) adalah beberapa contoh bahan semikonduktor. Semikonduktor adalah fondasi elektronik modern, bahan pembuatan transistor, LED, PV sel, IC dan lain-lain.



Gambar 4. *Energy Band* atau Pita Energi Semikonduktor

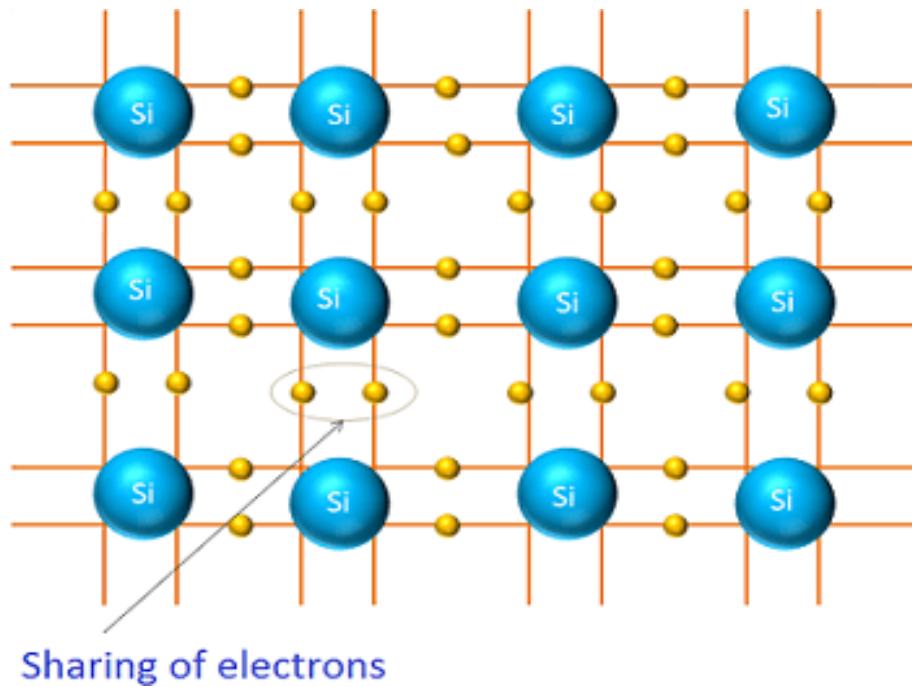
Valence band atau pita valensi adalah energi yang terbentuk dengan mengelompokkan level energi dari elektron valensi atau elektron orbital terluar. Elektron dalam pita valensi memiliki energi yang lebih rendah dari pada elektron dalam pita konduksi. Elektron yang berada dalam pita valensi terikat secara longgar ke inti atom.

Conduction band atau pita konduksi adalah energi yang terbentuk dengan mengelompokkan level energi dari elektron bebas. Umumnya pita konduksi ini kosong, tetapi ketika energi eksternal diberikan elektron dalam pita valensi melompat ke pita konduksi dan menjadi elektron bebas. Elektron pada pita konduksi memiliki energi yang lebih tinggi daripada elektron dalam pita valensi. Elektron yang berada dalam pita konduksi tidak terikat ke inti atom.

Forbidden gap adalah celah energi yang ada di antara pita valensi dan pita konduksi. Energi ini disebut *forbidden gap* dan diukur dalam satuan elektron V (eV), dimana $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$. Energi eksternal dalam bentuk panas atau cahaya harus sama atau lebih besar dengan *forbidden gap* untuk menggerakkan elektron dari pita valensi ke pita konduksi. Pada semikonduktor, *Forbidden gap* antara pita valensi dan pita konduksi sangat kecil yaitu sekitar 1 eV.

2.4 Semikonduktor Intrinsik

Solar sel atau photovoltaik sel atau PV sel biasanya terbuat dari bahan silikon. Susunan atom silikon terdiri dari atom Valensi empat. Pada kristal silikon, dua elektron dari atom yang berdekatan membentuk pasangan dalam setiap kristal. Pada keadaan ini kristal silikon masih belum dapat menghantarkan listrik, karena tidak ada elektron bebas yang tersedia untuk membawa muatan. Semikonduktor ini disebut semikonduktor intrinsik atau semikonduktor murni.



Gambar 5. Ikatan kovalen atom silicon

2.5 Pengaruh Panas pada Semikonduktor

Pada suhu nol absolut, semua elektron valensi bergerak mengelilingi inti atom. Oleh karena itu tidak ada elektron bebas di pita konduksi yang dapat membawa arus listrik dari satu tempat ke tempat lain. Pada suhu nol ini semikonduktor berperilaku sebagai isolator sempurna.

Jika suhu atau energi panas semakin meningkat pada semikonduktor maka semakin banyak elektron valensi yang memperoleh cukup energi untuk memutuskan ikatan dengan inti atom dan melompat ke pita konduksi. Hal ini menghasilkan peningkatan jumlah elektron bebas di pita konduksi. Jika lebih lagi banyak jumlah elektron yang meninggalkan pita valensi dan melompat ke pita konduksi maka lebih

banyak jumlah hole yang terbentuk di pita valensi. Peningkatan kecil panas dapat menghasilkan lebih banyak jumlah pembawa muatan (*electron* dan *hole*).

Kenaikan suhu dapat meningkatkan getaran atom di semikonduktor. Getaran atom dalam semikonduktor mempengaruhi elektron dan menyebabkan sejumlah besar elektron mengalir bebas dari satu tempat ke tempat lain. Sehingga terjadi peningkatan aliran arus di semikonduktor. Peningkatan aliran arus berarti penurunan resistensi. Arus listrik di semikonduktor meningkat dengan kenaikan suhu atau resistansi semikonduktor semakin menurun dengan kenaikan suhu. Semikonduktor mempunyai koefisien suhu negatif [12].

2.6 Pengaruh Cahaya pada Semikonduktor

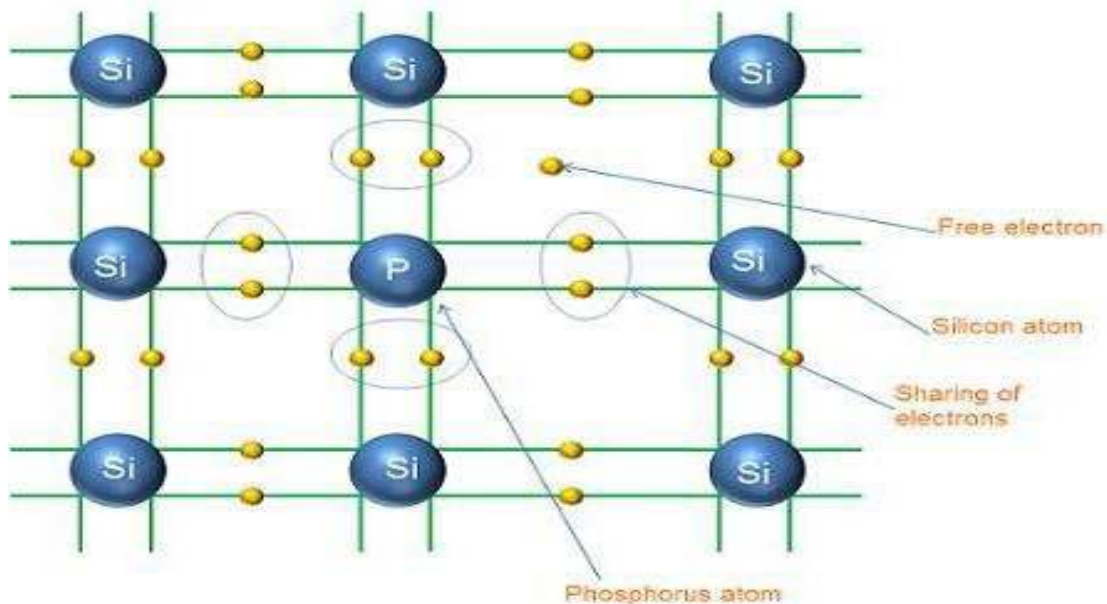
Pengaruh cahaya pada semikonduktor hampir sama dengan pengaruh panas pada semikonduktor. Ketika sejumlah kecil energi eksternal dalam bentuk cahaya diterapkan ke semikonduktor, elektron valensi mendapatkan energi yang cukup untuk memutuskan ikatan dengan inti atom dan mereka melompat ke pita konduksi. Elektron pada pita konduksi sudah tidak berada pada inti atom. Karena itu elektron bergerak bebas dari satu tempat ke tempat lain. Elektron yang bergerak bebas dari satu tempat ke tempat lain di pita konduksi disebut sebagai elektron bebas. Ketika elektron meninggalkan pita valensi dan melompat ke pita konduksi terjadi kekosongan pada tempat yang ditinggalkan elektron. Kekosongan ini disebut sebagai hole. Dalam semikonduktor pasangan elektron bebas dan hole terbentuk pada saat yang bersamaan.

Jika energi cahaya yang diberikan pada semikonduktor semakin meningkat, maka semakin banyak elektron bebas yang dihasilkan. Peningkatan jumlah elektron bebas ini meningkatkan aliran arus dan menurunkan resistensi dalam semikonduktor. Arus listrik pada semikonduktor meningkat seiring dengan peningkatan energi cahaya [12].

2.7 Semikonduktor Tipe N

Bahan semikonduktor intrinsik (murni) yang diberi doping dengan bahan bervalensi lain maka diperoleh semikonduktor ekstrinsik. Pada bahan semikonduktor intrinsik, jumlah elektron bebas dan hole adalah sama. Konduktivitas semikonduktor intrinsik sangat rendah, karena terbatasnya jumlah pembawa muatan yaitu *hole* maupun

elektron bebas. Jika bahan silikon didoping dengan bahan ketidak murnian (impuritas) bervalensi lima (pentavalens), maka diperoleh semikonduktor tipe N. Bahan untuk doping yang bervalensi lima ini misalnya Arsen (Ar), dan Pospor (P). Struktur kristal bahan silikon tipe N dapat dilihat pada Gambar 6.

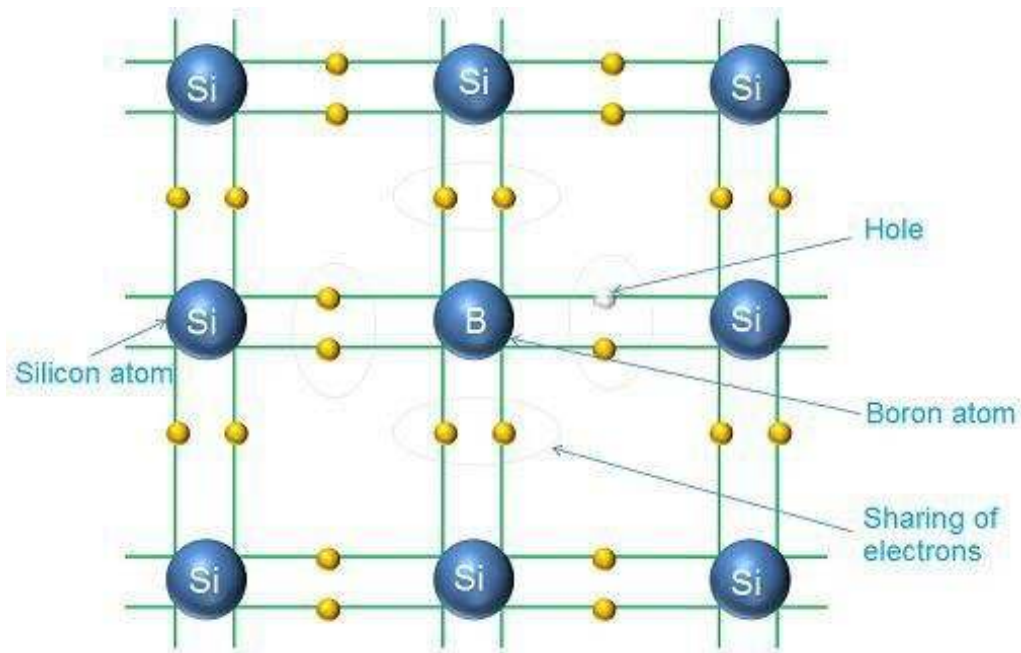


Gambar 6. Kristal silikon didoping dengan atom Pospor (P) bervalensi 5

Atom Pospor (P) adalah atom yang bervalensi lima, maka empat elektron valensi mendapatkan pasangan ikatan kovalen dengan atom silikon, sementara itu elektron valensi yang kelima tidak mendapatkan pasangan. Oleh karena itu ikatan elektron kelima ini dengan inti menjadi lemah dan mudah menjadi elektron bebas. Karena setiap atom depan ini menyumbang sebuah elektron, maka atom yang bervalensi lima disebut dengan atom donor. Dan elektron bebas sumbangan dari atom pendoping ini pun dapat dikontrol jumlahnya atau konsentrasinya.

2.8 Semikonduktor Tipe P

Bahan semikonduktor murni (intrinsik) didoping dengan bahan impuritas (ketidak-murnian) bervalensi tiga, maka akan diperoleh semikonduktor tipe P. Bahan pendoping yang bervalensi tiga tersebut misalnya Boron (B), Galium (Ga), dan Indium (In). Struktur kisi-kisi kristal semikonduktor (silikon) tipe P terlihat seperti Gambar 7.

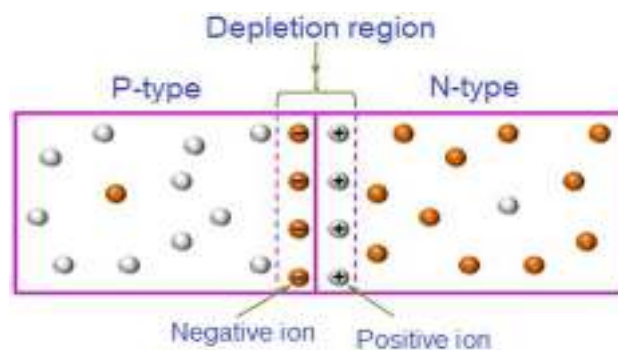


Gambar 7. Kristal Silikon didoping dengan atom Boron (B) bervalensi 3

Atom pendoping mempunyai tiga elektron valensi, dalam gambar 6 adalah atom Boron (B), maka hanya tiga ikatan kovalen yang dapat dipenuhi. Tempat yang seharusnya membentuk ikatan kovalen keempat menjadi kosong (membentuk *hole*) dan dapat ditempati oleh elektron valensi lain. Sebuah atom bervalensi tiga akan menyumbangkan sebuah *hole*. Atom bervalensi tiga (trivalent) disebut juga atom akseptor, karena atom ini siap untuk menerima elektron.

2.9 P-N Junction

Semikonduktor tipe P digabung dengan semikonduktor tipe N, terbentuklah suatu sambungan P-N. Daerah di mana semikonduktor tipe P dan tipe N bergabung disebut P-N *Junction*. P-N *Junction* ini memisahkan semikonduktor tipe P dan semikonduktor tipe N seperti terlihat seperti pada Gambar 8.



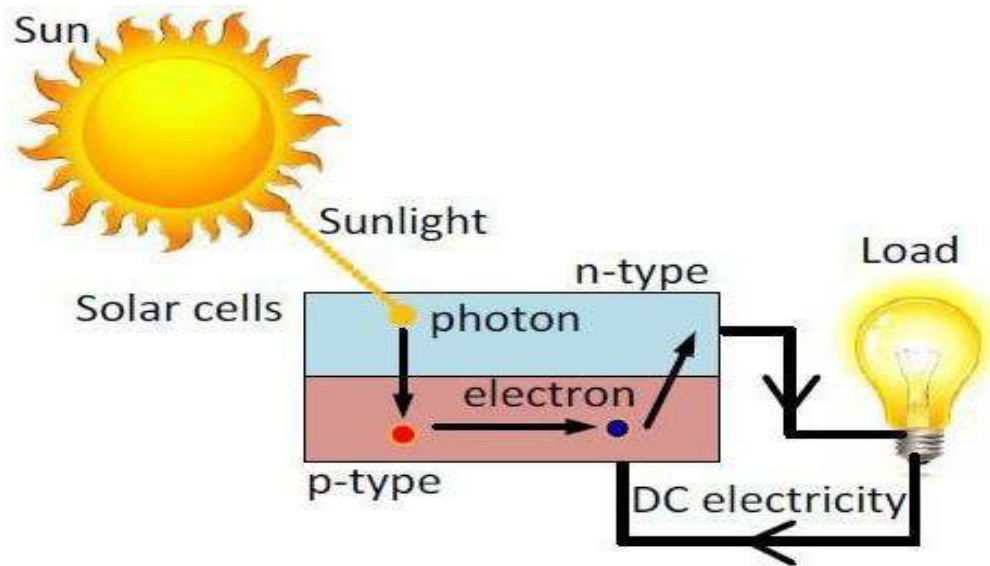
Gambar 8. P-N *Junction* dan terbentuknya *depletion layer*

Semikonduktor tipe N, pembawa muatan mayoritas adalah elektron bebas dan mencoba untuk bergerak dari daerah konsentrasi elektron tinggi (sisi N) ke daerah konsentrasi elektron rendah (sisi P). Di dekat P-N *junction* ini, elektron bebas dan *hole* saling berdekatan. Sementara itu disisi semikonduktor tipe P, pembawa muatan mayoritas adalah *hole* dan mencoba untuk bergerak dari daerah konsentrasi hole tinggi (sisi P) ke daerah konsentrasi *hole* rendah (sisi P). Pergerakan elektron dan *hole* ini menyebabkan terjadinya suatu daerah yang dinamakan *depletion layer* [12].

2.10 Efek Photovoltaik

Efek photovoltaik atau *photovoltaic effect* adalah proses yang dapat menghasilkan tegangan atau arus listrik dalam sel *photovoltaic* atau PV sel ketika terkena sinar matahari. Beberapa PV sel disusun membentuk suatu PV panel. Efek photovoltaik inilah yang membuat PV panel menjadi sangat penting, karena di sinilah sel-sel di dalam PV panel mengubah sinar matahari menjadi energi listrik. Efek photovoltaik pertama kali ditemukan pada tahun 1839 oleh Edmond Becquerel. Ketika melakukan eksperimen yang melibatkan sel-sel basah, dia mencatat bahwa tegangan sel meningkat ketika piring peraknya terkena sinar matahari [13].

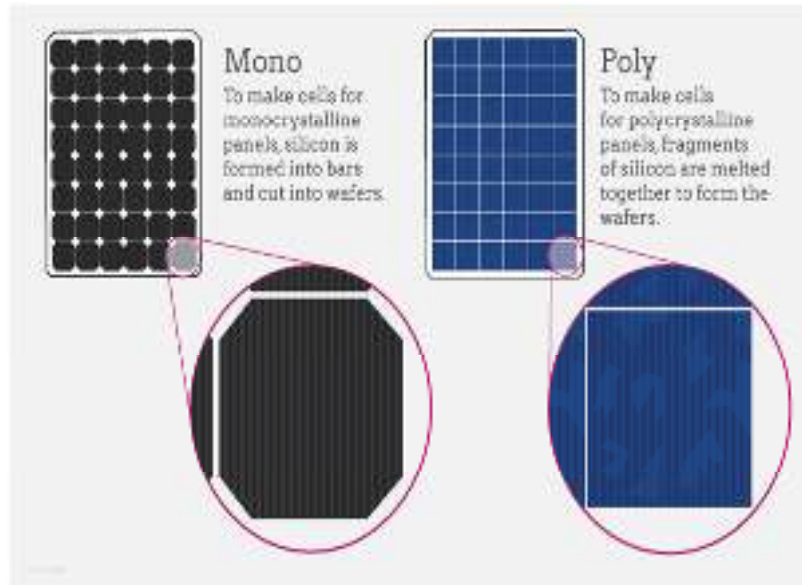
Cahaya terdiri dari foton, yang berisi sedikit radiasi elektromagnetik atau energi. Foton ini dapat diserap oleh sel photovoltaik, yaitu jenis sel yang menyusun PV panel. Ketika cahaya yang panjang gelombangnya sesuai mengenai sel-sel ini, energi dari foton di transfer ke atom semikonduktor di P-N *junction*. Ini menyebabkan elektron melompat ke keadaan energi yang lebih tinggi yang dikenal sebagai pita konduksi. Ini meninggalkan *hole* di pita valensi yang dilompati elektron. Pergerakan elektron ini menghasilkan energi tambahan menciptakan dua pembawa muatan, pasangan elektron-*hole*. Pergerakan elektron ini menyebabkan timbulnya arus listrik DC, seperti yang terlihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Efek photovoltaic

2.11 PV Sel *Monocrystalline* dan *Polycrystalline*

Photovoltaik sel atau PV sel dapat merubah energi matahari menjadi energi listrik, PV sel adalah komponen utama dari PV panel. Saat ini PV panel yang sangat populer dan banyak dipergunakan di dunia adalah sel *monocrystalline* dan *polycrystalline*. Kedua sel tersebut terbuat dari silikon, merupakan bahan yang populer dan banyak terdapat di alam dan dapat bekerja serta bertahan sangat lama, ada perbedaan utama antara kedua jenis teknologi yang harus diketahui [14]. Secara bentuk dapat dengan mudah mengetahuinya hanya dengan melihat permukaan panelnya seperti yang terlihat pada berikut.



Gambar 10. PV panel *Monocrystalline* dan *Polycrystalline*

Proses pembuatan PV sel *monocrystalline*, yaitu silikon dibentuk menjadi batangan dan dipotong menjadi wafer. Jenis panel ini disebut "*monocrystalline*" yaitu silikon yang digunakan adalah silikon kristal tunggal. Karena sel terdiri dari kristal tunggal, elektron yang menghasilkan aliran listrik memiliki lebih banyak ruang untuk bergerak. Akibatnya, PV sel *monocrystalline* mempunyai efisiensi sedikit lebih baik daripada PV sel *polycrystalline*.

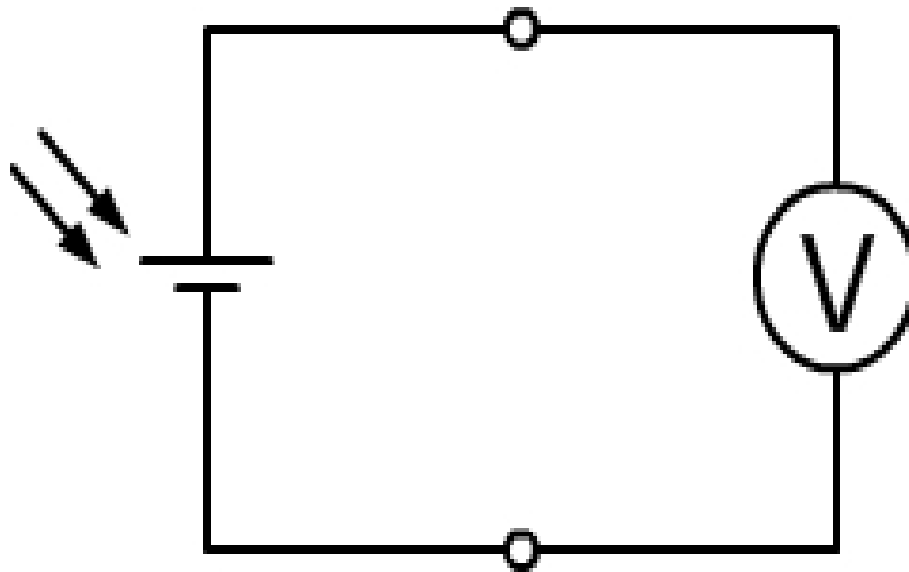
PV panel *polycrystalline* juga terbuat dari silikon. Namun pada proses pembuatan PV sel, potongan silikon dilelehkan bersama untuk membentuk *wafer* untuk panel. PV sel *polycrystalline* juga disebut sebagai "*multi-crystalline*," atau banyak kristal silikon. Karena banyak kristal di setiap sel, elektron lebih sulit untuk bergerak. Akibatnya PV sel *polycrystalline* memiliki efisiensi yang sedikit lebih rendah daripada PV sel *monocrystalline*. Berikut perbandingan PV panel *monocrystalline* dan *polycrystalline* dilihat dari parameter harga, efisiensi, bentuk dan warna serta lama waktu kerjanya seperti terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan PV panel *Monocrystalline* dan *Polycrystalline*

	<i>Monocrystalline</i>	<i>Polycrystalline</i>
Harga	Mahal	Lebih Murah
Efisiensi	Lebih efisien	Kurang efisien
Warna	Hitam	biru gelap
Bentuk sel	Persegi yang dipotong sudutnya	Persegi atau Persegi panjang
Umur operasi	Lebih 25 tahun	Lebih 25 tahun

2.12 Tegangan *Open-Circuit* (V_{oc})

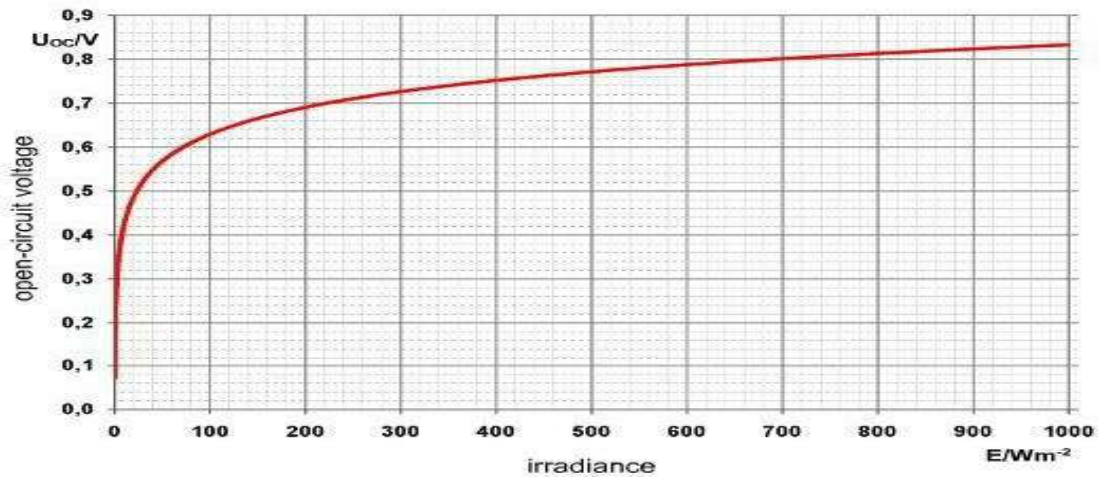
Tegangan *open-circuit* (V_{oc}) adalah tegangan *output* terminal PV panel pada saat tanpa beban atau arus sama dengan nol, pada saat ini tegangan *output* PV panel adalah yang terbesar [15]. Rangkaian pengganti PV panel seperti terlihat pada Gambar 10. Faktor-faktor yang mempengaruhi tegangan *open-circuit* (V_{oc}) adalah *irradiance* atau kuat radiasi matahari, sudut penyinaran dan suhu permukaan.



Gambar 11. Tegangan *open-circuit* V_{oc}

2.12.1 Radiasi matahari

Gambar 12 mengilustrasikan hubungan antara *irradiance*/kuat radiasi matahari dan tegangan *open-circuit* (V_{oc}) pada suatu PV panel [16].



Gambar 12. Hubungan antara *irradiance* dan *Voc*

Tegangan *open-circuit* (*Voc*) bukan merupakan fungsi linear dari radiasi matahari. Tegangan sudah mendekati tingkat maksimum pada saat radiasi matahari masih rendah.

2.12.2 Sudut Penyinaran

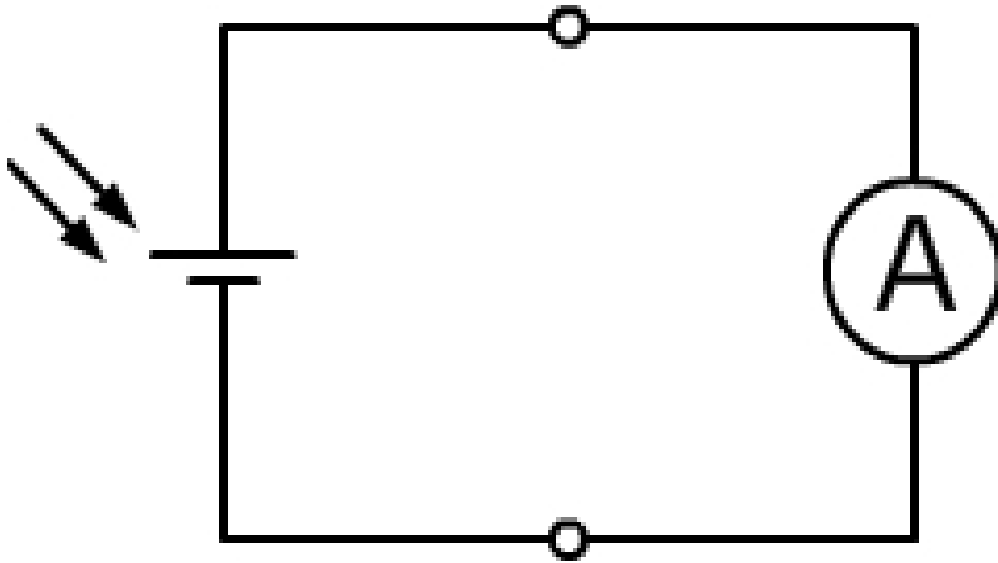
Tegangan *open-circuit* (*Voc*) sangat tergantung kepada sudut penyinaran sinar matahari yang mengenai permukaan panel surya. Tegangan akan maksimum pada saat arah sinar tegak lurus terhadap permukaan PV panel.

2.12.3 Suhu

Tegangan *open-circuit* (*Voc*) suatu PV panel memiliki koefisien suhu negatif, Pada saat PV panel menjadi hangat (misalnya saat terkena cahaya), tegangan *Voc* akan turun.

2.13 Arus Hubung Singkat (*Isc*)

Arus hubung singkat (*Isc*) adalah arus terbesar yang dapat di keluarkan pada sebuah PV panel. Arus ini diukur menggunakan sebuah Ampere meter dengan tahanan dalam yang sangat kecil yang terhubung langsung dengan terminal keluaran PV panel [16]. Gambar rangkaian penggantinya dapat digambarkan seperti pada Gambar 13.

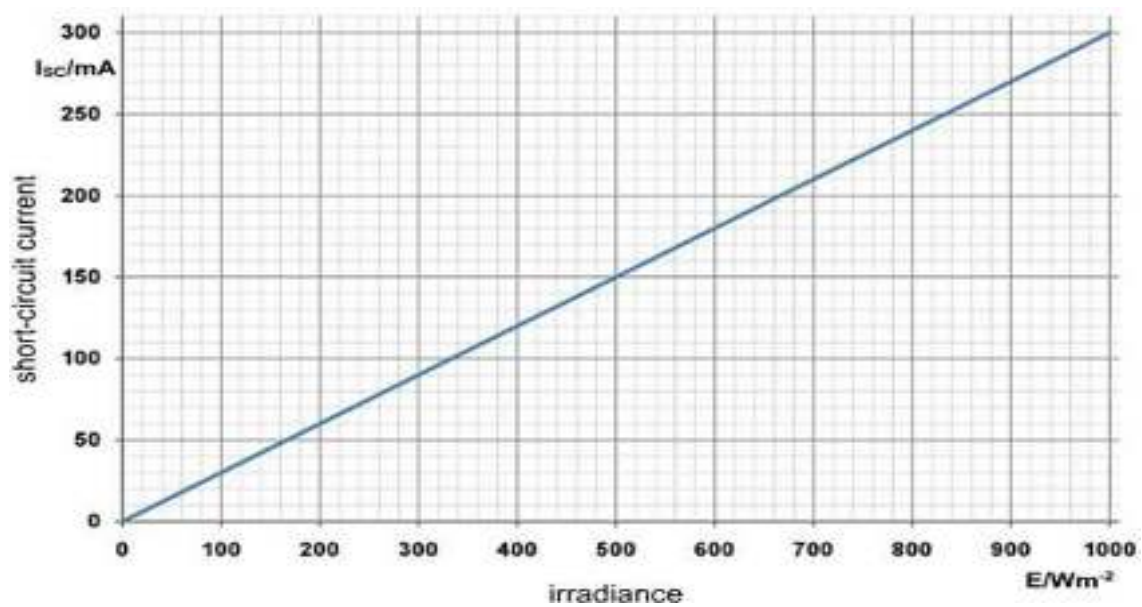


Gambar 13. Arus *short-circuit* I_{sc}

Faktor-faktor yang mempengaruhi Arus hubung singkat I_{sc} adalah irradianse atau kuat radiasi matahari, sudut penyinaran dan suhu permukaan.

2.13.1 Radiasi Matahari

Gambar 14. memperlihatkan hubungan antara *irradiance*/radiasi matahari dan Arus *short-circuit* (I_{sc}) pada suatu PV panel [16].



Gambar 14. Hubungan antara irradianse dan I_{sc}

Arus *short-circuit* (I_{sc}) merupakan fungsi linear dari radiasi. I_{sc} berbanding lurus dengan *irradiance* atau radiasi sinar matahari.

2.13.2 Sudut peninaran

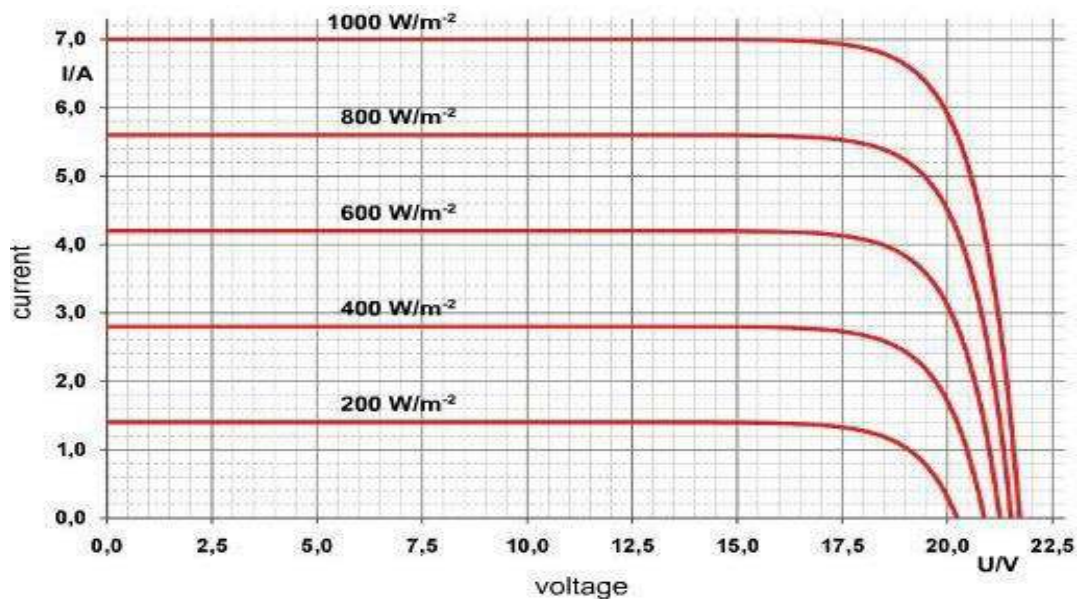
Arus *short-circuit* (I_{sc}) sebagai fungsi dari pengaruh sudut cahaya memperlihatkan bahwa I_{sc} akan mencapai nilai maksimum ketika cahaya berada tegak lurus di atas PV panel.

2.13.3 Suhu

Nilai pengukuran dari suhu yang tergantung pada arus *short-circuit* I_{sc} menunjukkan koefisien temperatur positif, panel surya yang dipanaskan I_{sc} akan naik.

2.14 Karakteristik PV Panel

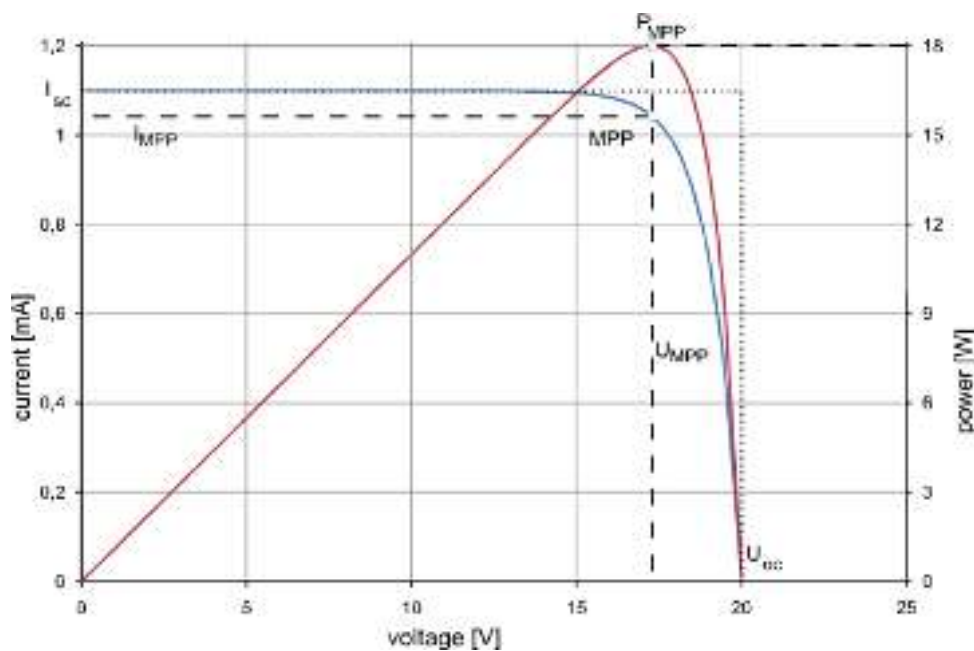
Antara dua titik operasi yang merepresentasikan tegangan *open-circuit* (V_{oc}) dan arus *short-circuit* (I_{sc}), memungkinkan untuk menentukan titik operasi lebih lanjut pada arus dan tegangan yang berbeda. Titik pengukuran bersama menghasilkan suatu karakteristik yang dinamakan *IV curve* atau kurva IV. Karakteristik ini ditentukan oleh berbagai arus dan tegangan. Karakteristik tersebut menjelaskan data yang sangat penting pada teknologi tenaga surya [16]. Gambar 15 menunjukkan karakteristik kurva IV dari sebuah PV panel pada berbagai level *irradiance* atau kuat radiasi matahari.



Gambar 15. Karakteristik PV Panel

2.15 Fill Factor (FF)

Daya *output* yang dapat diproduksi oleh suatu PV panel tidak hanya bergantung pada *irradiance* atau radiasi matahari, tetapi juga bagaimana kita menentukan titik yang tepat titik operasi tanpa beban dengan $I = 0$ mA dan titik operasi *short-circuit* dengan $V = 0$ V, dan menghasilkan power *output* P sesuai dengan rumus $P = V \times I$ harus mencapai nilai maksimum. Titik operasi ini disebut *Maximum Power Point* MPP [16]. Arus *short-circuit* I_{sc} dan tegangan *open-circuit* V_{oc} adalah arus dan tegangan maksimum masing-masing dari PV sel. Namun pada kedua titik operasi ini, power *output* dari panel surya adalah nol. *Fill Factor* atau disingkat FF, adalah parameter bersama V_{oc} dan I_{sc} , digunakan untuk menentukan daya maksimum dari PV sel. *Fill Factor* didefinisikan sebagai perbandingan daya maksimum dari PV sel (P_{MPP}) yang juga merupakan perkalian V_{MPP} dan I_{MPP} terhadap V_{oc} dan I_{sc} [15] seperti terlihat pada Gambar 16.



Gambar 16. *Fill Factor* (FF) dari suatu PV panel

2.16 Efisiensi

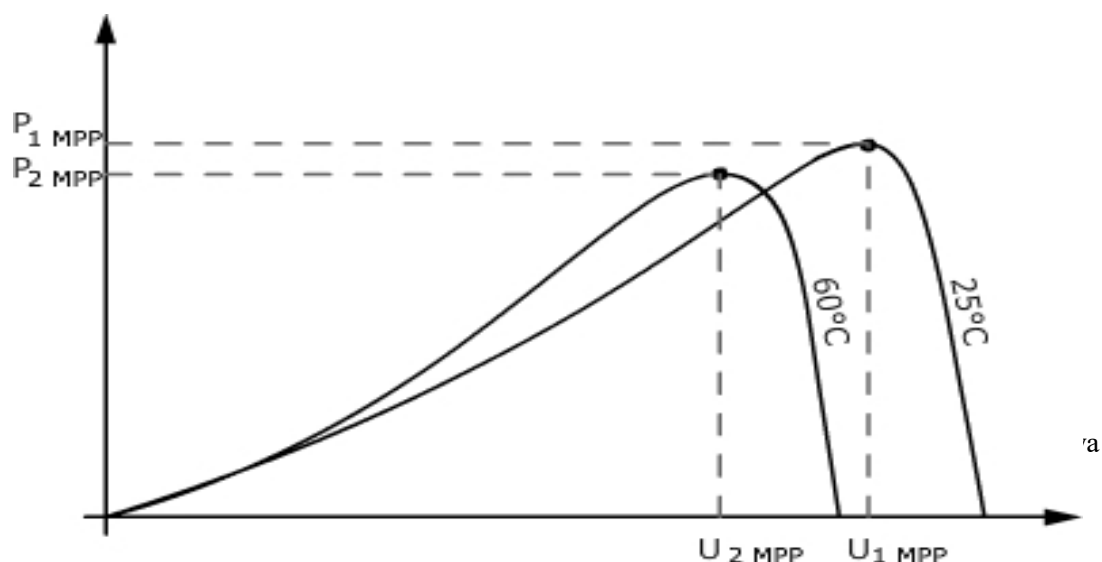
Untuk menentukan efisiensi suatu PV panel adalah dengan perbandingan daya maksimum *power point* P_{MPP} yang berupa perkalian FF dengan V_{MPP} dan I_{MPP} dengan *irradiance* atau radiasi matahari E , dan luas permukaan A dari PV panel.

2.17 Pengaruh Suhu pada PV Sel

PV sel dapat merubah langsung energi matahari menjadi energi listrik dengan efisiensi maksimum sekitar 9-12%, tergantung pada jenis PV sel. Lebih dari 80% radiasi matahari yang mencapai PV sel tidak semuanya dirubah menjadi energi listrik, sebagian dipantulkan dan sebagian lagi dirubah menjadi energi panas. Panas yang dihasilkan menyebabkan peningkatan suhu PV sel dan mengakibatkan penurunan efisiensi konversi energi listrik. Suhu tinggi memiliki efek negatif pada parameter output listrik PV sel. Efisiensi listrik dan daya output PV sel sangat tergantung pada suhu operasi, yang akan menurun dengan kenaikan suhu [17].

Seperti perangkat semikonduktor yang lain, PV sel juga sangat sensitif terhadap perubahan suhu. Kenaikan suhu akan mengurangi energi band gap semikonduktor. Penurunan *band gap* yang disebabkan kenaikan suhu dapat diartikan sebagai kenaikan energi elektron di material semikonduktor tersebut. Oleh karena itu kenaikan suhu akan menurunkan *band gap* material, sehingga dibutuhkan energi yang sedikit untuk menyebabkan perpindahan elektron. Pada PV sel yang sangat terpengaruh dengan kenaikan suhu adalah tegangan *open-circuit* V_{oc} [15]. Selain itu PV sel sangat tergantung pada parameter lingkungan, seperti radiasi matahari, kecepatan angin, kelembaban, debu dan suhu atmosfer. Suhu permukaan adalah parameter lingkungan utama yang mempengaruhi kinerja panel PV yang dapat mengubah parameter listriknya, seperti tegangan *open-circuit* (V_{oc}), arus *short-circuit* (I_{sc}), daya output maksimum (P_{max}) dan *Fill Factor* (FF) [18].

PV sel beroperasi di bawah paparan radiasi yang kuat, maka suhu PV panel akan naik melampaui suhu 25°C sesuai dengan *Standard Test Condition* (STC). Beberapa hasil pengukuran yang pernah dilakukan mengenai ketergantungan suhu terhadap daya PMPP ditunjukkan dalam Gambar 17.



Gambar 17. Pengaruh suhu terhadap VMPP dan PMPP

2.18 Pendinginan PV Panel

PV panel dapat menyerap energi matahari dan mengubahnya menjadi listrik. Tidak semua energi matahari ini menjadi energi listrik karena efisiensi PV panel tidak ada yang mencapai 100%. Sebagian besar energi ini diubah menjadi panas [19]. Panas yang terjadi pada panel akan menyebabkan penurunan efisiensi konversi energi listrik, sehingga permukaan panel harus didinginkan. Pendinginan PV panel yang sering dilakukan umumnya dapat dibagi dalam 2 jenis [8]:

- a. Pendinginan pasif, melakukan pembuangan panas dari PV panel secara alami atau dengan teknik tertentu tanpa memerlukan penggunaan energi.
- b. Pendinginan aktif, menggunakan peralatan dan pengontrol yang membutuhkan energi tambahan untuk mengaktifkan peralatan dan pengontrol tersebut.

Pada dasarnya media yang digunakan pendinginan PV panel adalah air dan udara. Untuk pendinginan pasif, panas diambil dari PV panel dan dibuang ke lingkungan sekitar atau dinamakan konveksi alami. Struktur desainnya menggunakan saluran udara, pipa panas atau sirip pembuang panas tambahan atau heatsink di belakang PV panel untuk membuat sirkulasi alami udara atau cairan menjadi lebih mudah mengalir [19]. Pembahasan mengenai metode yang digunakan untuk pendinginan pasif PV panel dengan menggunakan teknik pendinginan yang berbeda seperti saluran aliran udara, pipa panas, cairan, perangkat *thermoelectric* (TE), dan *Phase Change Material* (PCM) dapat di lihat di jurnal [21]. Salah satu teknik PCM yang sudah dikembangkan adalah penggunaan perubahan fasa bahan (PCM) sebagai pendingin pasif. Dalam sebuah studi simulasi yang dilakukan dengan melakukan teknik PCM dengan simulasi menggunakan tangki penyimpanan air yang terhubung dengan pipa ke permukaan belakang PV panel. Dari simulasi didapatkan peningkatan output listrik sebesar 13,7% dibandingkan dengan yang tidak menggunakan PCM [20]. Selain jenis pendinginan pasif, ada juga peneliti yang mengembangkan suatu teknik yang dinamakan *Radiative cooling technique* yaitu dengan menggunakan lapisan silikon yang tidak berwarna dan transparan pada permukaan PV panel untuk menghasilkan radiasi thermal dan menurunkan suhu permukaan PV panel. Dari hasil simulasi terjadi

penurunan suhu operasi PV panel sebesar $18,3^{\circ}\text{C}$, walaupun masih sebatas eksperimen [22].

Pendinginan aktif secara umum digunakan untuk mendapatkan efisiensi konversi energi listrik yang lebih baik. Struktur desainnya adalah dengan cara ekstraksi atau pembuangan panas dengan menggunakan perangkat seperti kipas untuk memaksa udara, atau pompa air untuk mengalirkan air ke bagian belakang atau depan PV panel, atau dengan menggunakan sirkulasi air pendingin yang mengalir melintasi tabung pipa logam yang dibagian atas ditempatkan PV panel. Penyemprotan air juga dapat dipergunakan untuk pendinginan PV panel terutama di daerah yang kering dan air yang langka atau juga dengan cara mengapungkan PV panel di atas permukaan air dan sebagainya [8].

Berbagai jenis sistem pendingin aktif telah dipelajari dan diteliti, menggunakan aliran cairan di depan atau dibelakang PV panel [23]. Sebuah penelitian dengan kondisi lingkungan dan iklim Mediterania menggunakan sistem pendingin air di kedua sisi panel PV dapat meningkatkan daya listrik sebesar 16,3%. Teknik pendinginan aktif yang menggunakan air ini memiliki potensi yang tinggi untuk diimplementasikan, sayangnya optimalisasi siklus air dan analisis ekonomi dalam aplikasi nyata masih belum banyak yang membahas [20].

Hybrid Photovoltaik/Thermal (PV/T) solar system adalah salah satu metode sistem pendinginan PV panel paling populer saat ini [19]. Sistem hibrida ini terdiri dari PV panel yang dikombinasikan dengan sistem pendinginan permukaan panel. Zat pendingin, yaitu air atau udara di alirkan atau dilewatkan sekitar dipermukaan PV panel untuk pendinginan PV panel, air dan udara yang mengalir akan menjadi hangat yang dapat digunakan untuk keperluan lain seperti air hangata untuk keperluan rumah tangga dan lain-lain.

Jurnal *Experimental investigation of solar module cooling by a novel micro heat pipe array* [24] melakukan suatu penelitian dengan menggunakan sistem Solar Panel *Cooling by a Novel Micro Heat Pipe Array*. Sistem pendingin ini terdiri dari evaporator dan kondensor. Panas dari matahari menguapkan cairan di dalam evaporator dan kemudian uap melewati bagian kondensor, dan akhirnya bagian kondensor didinginkan menggunakan udara atau air. Pipa panas dapat mentransfer panas dari PV panel ke udara atau air tergantung pada sistem. Menggunakan udara sebagai pendingin dapat

menurunkan suhu PV panel sampai dengan $4,7^{\circ}\text{C}$ dan meningkatkan efisiensi PV panel sebesar 2,6%. Pada saat menggunakan air sebagai pendingin dapat menurunkan suhu PV panel 8°C dan meningkatkan efisiensi PV panel sebesar 3%. Oleh karena itu dapat disimpulkan pendinginan dengan air lebih efektif dari pada pendinginan dengan menggunakan udara.

Untuk sistem pendingin pasif dan aktif, media pendingin yang umum digunakan adalah udara dan air. Namun sifat thermal udara membuatnya kurang efisien sebagai media pendingin. Oleh karena itu, pendinginan udara tidak cocok untuk menyerap energi panas PV panel di daerah yang sangat panas. Diperlukan lebih banyak energi listrik untuk mengoperasikan kipas yang digunakan untuk mencapai kinerja yang sama dengan pendinginan dengan air. Namun di tempat yang airnya terbatas, pendinginan udara mungkin masih merupakan pilihan. Pendinginan dengan menggunakan air, memungkinkan digunakan pada suhu yang lebih tinggi dan penggunaan air panas dari hasil pendinginan panel pada sistem PV/T dapat digunakan lebih efisien. Sistem pendingin aktif juga dapat bekerja bersama dengan pendingin pasif untuk mendapatkan hasil yang lebih efektif. Oleh karena itu, pilihan teknik pendinginan dan media pendingin sangat tergantung pada desain sistem PV dan kondisi di mana sistem beroperasi [21].

Dari beberapa literatur ada yang menuliskan menggunakan air sebagai pendingin ternyata lebih efektif daripada menggunakan pendinginan udara. Tujuan dari penelitian ini adalah membangun sebuah sistem pendingin PV panel berbasis air untuk memecahkan permasalahan PV panel yang terlalu panas dengan jumlah air dan energi yang minimum. Untuk meminimalkan jumlah air dan energi yang diperlukan untuk pendinginan panel, perlu dilakukan penelitian untuk menentukan pada suhu berapa PV panel akan mengalami penurunan efisiensi dan berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk mendinginkan panel tersebut [23].

2.19 Baterai

Baterai pada sistem PLTS adalah salah satu alat yang sangat berperan penting dalam kelangsungan siklus sistem PLTS, meski potensi surya yang dimiliki sangatlah besar, namun sifat dari energi surya adalah intermitten, dimana produksi listrik akan dipengaruhi oleh kondisi dan ketersediaan sinar matahari. Artinya energi surya hanya

akan tersedia ketika terdapat *supply* panas matahari yang mengenai modul. Oleh sebab itu, dibutuhkan tempat penyimpanan energi (*energy storage*). Tujuan penggunaannya yaitu untuk menyimpan energi ketika pembangkit menghasilkan energi yang berlebih. Ketika energi tersebut telah dibutuhkan kembali, energi yang tadinya disimpan dapat dimanfaatkan. Tempat penyimpanan energi ini disebut dengan *energy storage system*. Dalam sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) menggunakan *energy storage* yaitu baterai. Jenis-jenis baterai yaitu terdapat *chemical*, *electrochemical*, *thermal*, *mechanical*, dan *solid state*.

- *Chemical* terdiri dari *hydrogen*, *methane*, dan *bio energy*.
- *Electrochemical* terdiri dari *lead acid*, *lithium ion*, *sodium batteries*, *zinc air*, *vanadium flow*, *zinc bromine flow* dan *fuel cell*.
- *Thermal* terdiri dari *molten salts*, *hot water*, *chillers*, *ice making*, *phase change materials (cold and heat)*.
- *Mechanical* terdiri dari *rotary* atau *flywheel*, *pumped storage*, *gravity based*, dan *compressed air*.
- *Solid state* terdiri dari *ultracapacitors*, *superconductor magnets*, *ceramic electrolyte*, dan *glass electrolyte*.

Pembangkit listrik yang dilengkapi dengan *energy storage* biasanya banyak ditemukan pada penggunaan PLTS aplikatif. Beberapa jenis pemanfaatan PLTS aplikatif yakni *solar water pumping*, *light traffic*, *aquavoltaics*, *agrophotovoltaic*, *desalination system* dan *greenhouse* yang saat ini menjadi fokus penelitian ini.

Selain jenis baterai di atas, ada juga jenis baterai yang cocok untuk PLTS yaitu: baterai asam timbal (*lead acid*), baterai lithium ion, baterai berbasis nikel, dan baterai *flow*. Masing-masing teknologi baterai ini memiliki karakteristik uniknya sendiri. Berikut ini teknologi, kelebihan, dan kelemahan setiap jenis baterai untuk PLTS.

2.19.1 Baterai Asam Timbal

Baterai *lead acid* atau asam timbal adalah teknologi yang sudah banyak digunakan sebagai baterai tenaga surya. Baterai deep-cycle jenis ini telah digunakan untuk menyimpan energi untuk waktu yang lama, bahkan sudah sejak tahun 1800-an.

Ada dua jenis baterai asam timbal, yaitu baterai asam timbal *flooded* dan baterai asam timbal *sealed*. Baterai asam timbal *flooded* biasanya juga disebut sebagai aki basah sementara baterai *sealed* sering disebut sebagai aki kering.

Kelebihan Baterai Asam Timbal Baterai asam timbal adalah pilihan penyimpanan energi termurah dan paling hemat biaya. Baterai ini juga dapat diandalkan karena teknologinya telah ada selama bertahun-tahun, bahkan dapat dengan mudah dibuang dan didaur ulang.

Sedangkan untuk kelemahan Baterai Asam Timbal yaitu Baterai asam timbal *flooded* memerlukan ventilasi dan perawatan rutin agar dapat beroperasi dengan benar, sehingga meningkatkan kemungkinan baterai bocor. Hal ini juga membatasi bagaimana baterai asam timbal *flooded* dapat dipasang. Baterai ini juga memiliki *depth of discharge (DoD)* yang rendah, sehingga perlu diisi lebih sering. Baterai juga memiliki kedalaman debit yang rendah yang berarti memiliki umur lebih pendek, antara 5 hingga 10 tahun. Kegunaan baterai asam timbal sangat bagus untuk sistem PLTS off grid atau untuk baterai cadangan darurat jika terjadi pemadaman listrik.



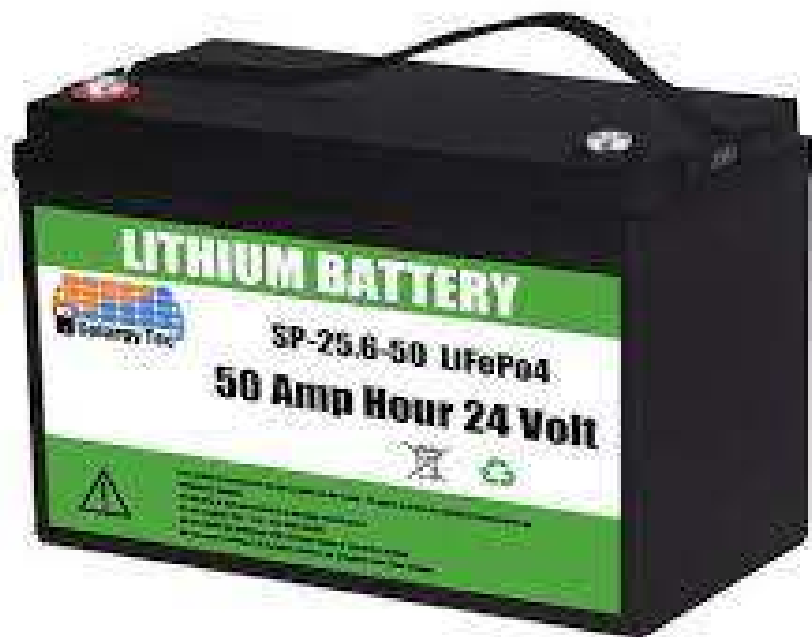
Gambar 18. Baterai Asam Timbal

2.19.2 Baterai Lithium Ion

Baterai lithium ion adalah jenis baru penyimpanan energi. Ketika kendaraan listrik mulai banyak digunakan, produsen mulai menyadari potensi lithium ion sebagai solusi penyimpanan energi. Baterai ini menjadi salah satu pilihan favorit baterai tenaga surya yang paling banyak digunakan, seperti Tesla Power Wall. Kelebihan Baterai Lithium Ion Baterai lithium ion hampir tidak memerlukan perawatan rutin. Baterai jenis juga memiliki kepadatan energi yang lebih tinggi, sehingga dapat menyimpan lebih banyak energi di ruang yang lebih kecil daripada baterai asam timbal. Baterai lithium ion memiliki siklus hidup atau masa pakai yang lebih lama, sebagian besar memiliki jaminan garansi minimal 10 tahun. Masa pakai yang lebih lama ini berkaitan dengan kedalaman pelepasan yang lebih tinggi, sehingga Anda dapat menggunakan lebih banyak energi yang tersimpan di dalam baterai.

Kelemahan Baterai Lithium Ion Salah satu kelemahan terbesar baterai lithium ion adalah harganya lebih mahal daripada teknologi penyimpanan energi lainnya. Karena sifat kimianya, sistem penyimpanan ion lithium memiliki peluang lebih tinggi untuk terbakar karena sesuatu yang disebut pelepasan termal. Namun, jika dipasang dengan benar, hanya kemungkinan kecil baterai Anda terbakar.

Kegunaan Baterai Lithium Ion Baterai lithium ion baik digunakan untuk instalasi PLTS di rumah karena dapat menampung lebih banyak daya di ruang terbatas. Baterai ini memungkinkan Anda menggunakan lebih banyak energi yang tersimpan, sehingga sangat bagus untuk memberi daya pada rumah.



Gambar 19. Baterai Lithium

2.19.3 Baterai Nikel Kadmium

Baterai Nikel Kadmium Baterai nikel kadmium (Ni-Cd) tidak banyak digunakan seperti baterai asam timbal atau baterai lithium ion. Baterai Ni-Cd pertama kali muncul pada akhir 1800-an, dan mendapat perubahan besar pada 1980-an dengan meningkatkan jumlah energi yang dapat disimpan. Baterai ini merupakan pilihan favorit dalam industri pesawat terbang.

Kelebihan Baterai Nikel Kadmium Manfaat utama baterai Ni-Cd adalah tahan lama dan kemampuan beroperasi pada suhu ekstrim. Selain itu, baterai ini tidak memerlukan sistem manajemen baterai yang rumit dan lebih bebas perawatan. Kelemahan Baterai Nikel Kadmium Kelemahan terbesar baterai Ni-Cd adalah bahan kadmium yang sangat beracun. Bahkan, penggunaan kadmium dilarang di beberapa negara. Hal ini membuat baterai kadmiun sulit untuk dibuang. Baterai juga rentan terhadap efek memori, yang membatasi kemampuannya untuk menahan muatan. Kegunaan Baterai Nikel Kadmium Karena daya tahannya, baterai Ni-Cd populer untuk kegunaan skala besar, seperti penyimpanan energi tenaga surya skala besar.



Gambar 20. Baterai Nikel Kadmium

2.19.3 Baterai *Flow*

Baterai *flow* adalah teknologi baru di sektor penyimpanan energi. Baterai ini berisi cairan elektrolit berbasis air yang mengalir diantara dua ruang terpisah, atau tangki di dalam baterai. Ketika diisi, reaksi kimia terjadi yang memungkinkan energi disimpan dan kemudian dibuang. Baterai ini sekarang mulai banyak peminatnya. Namun, karena ukurannya yang lebih besar membuatnya lebih mahal daripada jenis baterai lainnya. Harganya yang mahal ditambah dengan ukurannya yang besar, membuatnya sulit untuk disesuaikan dengan penggunaan di tempat tinggal.

Salah satu hal terbaik dari baterai *flow* adalah mereka kedalaman pelepasan hingga 100%. Hal ini membuat Anda dapat menggunakan semua energi yang tersimpan dalam baterai tanpa merusak kesehatannya. Cairan didalam baterai juga tahan api, sehingga Anda tidak memiliki risiko pelepasan termal. Baterai jenis ini memiliki umur terpanjang hingga 30 tahun dan hanya butuh sedikit perawatan.

Sayangnya, baterai *flow* jauh lebih mahal daripada jenis baterai tenaga surya lainnya. Baterai ini juga memiliki kapasitas penyimpanan yang relatif rendah dibandingkan dengan sistem baterai lain. Jadi untuk menyimpan sejumlah besar energi,

Anda membutuhkan baterai dalam jumlah besar. Baterai ini juga memiliki tingkat pengisian dan pengosongan yang sangat rendah, yang berarti agar bekerja efektif harus berukuran besar.

Baterai flow adalah baterai terbaik untuk kegunaan skala besar. Karena cara kerjanya, baterai harus sangat besar untuk menampung sejumlah besar energi dan butuh anggaran lebih besar untuk membelinya. Karena hal inilah yang menjadikan baterai flow menjadikannya pilihan yang kurang populer untuk kebutuhan rumah tangga. Dalam kebanyakan kasus, baterai terbaik untuk PLTS di rumah Anda adalah baterai lithium ion. Baterai ini mampu menyimpan lebih banyak energi dengan hanya menggunakan sedikit ruangan. Baterai juga dapat melepaskan sebagian besar energi yang tersimpan dan memiliki efisiensi tinggi. Banyak perusahaan tenaga surya dapat memasang baterai lithium ion secara akurat dan aman. Namun, jika Anda memiliki anggaran terbatas, baterai asam timbal bisa menjadi pilihan terbaik untuk Anda. Jenis baterai ini telah digunakan selama beberapa dekade dan memiliki harga lebih murah. Meskipun Anda bisa mendapatkan baterai Ni-Cd atau baterai flow untuk dipasangkan dengan sistem PLTS di rumah Anda, baterai ion lithium dan asam timbal adalah baterai tenaga surya yang banyak direkomendasikan.



Gambar 21. Contoh Baterai *Flow*