



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Geografis Indonesia

Secara geografis, Indonesia terletak diantara 6°LU-11° BT dan 95°BT-141°BT, diapit oleh dua benua, yaitu benua Asia dan Benua Australia. Kemudian diapit pula oleh dua samudra, yaitu Samudra Pasifik dan Samudra Hindia. Dengan ini Indonesia memiliki iklim tropis karena letak Indonesia yang berada pada garis khatulistiwa diperkirakan mempunyai potensi energi surya sangat besar karena mempunyai penyinaran radiasi matahari sebesar 4,8 kWh/m²/hari.

Pada setiap daerah yang ada di Indonesia tentunya memiliki radiasi matahari yang berbeda-beda karena faktor yang mempengaruhi iklim tersebut seperti suhu udara, penyinaran matahari,¹ dan kecepatan dan arah angin. Sumatera selatan tepatnya di wilayah kota Palembang berada 2° 52'- 3°5' LS dan 104°37'-104°52"BT yang memiliki suhu rata-rata 25,8°C /tahunnya. Suhu tertinggi rata-rata di atas 32°C dan memiliki suhu terendah rata-rata 24°C. Tidak hanya itu iklim di Palembang yang memiliki tingkat kecepatan angin berkisar antara 0-7 Knots atau 0-3,6 m/s.

2.2 Jenis Jenis Pembangkit Listrik di Indonesia

Pembangkit listrik adalah sekumpulan peralatan dan mesin yang digunakan untuk membangkitkan energi listrik melalui proses transformasi energi dari berbagai sumber energi. Adapun jenis jenis pembangkit listrik yang ada di Indonesia adalah sebagai berikut:

a) **Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)**

Pembangkit listrik dari tenaga matahari atau surya menjadi salah satu pembangkit listrik terbarukan yang ada di Indonesia. Karena kekuatan matahari bisa didapatkan secara cuma-cuma, PLTS di Indonesia cukup banyak.

¹Andi Makkulau, Samsurizal, S., & Fikri, M. (2019). Pengaruh Intensitas Matahari Terhadap Karakteristik Sel Surya Jenis Polycrystalline Menggunakan Regresi Linear. KILAT, 69-76.



- b) **Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP)**
Panas bumi atau Geotermal yang tersimpan dalam Bumi juga bisa dimanfaatkan dan diubah menjadi listrik. PLTP di Indonesia terdapat di Kabupaten Wonosobo, Jawa Tengah, Sukabumi, Garut dan Pengalengan di Jawa Barat.
- c) **Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)**
Pembangkit Listrik Tenaga Uap merupakan pembangkit listrik dari bahan tidak terbarukan. PLTU dihasilkan dari batubara. PLTU di Indonesia ada di Kalimantan Timur, Sumatra Utara, Jawa Tengah, Lampung, Banten, DKI Jakarta, Batam, Jawa Timur, Jawa Barat, Sulawesi Selatan, Jakarta, Kalimantan Selatan, Kalimantan Barat, Kalimantan Timur dan PLTU di beberapa provinsi lainnya.
- d) **Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)**
Air menjadi salah satu kebutuhan penting manusia. Tidak hanya bisa diminum atau untuk keperluan sehari-hari, keberadaan air juga bisa dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik. PLTA di Indonesia juga cukup banyak. PLTA ada di Aceh, Sumatera Utara, Sumatra Barat, Bengkulu, Riau, Lampung, Jawa Barat, Jawa Tengah, Jawa Timur, Kalimantan Selatan, Sulawesi Utara, Sulawesi Selatan dan Sulawesi Tengah.
- e) **Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)**
PLTG di Indonesia cukup banyak. PLTG di Indonesia tersebar di beberapa provinsi seperti Jawa barat, Jawa Timur, Jambi, Kalimantan Selatan, Kalimantan Timur dan Sumatra Selatan.
- f) **Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)**
Listrik yang dimanfaatkan masyarakat Indonesia juga dihasilkan dari angin. Berkat teknologi, kekuatan dari angin ini bisa diubah dan menghasilkan listrik. Indonesia memiliki dua PLTB yakni berada di PLTB Sidrap di Kabupaten Sidenreng Rappang Sulawesi Selatan dan PLTB Tolo di Kabupaten Jeneponto.



2.3 Pengertian Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Energi Tenaga Surya adalah energi yang timbul dari panas matahari dan sinar matahari. Energi surya mampu menghasilkan energi dengan jumlah besar dan bersifat kontinu. Energi surya yang masuk ke dalam bumi disebut foton. Semua radiasi elektromagnetik mengandung foton termasuk sinar matahari.

Pembangkit listrik tenaga surya adalah pembangkit listrik yang mengubah energi surya menjadi energi listrik. Pembangkitan listrik bisa dilakukan dengan dua cara, yaitu secara langsung menggunakan fotovoltaik² dan secara tidak langsung dengan pemusatan energi surya. Fotovoltaik mengubah secara langsung energi cahaya menjadi listrik menggunakan efek fotoelektrik. Pemusatan energi surya menggunakan sistem lensa atau cermin dikombinasikan dengan sistem pelacak untuk memfokuskan energi matahari ke satu titik untuk menggerakkan mesin kalor.

- a) Sistem pemusatan energi surya (concentrated solar power, CSP) menggunakan lensa atau cermin dan sistem pelacak untuk memfokuskan energi matahari dari luasan area tertentu ke satu titik. Panas yang terkonsentrasikan lalu digunakan sebagai sumber panas untuk pembangkitan listrik biasa yang memanfaatkan panas untuk menggerakkan generator. Sistem cermin parabola, lensa reflektor Fresnel, dan menara surya adalah teknologi yang paling banyak digunakan. Fluida kerja yang dipanaskan bisa digunakan untuk menggerakkan generator (turbin uap konvensional hingga mesin stirling) atau menjadi media penyimpan panas.
- b) Fotovoltaik Sel surya atau sel fotovoltaik adalah alat yang mengubah energi cahaya menjadi energi listrik menggunakan efek fotoelektrik. Dibuat pertama kali pada tahun 1880 oleh Charles Fritts (Perlin, 1999). Pembangkit listrik tenaga surya tipe fotovoltaik adalah pembangkit listrik yang menggunakan perbedaan tegangan akibat efek fotoelektrik untuk menghasilkan listrik. Solar panel terdiri dari 3 lapisan, lapisan panel P di bagian atas, lapisan pembatas di tengah, dan lapisan panel N di bagian

²Aprilia, B. S., Zulfahmi, M. R., & Rizal, A. (2019). Investigasi Efek Partial Shading Terhadap Daya Keluaran Sel Surya. *ELEMENTER*.



bawah. Efek fotoelektrik adalah dimana sinar matahari menyebabkan elektron di lapisan panel P terlepas, sehingga hal ini menyebabkan proton mengalir ke lapisan panel N di bagian bawah dan perpindahan arus proton ini adalah arus listrik

2.4 Sistem Pemasangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

PLTS merupakan energi terbarukan yang dimana PLTS menggunakan energi matahari yang tidak terbatas, tidak akan habis, dan diperbarui terus-menerus secara alami oleh alam. Namun pada sistem pemasangan PLTS terdiri dari beberapa macam sistem yaitu sebagai berikut :

a. Pembangkit Listrik Tenaga Surya *On-Grid*

PLTS *On-Grid* adalah pembangkit listrik tenaga surya yang terhubung dengan jaringan listrik PLN, oleh karena itu disebut *On-Grid* atau didalam jaringan. *On Grid* juga seringkali disebut sebagai PLTS *grid-tie* atau *grid-feed*. PLTS *On-Grid* bisa menggunakan dua sumber energi, yaitu dari tenaga surya dan listrik PLN. Keduanya bisa digunakan bergantian, khususnya ketika malam hari dimana matahari sudah tidak nampak sinarnya. Sistem ini banyak digunakan oleh rumah tangga karena memiliki cadangan listrik PLN sebagai backup jika panel surya tidak menghasilkan listrik yang cukup. Sistem ini bisa menjadi pilihan jika ingin memiliki PLTS dengan biaya instalasi yang lebih hemat.

b. Pembangkit Listrik Tenaga Surya *Off-Grid*

PLTS *Off-Grid* adalah pembangkit listrik tenaga surya yang tidak memiliki sambungan dengan jaringan kelistrikan PLN. Oleh karena itu disebut *Off-Grid* atau diluar jaringan. Sistem *Off-Grid* dapat memakai dua sumber energi listrik, yaitu dari listrik yang diproduksi panel surya dan listrik yang disimpan baterai. Baterai ini merupakan komponen yang penting dalam sistem *Off-Grid*, sebab baterai adalah sumber energi utama saat malam hari. Baterai merupakan komponen wajib jika memilih sistem *Off-Grid*.



c. Pembangkit Listrik Tenaga Surya *Hybrid*

Sistem ini juga dapat dimaknai sebagai sistem yang menggabungkan keunggulan *On-Grid* dan *Off-Grid* secara bersama-sama. Sistem ini mengadopsi keunggulan dari sistem PLTS *On-Grid* dan *Off-Grid*. Sistem *Hybrid* bisa memakai tiga sumber energi: panel surya, baterai, dan listrik PLN. Adanya ketiga sumber ini menjadikan sistem PLTS *Hybrid* lebih unggul dibandingkan dua sistem lainnya.

2.4.1 Komponen Pendukung PLTS *Off-Grid*

Adapun komponen-komponen pendukung pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya yang digunakan adalah sebagai berikut :

1. Solar Charger Controller

Controller atau sering dikenal dengan *solar charge controller* adalah perangkat elektronik yang digunakan dalam sistem PLTS untuk mengatur pengisian arus searah dari panel surya ke baterai dan mengatur penyaluran arus dari baterai ke peralatan listrik (beban). Alat ini juga mempunyai kemampuan untuk mendeteksi kapasitas baterai. Bila baterai sudah terisi penuh dengan cadangan energi listrik maka penyaluran energi listrik dari panel akan dapat dihentikan secara otomatis. Cara alat ini mendeteksi adalah melalui monitor level tegangan baterai. Charge controller menerapkan teknologi pulse width modulation (PWM) untuk mengatur fungsi pengisian baterai dan pembebasan arus dari baterai ke beban. Beberapa fungsinya seperti mengatur arus untuk pengisian ke baterai, menghindari overcharging, overvoltage dan monitoring temperatur baterai.³



Gambar 2.1 Solar Charger Controller

³ HIDAYAT, A. N. RANCANG BANGUN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA OFF-GRID 450 VA (Palembang, (2021). Politeknik Negeri Sriwijaya). Hal 36



2. MCB DC

Multi Circuit Breaker (MCB) merupakan komponen pemasangan PLTS Atap yang berfungsi sebagai alat pengatur distribusi listrik dan penjaga agar tidak terjadi kelebihan beban. Salah satu Komponen Pemasangan PLTS Atap yang memiliki peran sangat penting adalah MCB ini. MCB ini berfungsi sebagai sistem proteksi di dalam instalasi listrik jika terjadi beban berlebih serta hubung singkat arus listrik atau korsleting.

Multi Circuit Breaker akan berfungsi sebagai pemutus arus listrik menuju arah beban. Untuk memutuskan arus tersebut dapat dilakukan manual maupun otomatis. Fungsi ini akan bekerja jika MCB mendeteksi adanya arus listrik yang melebihi batas. Misalnya, sebuah MCB memiliki batas arus listrik 6A, namun arus listrik yang mengalir melalui MCB tersebut sekitar 7A, maka MCB tersebut akan trip dengan delay waktu yang cukup lama sejak MCB tersebut mendeteksi adanya arus lebih.



Gambar 2.2 Multi Circuit Breaker

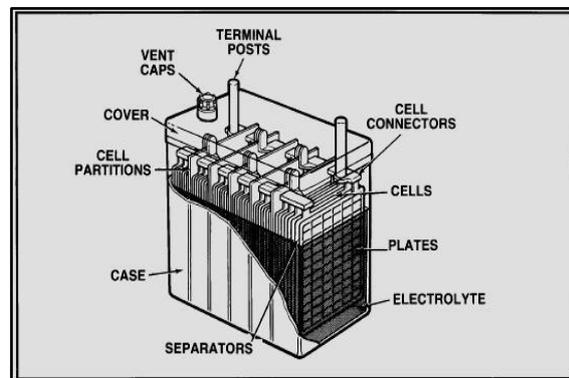
3. Baterai

Komponen yang berfungsi untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan dari penyerapan sinar matahari oleh panel surya adalah baterai. Energi listrik yang disimpan di dalam baterai dapat berguna untuk tetap menyediakan energi listrik saat cahaya matahari tidak terpancarkan secara maksimal seperti saat langit mendung atau hujan dan di malam hari. Baterai yang digunakan untuk PLTS mengalami proses siklus pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*) tergantung pada ada atau tidak adanya sinar matahari. Selama ada



sinar matahari maka panel surya akan menghasilkan energi listrik. Apabila energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya melebihi kebutuhan energi listrik maka kelebihan energi listrik itu akan disimpan dalam baterai.

Sebaliknya, saat kebutuhan energi listrik melebihi dari energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya maka cadangan energi dari baterai dapat diberikan untuk memenuhi kekurangan energi listrik. Ada dua jenis baterai isi ulang yang bisa digunakan dalam sistem PLTS yaitu baterai asam timbal (*lead acid*) dan baterai *nickel-cadmium*. Baterai jenis *nickel-cadmium* ini lebih sedikit digunakan dalam sistem PLTS karena baterai jenis ini memiliki efisiensi yang rendah dan biaya yang lebih tinggi. Sedangkan untuk baterai jenis asam timbal lebih banyak digunakan dalam sistem PLTS karena memiliki efisiensi tinggi dan biayanya lebih murah dibandingkan jenis baterai *nickel-cadmium*. Umumnya kapasitas baterai itu dinyatakan dalam Ampere-hour (Ah). Nilai Ah pada baterai menunjukkan arus yang dapat dilepaskan dikalikan dengan nilai waktu untuk pelepasan arus.



Gambar 2.3 Baterai atau Aki

2.4.2 Keuntungan dan Kelemahan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Adapun keuntungan dan kelemahan dalam proses pembangkitan listrik dari pembangkit listrik tenaga surya ini adalah sebagai berikut :

1. Keuntungan menggunakan PLTS di Indonesia adalah, sebagai berikut:
 - a. Sumber energy tersedia sepanjang tahun dan gratis
 - b. Bebas polusi Angin



- c. Tidak bising
- d. Tidak memerlukan transmisi yang rumit
- e. Tidak menyebabkan efek pemanasan global
- f. Dapat ditempatkan di daerah terpencil
- g. Umur pakainya panjang kurang lebih 20 tahun
- h. Perawatannya sangat mudah

2. Kelemahan menggunakan PLTS di Indonesia adalah, sebagai berikut:

- a. Biaya/harga pengadaan (investasi) PLTS tinggi
- b. Biaya distribusi dan pelayanan tinggi
- c. Harapan konsumen melebihi kemampuan teknologi PLTS, karena cara pandang konsumen sangat dipengaruhi oleh sifat listrik konvensional (PLN)
- d. Pengetahuan dan kesadaran masyarakat tentang peranan PLTS dalam memberikan energy listrik Alternative ramah lingkungan terbatas.

2.5 Panel Surya

Panel surya adalah alat yang di gunakan untuk merubah energi cahaya menjadi energi listrik dan merupakan rangkaian beberapa modul surya yang di susun dalam sebuah struktur kerangka. Panel surya dibuat dari material semikonduktor terutama silikon yang dilapisi oleh bahan tambahan khusus. Jika cahaya matahari mencapai cell maka electron akan terlepas dari atom silikon dan mengalir membentuk sirkuit listrik sehingga energi listrik dapat dibangkitkan. Cara kerja dari photovoltaic cell sangat tergantung kepada sinar matahari yang diterimanya. Panel sel surya menghasilkan arus yang digunakan untuk mengisi baterai. Panel surya terdiri dari photovoltaic, yang menghasilkan listrik dari intensitas cahaya, saat intensitas cahaya berkurang(berawan, mendung, hujan) arus listrik yang dihasilkan juga berkurang⁴.

Jumlah penggunaan panel surya di porsu memproduksi listrik dunia sangat kecil, tertahan oleh biaya tinggi per watt nya dibandingkan dengan bahan bakar

⁴ Usman, M. K. Analisis intensitas cahaya terhadap energi listrik yang dihasilkan panel surya. *Power Elektronik: Jurnal Orang Elektro*, (2020). Hal- 23.



fosil dapat lebih tinggi sepuluh kali lipat, tergantung keadaan. Mereka telah menjadi rutin dalam beberapa aplikasi yang terbatas seperti, menjalankan “buoy” atau alat di gurun dan area terpencil lainnya, dan dalam eksperimen mereka telah digunakan untuk memberikan tenaga untuk mobil balap dalam kontes seperti Tantangan surya dunia di Australia.

Panel Surya biasanya memiliki umur 20-25 tahun yang biasanya dalam jangka waktu tersebut pemilik panel surya tidak akan mengalami penurunan efisiensi yang signifikan. Namun, meski pun dengan kemajuan teknologi yang semakin canggih, sebagian besar panel surya komersial saat ini hanya mencapai efisiensi 15% dan hal ini tentunya merupakan salah satu alasan utama mengapa industri energi surya masih tidak dapat bersaing dengan bahan bakar fosil. Karena peralatan rumah saat ini berjalan di alternating current (AC), panel surya harus memiliki power inverter yang mengubah arus direct current (DC) dari sel surya menjadi alternating current (AC).

Posisi ideal panel surya adalah menghadap langsung ke sinar matahari (untuk memastikan efisiensi maksimum). Panel surya modern memiliki perlindungan overheating yang baik dalam bentuk semen konduktif termal. Pada prinsipnya, pembangkit listrik tenaga surya terdiri dari sekelompok foto sel yang mengubah sinar matahari menjadi gaya gerak listrik (ggl) untuk mengisi baterai aki. Dari baterai aki, energi listrik dialirkan ke pemakai. Pada waktu banyak sinar matahari (siang hari), baterai aki diisi oleh foto sel. Tetapi pada saat malam hari, foto sel tidak menghasilkan energi listrik, maka energi listrik diambil dari baterai aki tersebut.

a) Teori Muatan Listrik

Muatan Listrik pertama kali ditemukan oleh Thales, seorang ilmuwan Yunani sekitar lebih dari 2500 tahun yang lalu. Dia memperhatikan bulu ayam yang ditarik oleh batu amber yang telah digosok kain wol. Ia menciptakan kata *electricity* yang artinya listrik. Muatan listrik ada dua macam yaitu muatan listrik positif (+) atau proton, dan muatan listrik negatif (-) atau elektron. Satuan ukurannya adalah coulomb (C). Muatan



listrik sejenis akan tolak menolak dan muatan listrik tidak sejenis akan tarik-menarik. Teori atom juga terkait dengan bahasan muatan listrik.

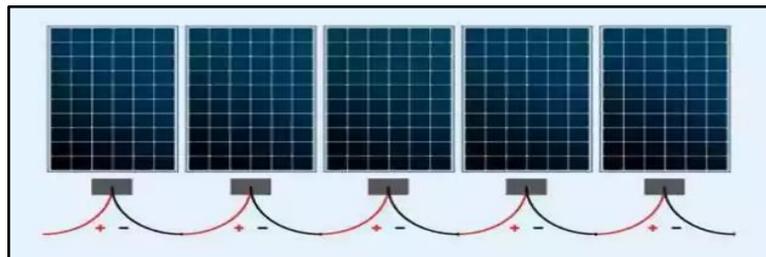
Sifat sifat muatan listrik antara lain:

1. Listrik terdiri dari dua jenis muatan yaitu muatan positif dan negatif, muatan listrik akan saling berinteraksi, muatan sejenis tolak menolak dan muatan tidak sejenis tarik-menarik.
2. Untuk menerangkan pengertian adanya sifat kelistrikan pada suatu benda, perlu dipahami adanya konsep atom yang dimunculkan oleh para ahli di antaranya, teori atom Dalton, Thompson, Rutherford dan Bohr.

Secara umum dapat dijelaskan bahwa:

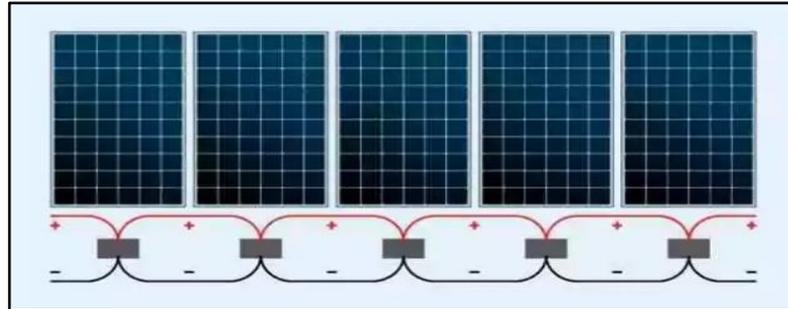
- a. Benda terdiri atas atom-atom sejenis.
- b. Setiap atom terdiri atas sebuah inti yang dikelilingi oleh satu atau lebih elektron.
- c. Inti atom bermuatan positif, elektron bermuatan negatif.
- d. Inti atom terdiri atas proton yang bermuatan positif dan neutron yang tidak bermuatan listrik.

b) Hubungan sel surya secara Seri dan Pararel



Gambar 2.4 Hubungan Sel Surya Secara Seri

Pada gambar di atas, panel surya disambungkan secara seri ketika Anda menghubungkan terminal positif dari satu panel ke terminal negatif yang lain. Ketika panel surya disambungkan secara seri, tegangan panel ditambahkan bersama-sama, tetapi arus listriknya tetap sama.



Gambar 2.5 Hubungan Sel Surya Secara Pararel

Pada gambar di atas panel surya dirangkai paralel, terminal positif dari satu panel dihubungkan ke terminal positif panel lain dan terminal negatif dari kedua panel dihubungkan bersama. Pengkabelan panel surya secara paralel menyebabkan arus listrik meningkat, tetapi tegangannya tetap sama.

Namun demikian, output modul akan mengalami penurunan dengan berjalannya waktu. Degradasi ini diakibatkan oleh dua faktor utama, rusaknya lapisan atas sel (ethylene vinyl acetate-EVA) dan lapisan bawah (polyvinyl fluoride film) secara perlahan-lahan, serta kerusakan secara alami EVA yang terjadi secara bertahap di antara lapisan gelas dan sel-sel itu sendiri.⁵

⁵ Cahyono, G. R., Ansyah, P. R., & Munthaha, M. (2020). Pengaruh Variasi Kecepatan Hembusan Udara Terhadap Temperatur Daya Output dan Efisiensi Pada Pendinginan Panel Surya. *Infotekmesin*, 141-146.



2.5.1 Jenis jenis Panel Surya

Ber macam macam teknologi telah diteliti oleh para ahli di dunia untuk merancang dan membuat sel photovoltaic yang lebih baik, murah, dan efisien diantaranya adalah :

1. *Monocrystalline*



Gambar 2.6 Panel Monocrystalline

Jenis komponen sel surya yang satu ini merupakan jenis yang paling banyak digunakan karena kelebihan yang dimilikinya. Sel surya ini terbuat dari silikon yang diiris tipis-tipis dengan menggunakan mesin. Irisan bisa menjadi lebih tipis dan juga karakteristiknya identik karena penggunaan mesin potong ini. Untuk kelebihannya, jenis sel surya satu ini ini bisa disebut sebagai salah satu sel surya yang paling efisien digunakan. Hal ini disebabkan karena penampangnya dapat menyerap cahaya matahari dengan lebih efisien dibandingkan dengan bahan sel surya yang lainnya.

Efisiensi konversi cahaya matahari menjadi listrik yang dimiliki oleh bahan sel surya ini adalah sekitar 15%. Jumlah ini merupakan salah satu jumlah yang cukup besar jika dibandingkan dengan bahan penyusun sel surya yang lain meski dengan ukuran penampang yang sama. Panel surya yang satu ini juga menjadi salah satu yang paling banyak digunakan karena paling cocok untuk kebutuhan sehari-hari. Anda bisa menggunakan berbagai peralatan listrik termasuk Pompa Submersible dengan panel surya ini.



Sayangnya jenis solar panel yang satu ini akan membutuhkan cahaya yang sangat terang ketika beroperasi. Ia akan mengalami pengurangan efisiensi jika berada pada cuaca yang berawan dan mendung. Untuk ciri-ciri panel surya monocrystalline silicon ini memiliki warna hitam dan juga bentuk yang tipis seperti yang telah disebutkan sebelumnya. Konfigurasi normal untuk sel photovoltaic terdiri p-n Junction Mono Kristal silikon material mempunyai kemurnian yang tinggi yaitu 99,999%. Efisiensi sel surya jenis single kristal silikon mempunyai efisiensi konversi yang cukup tinggi yaitu sekitar 16% sampai dengan 17%.

2. *Polycrystalline*



Gambar 2.7 Panel Polycrystalline

Teknologi panel ini memiliki kelebihan dari segi susunannya yang lebih rapi dan lebih rapat. Untuk cirinya, biasanya solar panel ini memiliki penampilan yang unik karena terkesan seperti ada retakan-retakan di dalam sel surya yang dimilikinya. Teknologi panel surya yang satu ini juga memiliki kekurangan yang cukup mirip dengan monocrystalline silicon yang telah disebutkan sebelumnya. Panel surya *polycrystalline* memiliki kekurangan ketika digunakan pada daerah yang rawan dan sering mendung. Ketika diletakkan atau digunakan pada area seperti ini, maka efisiensi yang dimilikinya akan turun.

Jika dibandingkan dengan efisiensi *monocrystalline*, polikristalin silikon ini memiliki efisiensi yang lebih rendah. Oleh karena itu untuk menghasilkan tenaga listrik dengan jumlah yang sama, jenis panel tenaga surya yang satu ini akan



diperlukan penampang yang lebih besar. Material monokristal harga per kilogram masih mahal, untuk menurunkan harga material, dikembangkan material lain yang disebut Polikristal. Efisiensi modul *photovoltaic polycrystalline* yang komersial mencapai 12% sampai dengan 14% .

3. *Thin Film*



Gambar 2.8 Panel Thin Film

Ini merupakan sebuah teknologi panel solar yang dibuat dengan menggunakan sel surya yang tipis yang kemudian dipasangkan pada sebuah lapisan dasar. Dengan begitu jika dilihat secara fisik, solar panel ini merupakan film solar sel yang memiliki dua lapisan. Kelebihan yang dimiliki oleh teknologi solar panel yang satu ini bisa dilihat dari kondisi fisiknya. Sesuai dengan nama yang dimilikinya teknologi solar panel yang satu ini memiliki ukuran yang sangat tipis, hal ini menyebabkan solar panel yang satu ini memiliki bobot yang lebih ringan dan memiliki sifat yang lebih fleksibel. Selain itu teknologi solar panel yang satu ini merupakan teknologi yang dapat bekerja dengan sangat baik ketika berada pada cahaya fluorescent.

Untuk kekurangannya, efisiensi yang dimiliki oleh panel surya yang satu ini memang cukup rendah. Anda hanya bisa mendapatkan penangkapan sebesar 8,5% untuk penampang yang sama luasnya dengan *monocrystalline* yang sudah disebutkan sebelumnya. Untuk penggunaannya, jenis panel yang satu ini memang lebih cocok digunakan untuk kebutuhan komersil. Lapisan tipis atau thin film, mempunyai ketebalan sekitar 10 mm di atas substrat kaca/steel (baja).



4. *Compound Thin Film Triple Junction Photovoltaic*



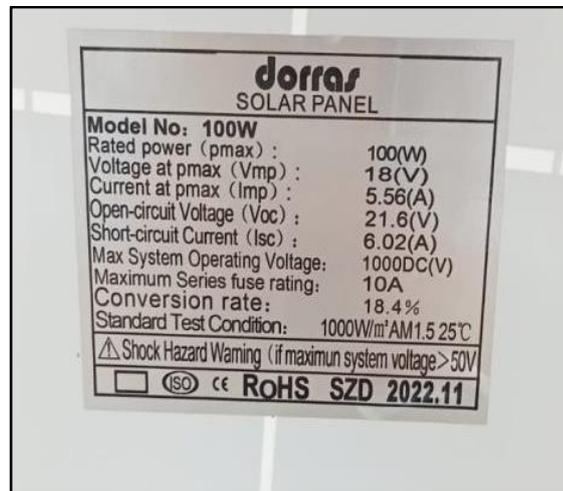
Gambar 2.9 Panel Thin Film Triple Junction

Panel surya yang disebutkan sebelumnya merupakan jenis panel yang memiliki dua lapisan, maka sesuai dengan namanya teknologi solar panel yang satu ini memiliki tiga lapisan. Untuk teknologi solar panel yang satu ini anda tidak bisa menggunakannya untuk kebutuhan sehari-hari seperti untuk menyalakan alat elektronik, memasak, memanaskan air, dan juga untuk Pompa Air Tenaga Surya yang anda miliki.

Sesungguhnya jenis panel ini merupakan jenis panel yang digunakan untuk perangkat yang diterbangkan ke angkasa luar. Oleh karena itu, kemampuan dan efisiensi yang dimilikinya sangat tinggi. Perangkat ini merupakan perangkat yang mampu menghasilkan daya listrik hingga 45%, lebih besar dibandingkan dengan jenis-jenis tenaga surya yang lainnya. Akan tetapi biasanya jenis solar panel yang satu ini memiliki bobot yang sangat berat dan juga sangat rapuh jika dibandingkan dengan teknologi solar panel yang lainnya. Proses ini menumbuhkan wafer monokristal seperti pita langsung dari cairansilikon dengan menggunakan pita kapiler, dapat menghasilkan dengan lebar 5-10cm. Pada proses ini menumbuhan terjadi 5 m/menit dengan ketebalan 250-350 mikro meter, dengan efisiensi 13%.

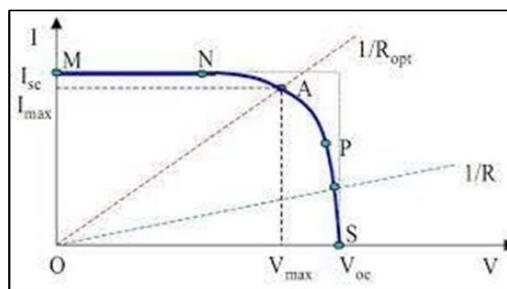


2.5.2 Karakteristik Panel Surya



Gambar 2.10 Contoh Nameplate Karakteristik Panel

Parameter sel surya yang paling berpengaruh pada kurva daya, yaitu arus hubung singkat dan tegangan hubung terbuka untuk parameter internal, sedangkan parameter eksternal nya meliputi suhu dan irradiance. Daya maksimum dan efisiensi turut dimasukkan dalam pembahasan karena merupakan parameter yang umum digunakan untuk membandingkan sel surya.



Gambar 2. 11 Kurva Karakteristik Arus dan Tegangan I-V

Sifat-sifat listrik dari modul surya biasanya diwakili oleh karakteristik arus tegangan nya, yang mana disebut juga kurva I-V (lihat gambar 2.11). Cahaya mengakibatkan kurva I-V diode turun dari kuadran pertama ke kuadran empat. Jika sebuah modul surya dihubung singkat ($V_{\text{modul}} = 0$), maka arus hubung singkat (I_{sc}) mengalir. Pada keadaan rangkaian terbuka ($I_{\text{modul}} = 0$), maka tegangan modul disebut tegangan terbuka (V_{oc}). Daya yang dihasilkan modul surya adalah sama dengan hasil kali arus dan tegangan yang dihasilkan oleh modul surya.



$$P = V \times I \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan :

P = Daya keluaran modul (Watt)

V = Tegangan kerja modul (Volt)

I = Arus kerja modul (Ampere)⁶

Sumbu horizontal adalah tegangan, sumbu vertikal adalah arus. Kebanyakan kurva I-V diberikan dalam Standar Test Conditions (STC) 1000 W/m² radiasi (atau disebut satu matahari puncak/ one peak sun hour) dan 25° C/77° F panel surya. Sebagai informasi, STC mewakili kondisi optimal dimana dalam keadaan lingkungan laboratorium. Kurva I-V terdiri dari 3 hal yang penting:

1. Maksimum Power Point (MPP)

Pada kurva I-V, *Maximum Power Point* adalah titik operasi dimana daya keluaran maksimum yang dihasilkan oleh panel surya saat kondisi maksimal. Dengan kata lain, V_{mp} dan I_{mp} dapat diukur pada saat panel surya diberi beban pada suhu 25° C dan radiasi 1000 W/m². Pada kurva saat tegangan 17.5 volt adalah V_{mp} , dan I_{mp} adalah 2,86 ampere. Jumlah watt pada batas maksimum ditentukan dengan mengalihkan V_{mp} dan I_{mp} , maksimum jumlah watt pada STC adalah 50.05 watt. Daya keluaran berkurang sebagaimana tegangan menurun. Daya keluaran dari kebanyakan surya menurun sebagaimana tegangan meningkat melebihi titik dari *maximum power point*.

$$P_{in} = I_r \max \times A \dots\dots\dots(2.2)$$

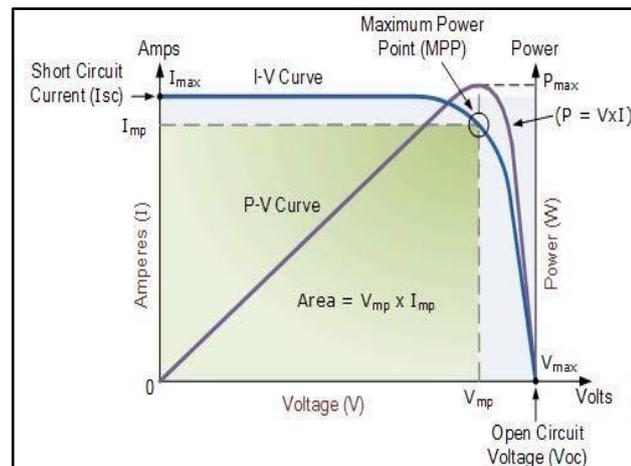
Keterangan :

P_{in} = Daya Input Maximum (watt)

I_r = Nilai Irradiasi Maksimum (W/m²)

A = Luas Panel (m²)

⁶ SARI, I. P. ANALISA PENGARUH SUHU PANEL SURYA TERHADAP TEGANGAN OUTPUT PANEL SURYA YANG TELAH TERPAKAI DENGAN YANG BARU DI POLITEKNIK NEGERI SRIWIJAYA (Doctoral dissertation, Politeknik Negeri Sriwijaya, 2022) Hal-21



Gambar 2. 12 Maximum Power Point

2. *Open Circuit Voltage (Voc)*

Open Circuit Voltage (Voc), adalah tegangan maksimum dari sel surya dan ini terjadi pada saat arus sel sama dengan nol. Pada saat kondisi rangkaian terbuka, yaitu kapasitas tegangan maksimum yang dapat dicapai pada saat tidak adanya arus, $V_{OC} = 0$. Dari persamaan tersebut terlihat bahwa nilai V_{oc} bergantung secara logaritmik terhadap rasio I_L / I_o . Ini berarti pada temperatur konstan, V_{oc} berskala logaritmik terhadap I_L dan karena I_L bergantung linear terhadap *irradiance*, maka V_{oc} berskala logaritmik juga terhadap *irradiance*. Rumusan tersebut menyimpulkan bahwa *irradiance* lebih berpengaruh terhadap I_L daripada V_{oc} .

3. *Short Circuit Current (Isc)*

Short Circuit Current (Isc), adalah arus yang mengalir pada saat tegangan sel surya sama dengan nol. Maksimum keluaran arus dari panel surya pada saat kondisi rangkaian terbuka, di peroleh dari sel surya pada kondisi tidak ada resistansi (R), $V = 0$. Daya pada kondisi saat I_{sc} adalah 0 watt. *Short circuit current* dapat diukur saat kondisi rangkaian sedang dihubung singkat. Pada kondisi ideal tanpa rugi daya, I_{sc} sama dengan I_L . I_{sc} bergantung linear terhadap *irradiance* dan dipengaruhi beberapa hal lain, yaitu luas area sel, spektrum cahaya dan parameter optik lain. Pengujian pada *Standard Test Condition (STC)*, sel surya komersial memiliki I_{sc} yang bervariasi antara 28 mA/cm² sampai 35 mA /cm².



4. Faktor Pengisian atau *Fill Factor* (FF)

Faktor Pengisian atau *Fill Factor* (FF) merupakan harga yang mendekati konstanta suatu sel surya tertentu. Jika nilai FF lebih tinggi dari 0.7, maka sel surya tersebut lebih baik. Faktor pengisi adalah ukuran kualitas dari sel surya dapat diketahui dengan membandingkan daya maksimum teoritis dan daya output pada tegangan rangkaian terbuka dan hubungan pendek. Faktor pengisi yaitu parameter yang menyatakan seberapa besar $I_{sc} \times V_{oc}$ dari daya maksimum $V_m \times I_m$ yang dihasilkan sel surya.

$$FF = \frac{V_{pm} \times I_{pm}}{V_{oc} \times I_{sc}} \dots \dots \dots (2.3)$$

Keterangan :

- FF = Fill Factor (%)
- V_{pm} = Tegangan Pada Titik Kerja Maksimum (volt)
- I_{pm} = Arus Pada Titik Kerja Maksimum (Ampere)
- V_{oc} = Tegangan Rangkaian Terbuka (volt)
- I_{sc} = Arus Hubung Singkat (Ampere)

5. Maximum Power Volt (V_{mp})

Maximum Power Point (V_{mp}) pada kurva I-V adalah titik operasi yang menunjukkan daya maksimum yang dihasilkan oleh panel sel surya.

6. Maximum Power Current (I_{mp})

Maximum Power Current (I_{mp}) merupakan arus pada Daya Maksimum saat keluaran daya yang paling besar.

7. Maximum System Operating Voltage

Maximum System Operating Voltage pada panel surya merupakan tegangan maksimum yang dimana susunan tata surya itu harus dioperasikan.

8. Maximum Series Fuse Rating

Maximum Series Fuse Rating pada panel surya merupakan peringkat sekering maksimum yang ada di dalam susunan panel surya.



9. Tolerance

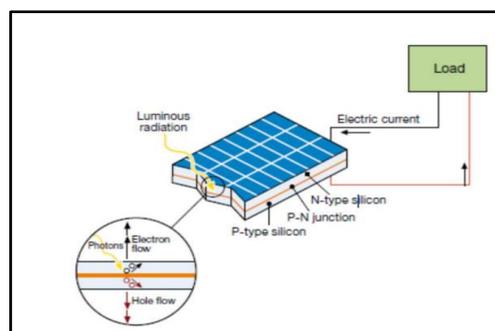
Tolerance dalam panel surya merupakan ukuran berapa banyak daya listrik yang dapat dihasilkan panel surya diatas atau dibawah kapasitas pengenalan setiap saat.

10. Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)

Nominal Operating Cell Temperature (NOCT) merupakan standar pengujian yang disesuaikan dengan kondisi operasional sel surya, yang didefinisikan sebagai suhu yang dicapai oleh sel sirkuit terbuka dalam modul.

2.5.3 Prinsip Kerja Panel Surya

Susunan sebuah Solar Cell sama dengan sebuah dioda, terdiri dari lapisan yang dinamakan PN Junction. PN Junction itu diperoleh dengan jalan menodai sebatang bahan semikonduktor silikon murni (valensinya 4) dengan impuriti yang bervalensi 3 pada bagian sebelah kiri, dan yang di sebelah kanan dinodai dengan impuriti bervalensi 5. Sehingga pada bagian kiri terbentuk silikon yang tidak murni lagi dan dinamakan silikon jenis N. Di dalam silikon murni terdapat dua macam pembawa muatan listrik yang seimbang. Pembawa muatan listrik yang positif dinamakan hole, sedangkan yang negatif dinamakan elektron. Setelah dilakukan proses penodaan itu. Di dalam silikon jenis P terbentuk hole (pembawa muatan listrik positif) dalam jumlah yang sangat besar dibandingkan dengan elektron nya.



Gambar 2.13 Prinsip Kerja Panel Surya

Oleh karena itu di dalam silikon jenis P hole merupakan pembawa muatan mayoritas, sedangkan elektron merupakan pembawa muatan minoritas. Sebaliknya di dalam silikon jenis N terbentuk elektron dalam jumlah yang sangat



besar sehingga disebut pembawa muatan mayoritas dan hole disebut pembawa muatan minoritas. Di dalam batang silikon itu terjadi pertemuan antara bagian P dan bagian N. Oleh karena itu dinamakan PN Junction. Bila sekarang, bagian P dihubungkan dengan kutub positif dari sebuah baterai, sedangkan kutub negatifnya dihubungkan dengan bagian N, maka terjadi hubungan yang dinamakan “Forward Bias”. Dalam keadaan forward bias, di dalam rangkaian itu timbul arus listrik yang disebabkan oleh kedua macam pembawa muatan. Jadi arus listrik yang mengalir di dalam PN Junction disebabkan oleh gerakan hole, tapi berlawanan arah dengan gerakan elektron.

Sekadar untuk lebih menjelaskan, elektron yang bergerak di dalam bahan konduktor dapat menimbulkan energi listrik. Dan energi listrik inilah yang disebut sebagai arus listrik yang mengalir berlawanan arah dengan gerakan elektron. Tapi, bila bagian P dihubungkan dengan kutub negatif dari baterai dan bagian N dihubungkan dengan kutub positifnya, maka sekarang terbentuk hubungan yang dinamakan “reverse bias”. Dengan keadaan seperti ini maka hole (pembawa muatan positif) dapat tersambung langsung ke kutub positif, sedangkan elektron juga langsung ke kutub positif.⁷

Jadi, jelas di dalam PN Junction tidak ada gerakan pembawa muatan mayoritas baik yang hole maupun P bergerak berusaha untuk mencapai kutub positifnya baterai, demikian pula pembawa muatan minoritas (hole) di dalam bagian N juga bergerak berusaha mencapai kutub negatif. Karena itu dalam keadaan reverse bias di dalam PN Junction ada juga arus yang timbul meski pun dalam jumlah yang sangat kecil (mikro ampere). Arus ini sering disebut dengan reserve saturation current atau leakage current (arus bocor).

Ada yang menarik dalam keadaan reverse bias itu. Bila suhu PN Junction tersebut dinaikkan ternyata dapat memperbesar arus bocor yang timbul itu. Berarti bila diberi energi (panas), pembawa muatan minoritas di dalam PN Junction bertambah banyak. Karena cahaya itu merupakan salah satu bentuk energi, maka bila ada cahaya yang menimpa suatu PN Junction dapat juga menghasilkan

⁷ Napitupulu, R. (2017). Pengaruh material monokristal dan polikristal terhadap karakteristik panel surya 20 wp. Poliprofesi.



pembawa muatan. Gejala seperti ini dinamakan fotokonduktif. Berdasarkan gejala fotokonduktif itu maka dibuat komponen elektronik fotodioda dari PN Junction itu.

Dalam keadaan reverse bias dengan memperbesar intensitas cahaya yang menimpa foto dioda dapat meningkatkan arus-arus bocor nya. Arus bocor dapat juga diperbesar dengan memperbesar tegangan baterai (tegangan reserve), tapi penambahan arus bocor nya itu tidak signifikan . Bila baterai dalam rangkaian reserve bias itu dilepas dan diganti dengan bahan tahanan, maka pemberian cahaya itu dapat menimbulkan pembawa muatan baik kole maupun elektron. Jika iluminasi cahaya itu ditingkatkan ternyata arus yang timbul semakin besar. Gejala seperti ini dinamakan photovoltare.⁸

2.5.4 Faktor Yang Mempengaruhi Kinerja Panel Surya

Kinerja dari suatu panel surya dipengaruhi oleh beberapa faktor. Berikut ini adalah beberapa faktor yang mempengaruhi kinerja dari panel surya:

1. Temperature Lingkungan atau Ambient

Temperature Sel surya dapat beroperasi secara maksimum jika temperatur sel tetap normal (pada 25° C), kenaikan temperatur lebih tinggi dari temperatur normal pada sel akan menurunkan nilai tegangan (Voc). Setiap kenaikan temperatur Sel surya 1° C (dari 25° C) akan berkurang sekitar 0,4 % pada total tenaga yang dihasilkan atau akan melemah dua kali (2x) lipat untuk kenaikan temperatur Sel per 10° C. Temperatur lingkungan sangatlah berpengaruh pada tegangan yang dihasilkan oleh panel surya.

2. Intensitas Cahaya Matahari

Arus yang dihasilkan panel surya sangatlah bergantung pada intensitas cahaya matahari yang mengenai permukaannya. Semakin besar intensitas cahaya matahari, maka semakin besar arus yang dihasilkan.

⁸ Diputra, Wibeng.. Simulator Algoritma. Skripsi. (Tidak Diterbitkan.Fakultas Teknik. Universitas Indonesia : Depok, 2008)



3. Kondisi Angin

Semakin besar angin yang bertiup di sekitar panel maka akan membantu menurunkan suhu permukaan panel surya, sehingga tegangan keluaran dapat terjaga.

4. Kondisi Cuaca

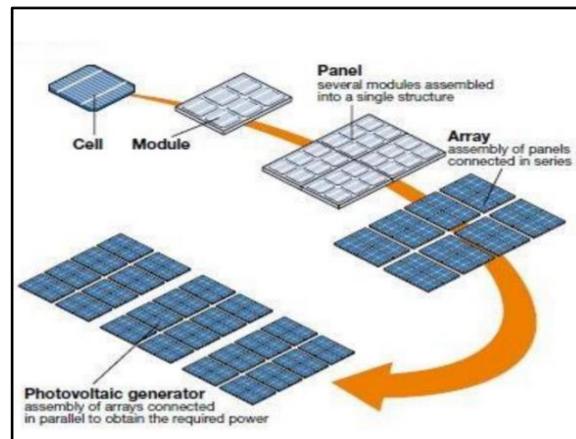
Keadaan cuaca seperti berawan, mendung, berkabut, hingga tingkat kelembapan dan kondisi lainnya akan mempengaruhi tegangan keluaran dari panel surya.

5. Posisi Panel Surya terhadap Matahari

Posisi dimana cahaya matahari tegak lurus terhadap permukaan panel menentukan arus yang dihasilkan, semakin tegak permukaan panel surya terhadap matahari maka semakin maksimal intensitas cahaya yang diserap oleh panel surya, sehingga posisi panel surya sangat tergantung terhadap waktu dari pergerakan posisi matahari dari terbit sampai terbenam.

2.6 Modul Surya

Modul surya atau Photovoltaic Module merupakan rangkaian arus listrik berisi sekumpulan sel surya yang saling terhubung dan berfungsi mengubah cahaya menjadi listrik. Komponen PLTS yang tersusun dari beberapa sel surya yang dirangkai sedemikian rupa, baik dirangkai seri maupun paralel dengan maksud dapat menghasilkan daya listrik tertentu dan disusun pada satu bingkai (frame) dan dilaminasi atau diberikan lapisan pelindung. Kemudian susunan dari beberapa modul surya yang terpasang sedemikian rupa pada penyangga disebut array. PV modul yang terangkai seri dari sel-sel surya ditujukan untuk meningkatkan, atau dalam hal ini dapat dikatakan menggabungkan tegangan (VDC) yang dihasilkan setiap sel nya. Sedangkan untuk arus nya dapat di desain sesuai kebutuhan dengan memperhatikan luas permukaan sel.



Gambar 2.14 Modul Surya

Struktur Modul Surya atau Photovoltaic Module dibagi menjadi beberapa bagian, yaitu:

a) Bingkai atau Frame

Biasanya terbuat dari aluminium anodized untuk menghindari korosi. Oleh karena pemasangan bingkai dilakukan di akhir proses pembuatan, bingkai memiliki fungsi untuk memastikan kekokohan panel.

b) Kaca Pelindung

Melindungi sel fotovoltaik dari lingkungan dan memastikan kekokohan panel. Karena fungsinya tersebut, kaca pelindung mengambil proporsi tertinggi dari total berat modul fotovoltaik.

c) Enkapsulasi atau Laminasi

Enkapsulasi atau Laminasi adalah lapisan antara sel fotovoltaik dan kaca pelindung. Laminasi digunakan untuk mencegah kerusakan mekanis pada sel fotovoltaik dan mengisolasi tegangan dari sel fotovoltaik dengan bagian modul lainnya. Biasanya lembaran laminasi menggunakan bahan ethylene-vinyl acetate (EVA).

d) Sel Fotovoltaik

Merupakan komponen utama dari modul fotovoltaik. Sel ini terbuat dari bahan semikonduktor yang menangkap sinar matahari dan mengubahnya menjadi listrik. Sel-sel saling terhubung secara seri untuk mendapatkan tegangan total yang lebih tinggi melalui kawat busbar. Bahan yang



digunakan untuk sel fotovoltaik umumnya adalah silikon, seperti polycrystalline dan monocrystalline.

e) Lembar Insulasi (Backsheet)

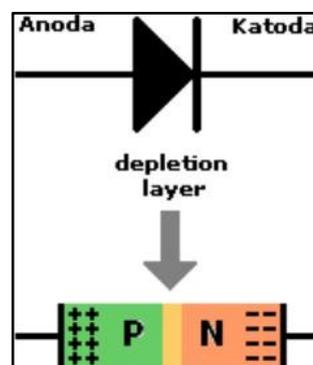
Terbuat dari bahan plastik untuk melindungi dan secara elektrik mengisolasi sel-sel dari kelembaban dan cuaca.

f) Kotak Penghubung (Junction Box)

Digunakan sebagai terminal penghubung antara serangkaian sel fotovoltaik ke beban atau ke panel lainnya. Perangkat ini berisi kawat busbar dari rangkaian sel fotovoltaik, kabel dan bypass diode⁹.

2.6.1 P-N Junction

Junction (persambungan) adalah daerah tempat tipe-P dan tipe-N disambung. Dioda *junction* adalah nama lain untuk kristal P-N. Pada gambar 1 di bawah ini ditunjukkan simbol dioda dan dioda *junction* tanpa bias tegangan. Sisi P mempunyai banyak *hole* dan sisi N banyak elektron pita konduksi.



Gambar 2. 15 Simbol Dioda dan Junction Dioda

Gambar di atas menunjukkan sambungan PN dengan sedikit porsi kecil yang disebut lapisan kosong (*depletion layer*). Di daerah tersebut terdapat keseimbangan antara *hole* dan elektron. Pada sisi P banyak terbentuk *hole-hole*

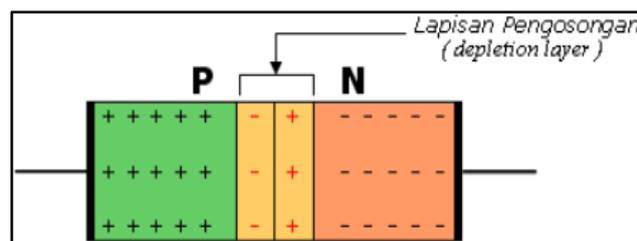
⁹ OKTARINA, A. H.. *ANALISA PENGARUH PERUBAHAN INTENSITAS CAHAYA TERHADAP KELUARAN DAYA PANEL SURYA PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) OFF-GRID 450 VA DI POLITEKNIK NEGERI SRIWIJAYA* (Doctoral dissertation, Politeknik Negeri Sriwijaya, 2021 Hal-23-26.



yang siap menerima elektron, sedangkan di sisi N banyak terdapat elektron-elektron yang siap untuk bebas.

Elektron pada sisi N cenderung berdifusi ke segala arah, beberapa elektron berdifusi melewati *junction*. Setiap kali elektron berdifusi melalui *junction* akan menciptakan sepasang ion. Tanda positif berwarna merah menandakan ion positif dan tanda negatif berwarna merah menandakan ion negatif.

Tiap pasang ion positif dan ion negatif pada gambar disebut *dipole*. Penciptaan *dipole* berarti satu elektron pita konduksi dan satu *hole* telah dikeluarkan dari sirkulasi. Jika terbentuk sejumlah *dipole*, daerah dekat *junction* dikosongkan dari muatan-muatan, daerah kosong ini disebut dengan daerah lapisan pengosongan yang lebarnya 0,5 mm.



Gambar 2. 16 Dipole pada PN Junction

2.6.2 Tegangan Barrier (Rintangan)

Karena jenis-p berdekatan dengan jenis-n di *junction*, beberapa elektron bebas dari sisi-n tertarik melintasi *junction* untuk mengisi *hole* pada sisi-p. Kedua pembawa muatan (elektron dan *hole*) dikatakan *diffuse* (berdifusi) melintasi *junction*, yaitu mengalir dari bagian dengan konsentrasi pembawa muatan yang tinggi ke bagian dengan konsentrasi yang rendah. Elektron-elektron bebas yang melintasi *junction* menimbulkan ion-ion negatif pada sisi-p dengan jalan memberikan pada atom-atom satu elektron lebih banyak dari pada jumlah total protonnya. Elektron-elektron juga meninggalkan ion-ion positif (atom-atom dengan elektron satu lebih sedikit dari pada jumlah proton) pada sisi-n.



Sebelum pembawa muatan itu berdifusi melintasi *junction* baik bahan jenis-n maupun bahan jenis-p keduanya sama-sama netral secara elektrik. Tapi, begitu ion-ion negatif terbentuk pada *junction* sisi-p, sisi-p menjadi berpotensi negatif. Dengan cara yang sama, ion-ion positif terbentuk pada sisi-n yang menjadikan sisi-n berpotensi positif.

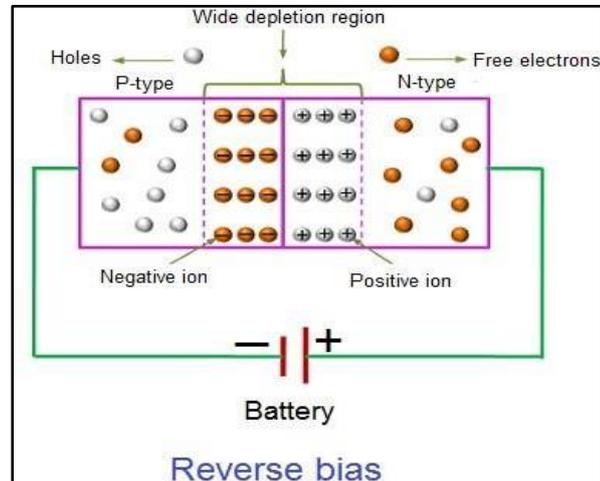
Potensial negatif pada sisi-p cenderung menolak elektron-elektron selanjutnya yang berusaha melintasi *junction* dari sisi-n, potensial positif pada sisi-n cenderung menolak setiap *hole* selanjutnya yang mau melintas dari sisi-p. Jadi, difusi pendahuluan pembawa muatan menimbulkan yang dinamakan *barrier* potensial pada *junction*. *Barrier* potensial ini negatif pada sisi-p dan positif pada sisi-n, cukup besar untuk menghindari setiap gerakan elektron atau *hole* selanjutnya melintasi *junction*. Pemandahan pembawa-pembawa muatan dan pembentukan resultan *barrier* potensial terbentuk ketika proses manufaktur.

Potensial *barrier* pada *junction* berlawanan dengan arah aliran elektron dari sisi-n dan aliran *hole* dari sisi-p. Karena elektron-elektron itu pembawa muatan mayoritas dalam bahan jenis-n and *hole* adalah pembawa muatan mayoritas bahan jenis-p ternyata potensial *barrier* itu berlawanan dengan dengan arus pembawa muatan mayoritas. Juga, elektron-elektron bebas yang ditimbulkan oleh energi termal pada sisi-p tertarik melintasi potensial *barrier* positif ke sisi-n karena elektron-elektron itu bermuatan negatif. Demikian juga, *hole* yang ditimbulkan.energi termal pada sisi-n tertarik ke sisi-p melintasi potensial *barrier* negatif di *junction*. Elektron-elektron pada sisi-p dan *hole* pada sisi-n itu pembawa muatan minoritas. Karena itu, potensial *barrier* membantu aliran pembawa muatan minoritas melintasi *junction*.

Pembangkitan tegangan *barrier* bergantung pada suhu *junction*, suhu yang lebih tinggi menciptakan banyak pasangan elektron dan *hole*, sehingga aliran pembawa minoritas melewati *junction* bertambah. Pada suhu 25 °C potensial *barrier* pada dioda germanium (Ge) = 0,3 V dan dioda silikon (Si) = 0,7 V. Potensial *barrier* tersebut berkurang 2,5 mV untuk setiap kenaikan 1 °C.



1. Reverse Biased Junction



Gambar 2. 17 Reverse bias junction

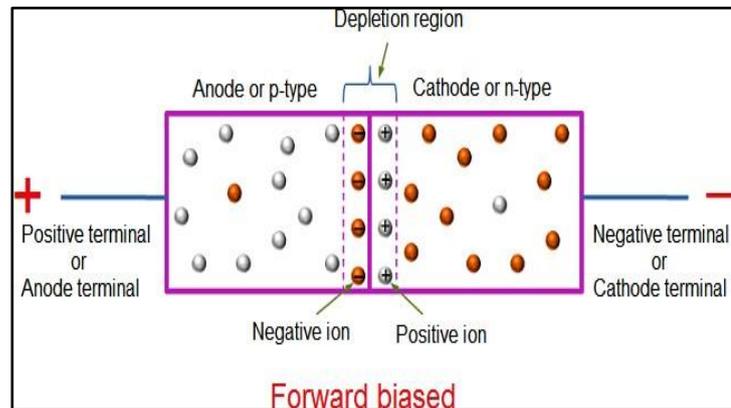
Pada Gambar diatas sambungan *reverse* bias terminal negatif sumber/*battery* dihubungkan dengan bahan tipe-P dan terminal positif dihubungkan dengan bahan tipe-N. Pada kondisi ini hole dan elektron bergerak menuju ke ujung-ujung kristal (menjauhi *junction*), di mana elektron akan meninggalkan ion positif dan *hole* akan meninggalkan ion negatif oleh sebab itu lapisan pengosongan akan bertambah lebar. Makin besar bias makin lebar pula lapisan pengosongan, oleh karena itu arus listrik sulit/tidak bisa mengalir dari sisi P ke N. Bias ini disebut bias balik (*reverse*).

Jika tegangan bias eksternal positif dipasang pada sisi-n dan negatif dipasang pada sisi-p dari *pn-junction*, elektron-elektron dari sisi-n ditarik ke terminal positif tegangan bias dan hole dari sisi-p ditarik ke terminal negatif tegangan bias.

Dengan demikian depletion region menjadi semakin lebar, potensial *barrier* semakin besar mengikuti kenaikan besarnya tegangan terpasang. Dengan potensial *barrier* semakin besar, maka tidak ada kemungkinan arus pembawa muatan mayoritas mengalir melintasi *junction*. Dalam hal ini, *junction* itu dikatakan menjadi *reverse biased*.



2. Forward Bias Junction



Gambar 2. 18 Foward Bias Junction

Gambar diatas menunjukkan sambungan PN. Terminal negatif sumber/batery dihubungkan dengan bahan tipe-N dan terminal positif dihubungkan dengan bahan tipe-P, atau tegangan potensial sisi P lebih besar dari sisi N sehingga elektron dari sisi N akan bergerak untuk mengisi *hole* di sisi P. Kalau elektron mengisi *hole* di sisi P, akan terbentuk hole pada sisi N karena ditinggal elektron. Ini disebut aliran hole dari P menuju N. Kalau menggunakan terminologi arus listrik, dikatakan terjadi arus listrik dari sisi P ke sisi N. Bias ini disebut bias maju (*forward*) .

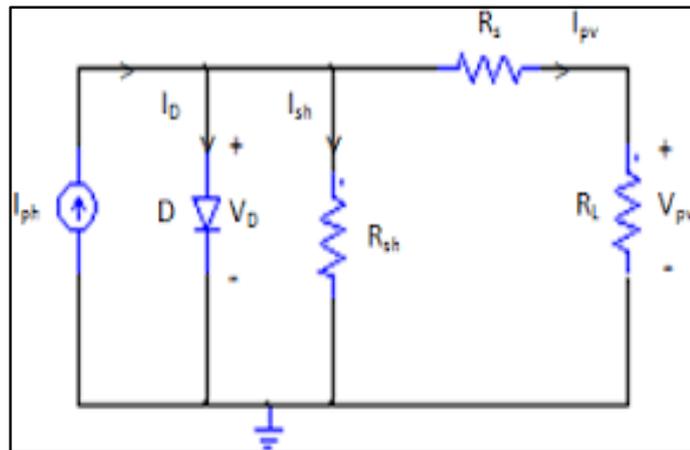
Hole pada sisi-p, sebagai partikel bermuatan positif ditolak oleh terminal positif tegangan bias dan *hole* bergerak menuju *junction*. Demikian pula, elektron- elektron pada sisi-n ditolak oleh terminal negatif tegangan bias dan bergerak menuju *junction*. Akibatnya, lebar *depletion region* berkurang dan potensial

Jika tegangan bias yang dipasang itu dinaikkan mulai dari nol, potensial *barrier* menjadi semakin kecil secara progresif sampai potensial *barrier* itu lenyapdengan efektif dan pembawa muatan dengan mudah melintasi *junction*. Elektron- elektron dari sisi-n ditarik melintasi ke terminal positifdari tegangan bias dan *hole-hole* bergerak dari sisi-p ditarik melintas ke terminal negatif dari tegangan bias. Jadi, timbul arus pembawa muatan mayoritas, *junction* disebut menjadi *forwaed bias*.



3. Rangkaian Ekuivalen Panel Surya

Pada umumnya panel surya memiliki rangkaian ekuivalen seperti ditunjukkan pada gambar 2.8 dan pemodelan matematis sangat diperlukan untuk mengetahui bagaimana parameter panel surya yang digunakan.



Gambar 2.19 Rangkain Ekuivalen Panel Sel Surya

Light generated current atau *photocurrent* (I_{ph}) bervariasi secara linear terhadap radiasi matahari dan tergantung pada suhu yang diberikan. Hambatan R_{sh} dan R_s menunjukkan hambatan intrinsik paralel dan seri dari sel. Prinsip sederhana dari rangkaian ekuivalen sel surya di atas, yaitu:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{R_s} \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan :

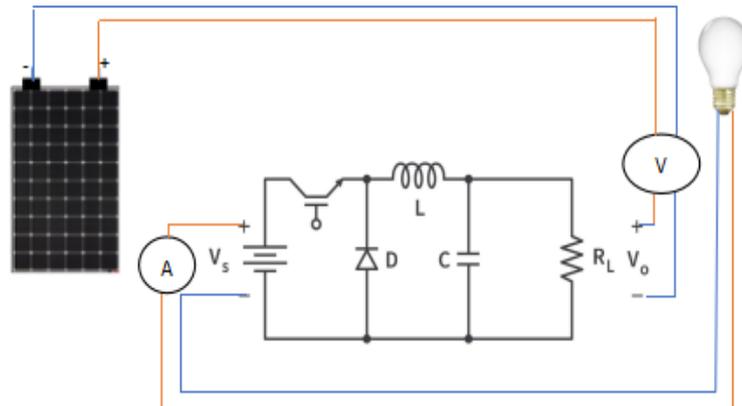
I_{pv} = Arus photovoltaic

I_{ph} = Photocurrent

I_D = Arus pada dioda

$I_{R_{sh}}$ = Arus hambatan shunt

Arus panel surya (I_{ph}) berbanding lurus dengan besarnya radiasi matahari G dan suhu T .



Gambar 2.20 Rangkain PLTS Yang Dibebani

Sistem pengendalian tegangan keluaran pada konverter DC-DC banyak diaplikasikan di pembangkit listrik, salah satunya pembangkit listrik energi terbarukan. Pada PLTS, nilai tegangan keluaran dari konverter DC-DC harus diperoleh agar sesuai dengan nilai tegangan masukan dari baterai, sehingga baterai dapat terisi (charging) dan dalam pemakaiannya dapat digunakan dalam waktu yang lama.

Buck-Boost Converter merupakan salah satu jenis konverter DC-DC yang dapat menghasilkan tegangan keluaran yang lebih tinggi (step-up) dan lebih rendah (step-down) dari tegangan masukannya. Dalam perancangan konverter ini, diperlukan sebuah metode pengendalian agar konverter dapat menghasilkan tegangan keluaran yang stabil pada kondisi tegangan masukan yang berubah-ubah (tidak stabil) akibat pemanfaatan intensitas sinar matahari pada PLTS

2.7 Pengertian Suhu

Menurut (Ir.sarsinta: 2008) pengertian Suhu adalah suatu ukuran dingin atau panasnya keadaan atau sesuatu lainnya. Satuan ukur dari suhu yang banyak di gunakan di indonesia adalah (Derajat Celsius). Sementara 8 satuan ukur yang banyak di gunakan di luar negeri adalah derajat fahrenheit. Menurut (Nurdin Riyanto : 2009) pengertian suhu adalah suatu ukuran energi kinetik rata-rata dari suatu molekul. Jika temperatur tinggi maka energi kinetik rata-rata pun akan besar. Menurut (Wirastuti dkk : 2008) Suhu adalah panas atau dingin nya suatu Angin. Perubahan suhu Angin disebabkan oleh adanya kombinasi kerja antara



Angin, perbedaan kecepatan proses pendinginan & pemanasan suatu daerah dan jumlah kadar air & permukaan bumi. Alat untuk mengukur suhu Angin ini adalah termometer.

Satuan internasional untuk suhu adalah kelvin, tetapi untuk memudahkan pengukuran, banyak satuan lainnya yang digunakan sebagai satuan suhu. Perbedaan suhu ini juga dipakai untuk membuat jenis termometer (alat pengukur suhu) yang berbeda-beda. Beberapa Skala Suhu yang paling sering dipakai antara lain adalah :

a) Satuan atau Skala Celsius ($^{\circ}\text{C}$)

Skala Celsius merupakan skala suhu yang di desain dengan titik beku air adalah 0°C dan titik didih air pada 100°C pada tekanan atmosfer standar. Skala ini diperkenalkan oleh Anders Celsius pada tahun 1742. Meski angka-angka yang ditunjukkan oleh skala celsius sudah lumayan tepat, namun secara lebih spesifik masih ada beberapa ketidak tepatan sehingga tidak bisa dijadikan sebagai standar formal atau satuan internasional. Definisi baku dari 1 derajat celsius adalah $1/273,16$ dari perbedaan antara triple point air dan nol absolut, berdasarkan pengertian tersebut dapat diketahui bahwa satu derajat celsius mempresentasikan perbedaan suhu yang sama dengan satu kelvin.

b) Satuan atau Skala Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$)

Skala Fahrenheit adalah skala suhu yang di desain dengan titik beku air adalah 32°F dan titik didih air adalah 212°F , dengan demikian perbedaan titik lebur dan titik didih pada skala ini adalah 180° . Skala ini diperkenalkan oleh ilmuwan Jerman yang bernama Gabriel Fahrenheit pada tahun 1724.

c) Satuan atau Skala Reaumur ($^{\circ}\text{R}$)

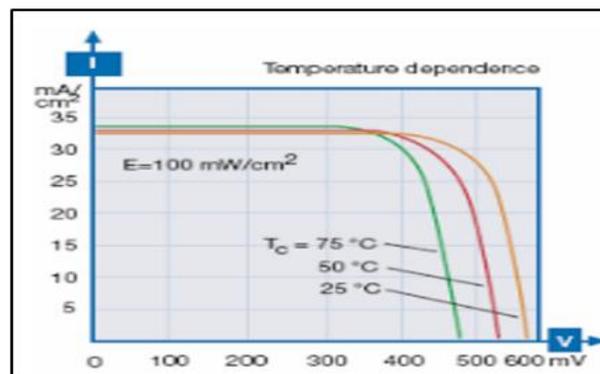
Skala Reaumur adalah skala suhu yang di desain dengan titik beku air adalah 0°R dan titik didih nya 80°R , artinya terdapat perbedaan sebesar 80°



antara titik beku dan titik didih. Skala ini diperkenalkan oleh Rene Antoine Ferchault de Reaumur pada tahun 1731.¹⁰

2.8 Pengaruh Suhu Terhadap Sel Surya

Irradiance bukanlah satu-satunya parameter eksternal yang memiliki pengaruh penting pada kurva I-V, ada juga pengaruh suhu. Suhu memiliki peranan penting untuk memprediksi karakteristik I-V. Komponen semikonduktor seperti diode sensitif terhadap perubahan suhu, begitu pula dengan sel surya. Pada Gambar 2.12 terlihat bahwa suhu berpengaruh banyak pada V_{oc} daripada terhadap I_{sc} , berkebalikan dengan pengaruh irradiance. Kenaikan suhu mengurangi V_{oc} sel surya. Hal ini disebabkan peningkatan suhu menurunkan band gap semikonduktor.



Gambar 2.21 Grafik Temperature

Pada saat suhu pada panel surya tinggi terjadi penurunan pada panel surya mencapai 20° C.

¹⁰ DWI, A. S. SISTEM PENGAMATAN SUHU, KELEMBABAN ANGIN, CURAH HUJAN, SERTA KETINGGIAN AIR LAUT OLEH BADAN METEOROLOGI KLIMATOLOGI DAN GEOFISIKA (BMKG TANJUNG EMAS SEMARANG. 2020) Hal-11


Table 2.1 Nilai untuk $\eta_c = \eta_{Tref} [1 - \beta_{ref} (T_c - T_{ref})]$

T_{ref} ($^{\circ}C$)	η_{Tref}	β_{ref}	Comments	References
25	0.15	0.0041	Mono-Si	Evans and Florschuetz ¹¹⁶
24	0.117 (average) (0.104-0.124)	0.0038 (average) (0.0032-0.0046)	Average of Sandia and commercial cells	OTA ¹¹⁷
25	0.11	0.003	Mono-Si	Truncellito and Sattolo ¹¹⁸
25	0.13	0.0041	PV/T system	Mertens ¹¹⁹
		0.005		Barra and Coiante ¹²⁰
20	0.10	0.004	PV/T system	Prakash ¹²¹
25	0.10	0.0041	PV/T system	Garg and Agarwal ¹²²
20	0.125	0.004	PV/T system	Hegazy ¹²²
25		0.0026	a-Si	Yamawaki <i>et al.</i> ¹²³
25	0.13	0.004	Mono-Si	RETScreen ¹²⁴
	0.11	0.004	Poly-Si	
	0.05	0.0011	a-Si	
25	0.178	0.00375	PV/T system	Nagano <i>et al.</i> ¹²⁵
25	0.12	0.0045	Mono-Si	Chow ¹⁰¹
25	0.097	0.0045	PV/T system	Zondag <i>et al.</i> ¹⁰
25	0.09	0.0045	PV/T system	Tiwari and Sodha ⁷⁰
25	0.12	0.0045	PV/T system	Tiwari and Sodha ¹²⁶
25	0.12	0.0045	PV/T system	Assoa <i>et al.</i> ¹⁵
25	0.127	0.0063	PV/T system	Tonui and Tripanagnostopoulos ¹²⁷
25	0.127 unglazed 0.117 glazed	0.006	PV/T system	Tonui and Tripanagnostopoulos ¹²⁸
25		0.0054	PV/T system	Othman <i>et al.</i> ¹²⁹

2.9 Kecepatan Angin

Kecepatan Angin merupakan komponen Alam yang sangat dibutuhkan oleh makhluk hidup. Tanpa Angin, tak mungkin ada makhluk hidup yang bisa bertahan hidup. Sebagai salah satu yang tidak dapat di lepaskan dari kehidupan sehari-hari, harusnya bukan merupakan hal yang asing lagi. Namun, kenyataannya tak banyak yang tahu definisi dari Angin. Kebanyakan orang hanya mengetahui keberadaannya saja, jika ditanya mengenai apa itu Angin mereka akan bingung menjawabnya. Bahkan, tak sedikit yang masih bingung



membedakan antara Angin dengan air. Secara umum, Angin di maknai sebagai campuran berbagai gas yang tidak berwarna dan tidak berbau yang memenuhi ruang di permukaan bumi. Menurut Wikipedia, Angin di definisikan sebagai campuran gas yang terdapat di permukaan bumi, mengandung 78% nitrogen, 21% oksigen, 1% uap air, karbon dioksida, dan berbagai jenis gas lainnya. Sedangkan pengertian Angin menurut KBBI (Kamus Besar Bahasa Indonesia) adalah campuran berbagai gas yang tidak berwarna dan tidak berbau yang memenuhi ruang di atas bumi seperti yang di hirup saat bernapas, sebagai suatu gas yang ada di permukaan bumi, udara memiliki istilah lain di bidang ilmu pengetahuan, yakni atmosfer. Atmosfer adalah lapisan Angin yang menyelubungi bumi yang memiliki 4 lapisan, yakni troposfer, stratosfer, mesosfer, dan termosfer.

Yang disebutkan oleh wikipedia di atas, Angin terdiri dari berbagai macam gas. Gas-gas yang membentuk udara bila dirinci secara lengkap adalah 28% zat lemas (N_2), 21% zat asam (O_2), 0,9% argon (Ar), 0,03% asam arang (CO_2), dan 0,07% unsur lainya seperti krypton, neon, xenon, hydrogen serta kalium, senyawa atau zat-zat yang terkandung di dalam Angin ini akan berubah tergantung dengan ketinggian Angin dari permukaan tanah. Hal ini juga berlaku dengan massa Angin yang akan berkurang seiring dengan semakin tingginya Angin dari permukaan tanah. Semakin dekat dengan lapisan troposfer, maka akan semakin sedikit. Jadi, saat telah melewati batas gravitasi bumi, ruang tersebut akan menjadi hama Angin. Dari zat-zat pembentuknya tersebut, Angin memiliki sifat-sifat yang tentunya juga di pengaruhi oleh zat pembentuknya, Sifat-sifat Angin adalah sebagai berikut.

- a) Angin ada di mana pun, memiliki massa, dan menekan ke segala arah.
- b) Bila Angin itu bergerak ke suatu arah, disebut dengan angin.
- c) Angin akan bergerak naik bila berada di tempat berhawa panas
- d) Angin yang bergerak tersebut atau angin selalu bergerak dari tempat yang tekanannya lebih tinggi ke tempat yang tekanannya lebih rendah.



Sebagai salah satu unsur penting dalam sebuah kehidupan makhluk hidup di seluruh permukaan bumi, Angin memiliki fungsi untuk bernapas, proses pembakaran, menjadi media perantara dan media cahaya dan suara, menggerakkan baling –baling dan kincir angin, dan masih banyak lagi. Fungsi-fungsi Angin tersebut tentunya tak bisa lepas dari adanya pengertian Angin menurut para ahli yang juga menjelaskan hal yang sama. Melihat fungsi dimana kegunaan dan kegunaan yang begitu penting, perlulah kita ikut menjaga kelestarian lingkungan agar Angin juga ikut terjaga dan tidak tercemar.

2.10 Pengaruh Kecepatan Angin Terhadap Sel Surya

Beberapa faktor berperan dalam efisiensi panel surya. Jenis sel surya dan bagaimana panel dibangun adalah faktor yang paling penting dalam seberapa efisien mereka. Selain kemampuan bawaan dari panel itu sendiri, faktor lingkungan ikut berperan. Tidak mengherankan, kecepatan angin adalah faktor efisiensi lingkungan yang pada akhirnya akan mempengaruhi efisiensi panel surya. Kecepatan angin tidak memberikan semangat ekstra pada sinar matahari saat menyalakan panel, efek angin adalah peningkatan efisiensi matahari.

Ketika panel surya terlalu panas, efisiensi nya berkurang karena ilmu di balik panel surya menghasilkan listrik . Di sisi lain, suhu panel surya yang lebih dingin meningkatkan efisiensi. Singkatnya, efek suhu pada kinerja yaitu panel yang lebih dingin memungkinkan lebih banyak energi untuk melewatinya seperti arus listrik daripada panel panas. Di sinilah angin masuk. Angin mendinginkan panel surya. Meskipun itu tidak akan membuat atau menghancurkan produksi panel surya Anda secara keseluruhan, itu membuat perbedaan. Panel surya yang didinginkan 1 derajat Celcius lebih efisien 0,05 persen. Persentase ini bertambah seiring waktu.



2.11 Pengaruh *Irradiance* atau Intensitas Cahaya Matahari terhadap Sel

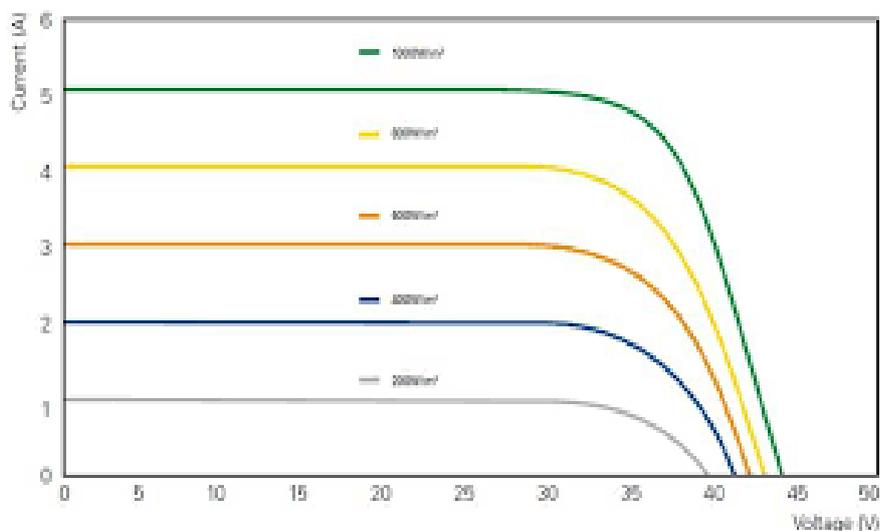
Surya

Radiasi matahari yang diterima bumi terdistribusi pada beberapa *range* panjang gelombang, mulai dari 3 nm sampai dengan 4 mikron. Sebagian radiasi mengalami refleksi di atmosfer (*diffuse radiation*) dan sisanya dapat sampai ke permukaan bumi (*direct radiation*). Kedua radiasi ini yang dipakai untuk mengukur besaran radiasi yang diterima sel surya. Besaran – besaran penting untuk mengukurnya adalah :

- a) *Spectral irradiance* I_λ : Daya yang diterima oleh satu unit area dalam bentuk diferensial panjang gelombang $d\lambda$, satuan : $W/m^2 \mu m$.
- b) *Irradiance* : Integral dari *spectral irradiance* untuk keseluruhan panjang gelombang, satuan W/m^2 .
- c) Radiasi : Integral waktu dari *irradiance* untuk jangka waktu tertentu. Oleh sebab itu, satuannya sama dengan satuan energi, yaitu J/m^2 -hari, J/m^2 -bulan atau J/m^2 -tahun.

Diantara ketiga besaran tersebut, yang akan digunakan dalam analisa adalah W/m^2 karena satuan ini yang biasa dipakai dalam *data sheet*, sedangkan besaran radiasi biasanya digunakan untuk menghitung estimasi daya keluaran pada instalasi sistem. *Irradiance* merupakan sumber energi bagi sel surya, sehingga keluarannya sangat bergantung oleh perubahan *irradiance*.

Dilihat dari gambar keluaran daya berbanding lurus dengan *irradiance*. Isc lebih terpengaruh oleh perubahan *irradiance* dari pada Voc. Hal ini sesuai dengan penjelasan cahaya sebagai paket-paket foton. Pada saat *irradiance* tinggi, yaitu pada saat jumlah foton banyak, arus yang dihasilkan juga besar. Demikian pula sebaliknya, sehingga arus yang dihasilkan berbanding lurus terhadap jumlah foton. Berikut merupakan gambar karakteristik kurva I-V terhadap perubahan *irradiance*.



Gambar 2. 22 Karakteristik Kurva I-V terhadap Perubahan Irradiance

Pengujian model surya pada *data sheet* umumnya dilakukan pada *standard test condition* (STC), yaitu *Air Mass* (AM) 1,5 ; *irradiance* $1000 W/m^2$ dan temperature $25^{\circ}C$. Dalam kondisi nyata, nilai *irradiance* tidak mencapai nilai tersebut, bergantung dari posisi lintang, posisi matahari dan kondisi cuaca. Nilai *irradiance* pada lokasi tertentu juga bervariasi dari bulan ke bulan.

Radiasi matahari merupakan pancaran energi yang berasal dari proses *thermonuklir* yang terjadi di matahari, atau dapat dikatakan sumber utama untuk proses proses fisika atmosfer yang menentukan keadaan cuaca dan iklim di atmosfer bumi. Radiasi surya memegang peranan penting dari berbagai sumber energi lain yang dimanfaatkan manusia. Cahaya bisa dikatakan sebagai suatu bagian yang mutlak dari kehidupan manusia. Untuk mendukung teknik pencahayaan buatan yang benar tentu saja perlu diketahui seberapa besar intensitas cahaya yang dibutuhkan pada suatu tempat. Maka, untuk mengetahui seberapa besar intensitas cahaya tersebut dibutuhkan suatu alat ukur cahaya yang dapat digunakan untuk mengukur besarnya cahaya dalam satuan *lux*.

Untuk mengukur intensitas cahaya digunakan sebuah alat yang bernama lux meter. Lux meter adalah sebuah alat yang digunakan untuk mengukur intensitas cahaya atau tingkat pencahayaan. Biasanya digunakan di dalam ruangan. Kebutuhan pencahayaan setiap ruangan terkadang berbeda. Semuanya



tergantung dan disesuaikan dengan kegiatan yang dilakukan. Untuk mengukur tingkat pencahayaan dibutuhkan suatu alat yang bisa bekerja secara otomatis mampu mengukur intensitas cahaya dan menyesuaikan dengan cahaya yang dibutuhkan.

Pengukuran intensitas cahaya menggunakan lux meter yang dihasilkan nilai intensitas cahaya dengan satuan lux. Tidak ada konversi langsung antara lux dan W/m^2 itu tergantung pada panjang gelombang atau warnah cahaya. Sehingga untuk mendapatkan konversi antara lux dan W/m^2 perlu dilakukan percobaan. Namun, ada perkiraan konversi $0,0079 W/m^2$ per lux. Jadi dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$1 \text{ lux} = 0,0079 W/m^2$$

Pada saat *irradiance* tinggi, yaitu pada saat jumlah foton banyak, arus yang dihasilkan juga besar. Demikian pula sebaliknya, sehingga arus yang dihasilkan berbanding lurus terhadap jumlah foton.

Pengaruh Irradiance Terhadap Daya Input :

$$P_{in} = I_r \times A \dots \dots \dots (2.5)$$

Keterangan :

P_{in} = Daya Input (watt)

I_r = Intensitas Irradiasi Matahari (W/m^2)

A = Luas Area Modul Surya (m^2)



2.12 Perhitungan Efisiensi Sel Surya

Perbandingan performasi antara satu modul surya dengan modul surya lainnya umumnya dilihat dari efisiensinya. Banyaknya energi matahari dalam bentuk foton yang diserap sel surya menentukan efisiensinya. Efisiensi modul surya didefinisikan sebagai perbandingan daya keluaran dengan daya masukan. Daya masukan dihitung sebagai irradianse yang diterima oleh permukaan sel surya. Nilai efisiensi ini selalu dihitung pada kondisi standar (irradianse = 1000 W/m², AM 1,5 dan temperatur 250 C). Modul surya berbahan crystalline saat ini memiliki efisiensi 14-16%. Pengaruh bahan adalah dominan dalam hal ini. Contohnya sel surya berbahan polymer/ organic ($\eta = 4-5\%$), amorphous silicon ($\eta = 6\%$), multijunction ($\eta = 30\%$)¹¹.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.6)$$

Keterangan :

η	= Efisiensi sel surya (%)
V	= Tegangan (volt)
I	= Arus (Ampere)
FF	= Fill Factor (%)

¹¹ Samsurizal, Kartika Tresya, Miftahul Fikri, Nurmiati Pasra, Christiono. (2021). Pengenalan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Institut Teknologi PLN. Jakarta