



## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Definisi Sumber Energi**

Menurut Purwadarminta energi adalah tenaga, atau gaya untuk berbuat sesuatu. Definisi ini merupakan perumusan yang lebih luas daripada pengertian-pengertian mengenai energi yang pada umumnya dianut di dunia ilmu pengetahuan. Dalam pengertian sehari-hari energi dapat didefinisikan sebagai kemampuan untuk melakukan suatu pekerjaan (Kadir, 1995 : 9).

Ada banyak sumber-sumber energi utama dan digolongkan menjadi dua kelompok besar yaitu sumber energi konvensional dan terbarukan. Sumber-sumber energi konvensional dan terbarukan bisa dikonversikan menjadi sumber-sumber energi sekunder, seperti listrik. Listrik berbeda dari sumber-sumber energi lainnya dan dinamakan sumber energi sekunder atau pembawa energi karena dimanfaatkan untuk menyimpan, memindahkan atau mendistribusikan energi dengan nyaman. Sumber energi primer diperlukan untuk menghasilkan energi listrik. Energi listrik yang semula terutama dipakai untuk penerangan dan untuk menggerakkan motor-motor dalam industri, menjadi kian penting, karena kemudian juga dipakai untuk, memproses logam pemanasan dan memasak (PNPM Mandiri : 3).

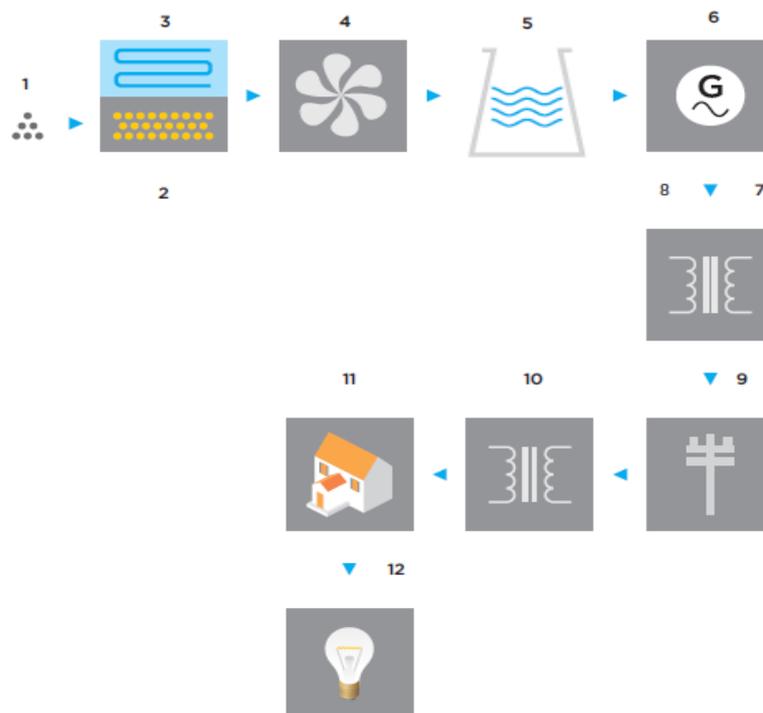
##### **2.1.1 Energi Konvensional**

Energi Konvensional adalah energi yang diambil dari sumber yang hanya tersedia dalam jumlah terbatas di bumi dan tidak dapat diregenerasi. Sumber-sumber energi ini akan berakhir cepat atau lambat dan berbahaya bagi lingkungan. Sumber-sumber energi konvensional tidak dapat tergantikan dalam waktu singkat, itulah mengapa disebut tidak terbarukan. Sumber-sumber energi konvensional



tidak ramah lingkungan; karena menimbulkan polusi udara, air, dan tanah yang berdampak kepada penurunan tingkat kesehatan dan standar hidup.

Sumber-sumber energi yang ada di Indonesia saat ini terdiri dari sumber minyak yang terbatas, sumber gas alam yang cukup, dan sumber batubara yang melimpah, serta energi panas bumi. Pembangkit listrik tenaga batubara adalah pembangkit listrik *thermal* paling awal dibangun yang menggunakan bahan bakar fosil. Pembangkit listrik tenaga batu bara membakar batubara untuk memanaskan air yang digunakan untuk menggerakkan turbin uap, terutama baling-baling besar dengan bilah-bilah logam yang dikemas rapat untuk membangkitkan tenaga. Diagram pembangkit listrik diperlihatkan pada gambar 2.1 (PNPM Mandiri : 6).



Gambar 2.1 Skema pembangkit listrik

Keterangan gambar 2.1:

1. Batu bara dimuat ke dalam pembangkit;
2. Batu bara dibakar dalam tungku besar untuk menghasilkan panas;
3. Air dipanaskan di dalam tungku;



4. Uap menggerakkan turbin menciptakan energi mekanik;
5. Air mendidih dari uap turbin didinginkan pada menara pendingin dan pompa untuk digunakan kembali;
6. Turbin memutar generator dan membangkitkan listrik;
7. Listrik mengalir melalui kabel-kabel;
8. Trafo step-up merubah tegangan listrik menjadi sangat tinggi;
9. Tiang logam raksasa membawa listrik bertegangan sangat tinggi melalui kabel-kabel;
10. Trafo step-down merubah listrik tegangan tinggi menjadi tegangan rendah yang aman untuk perumahan;
11. Listrik mengalir dari rumah ke rumah melalui kabel transmisi;
12. Listrik mengalir rumah melalui jaringan listrik.

Pembangkit listrik tenaga gas (PLTG) bekerja atas prinsip yang sama dengan listrik tenaga uap (PLTU). Tetapi, turbin gas lah yang digunakan untuk menciptakan energi, mesin rotasi bukannya turbin uap. Pada langkah 4, paduan gas dan udara dinyalakan dan menggerakkan turbin gas. Proses operasional pembangkit listrik tenaga gas selanjutnya mirip dengan pembangkit listrik tenaga uap. Proses operasional pembangkit listrik tenaga gas selanjutnya mirip dengan pembangkit listrik tenaga uap.

### **2.1.2 Energi Terbarukan**

Energi terbarukan adalah energi yang dihasilkan dari sumber alami seperti matahari, angin, dan air dan dapat dihasilkan lagi dan lagi. Sumber akan selalu tersedia dan tidak merugikan lingkungan. Energi terbarukan adalah sumber-sumber energi yang bisa habis secara alamiah. Energi terbarukan merupakan sumber energi paling bersih yang tersedia di planet ini.

Ada beragam jenis energi terbarukan, namun tidak semuanya bisa digunakan di daerah-daerah terpencil dan pedesaan. Tenaga surya, tenaga angin, biomassa dan tenaga air adalah teknologi yang paling sesuai untuk menyediakan



energi di daerah-daerah terpencil dan pedesaan. Adapun berbagai energi terbarukan diantaranya:

a. Energi matahari

Matahari terletak berjuta-juta kilometer dari bumi (149 juta kilometer) akan tetapi menghasilkan jumlah energi yang luar biasa banyaknya. Energi yang dipancarkan oleh matahari yang mencapai bumi setiap menit akan cukup untuk memenuhi kebutuhan energi seluruh penduduk manusia di planet kita selama satu tahun, jika bisa ditangkap dengan benar.

Tenaga surya bisa dimanfaatkan dengan cara-cara lain: Sel Surya (yang disebut dengan sel 'fotovoltaik' yang mengkonversi cahaya matahari menjadi listrik secara langsung. Pada waktu memanfaatkan energi matahari untuk memanaskan air, panas matahari langsung dipakai untuk memanaskan air yang dipompakan melalui pipa pada panel yang dilapisi cat hitam.

b. Tenaga angin

Pada saat angin bertiup, angin disertai dengan energi kinetik (gerakan) yang bisa melakukan suatu pekerjaan. Contoh: perahu layar memanfaatkan tenaga angin untuk mendorongnya bergerak di air. Tenaga angin juga bisa dimanfaatkan menggunakan baling-baling yang dipasang di puncak menara, yang disebut dengan turbin angin yang akan menghasilkan energi mekanik atau listrik.

c. Biomassa

Biomassa merupakan salah satu sumber energi yang telah digunakan orang sejak dari jaman dahulu kala: orang telah membakar kayu untuk memasak makanan selama ribuan tahun. Biomassa adalah semua benda organik (misal: kayu, tanaman pangan, limbah hewan, dan manusia) dan bisa digunakan sebagai sumber energi untuk memasak, memanaskan dan pembangkit listrik.

d. Tenaga air

Tenaga air adalah energi yang diperoleh dari air yang mengalir atau air terjun. Air yang mengalir ke puncak baling-baling atau baling-baling yang ditempatkan di sungai, akan menyebabkan baling-baling bergerak dan menghasilkan tenaga mekanik atau listrik. Tenaga air sudah cukup



dikembangkan dan ada banyak pembangkit listrik tenaga air (PLTA) yang menghasilkan listrik di seluruh Indonesia. Akan tetapi, hampir semua program PLTA kecil di Indonesia merupakan program yang memanfaatkan aliran sungai dan tidak mengharuskan mengubah aliran alami air sungai.

## **2.2 Tenaga Surya**

Matahari merupakan sumber energi natural yang tidak akan habis dan kita dapat memakainya dimana pun berada. Indonesia sendiri merupakan sebuah negara yang dilewati oleh garis khatulistiwa dan menerima panas matahari yang lebih banyak daripada negara lain, mempunyai potensi yang sangat besar untuk mengembangkan pembangkit listrik tenaga surya sebagai alternatif batubara dan diesel sebagai pengganti bahan bakar fosil, yang bersih, tidak berpolusi, aman dan persediaannya tidak terbatas (Subandi, 2014 : 1).

Energi surya merupakan sumber energi utama dalam kehidupan di dunia dan memegang peranan yang paling penting dari berbagai sumber energi lain yang dimanfaatkan oleh manusia. Matahari memancarkan energi yang sangat besar ke segala arah. Sinar surya yang sampai ke permukaan bumi dipengaruhi oleh banyak faktor, diantaranya adalah letak geografis, musim, iklim, keadaan atmosfer (berawan, berdebu, kandungan uap air). Daerah di sekitar khatulistiwa menerima sinar surya rata-rata tahunan sekitar  $600-700 \text{ W/m}^2$ , selama 8 jam sehari. Dalam keadaan tertentu kadang lebih dari  $1000 \text{ W/m}^2$ , tetapi ini hanya terjadi dalam waktu yang sangat singkat. Hal ini karena pengaruh adanya awan, debu, dan uap air di udara. Secara langsung pengaruh adanya awan, debu dan uap air tidak nampak nyata, yang nampak cuaca cerah (Supranto, 2015 : 32).

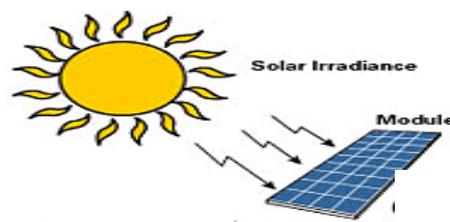
Pembangkit listrik energi surya yang efisien dapat menghasilkan energi yang dapat memenuhi kebutuhan energi untuk setempat dan juga dapat diekspor ke negara-negara tetangga. Di samping itu, sistem pembangkit listrik energi surya mempunyai banyak kelebihan jika dibandingkan dengan sistem pembangkit listrik dengan energi lain seperti hidrolistrik, nuklir dan batu bara. Pembangkit listrik tenaga surya dapat dibangun di kawasan-kawasan yang berdekatan dengan



pengguna, tidak seperti pembangkit listrik energi hidrolistrik yang harus dibangun di sungai-sungai yang mempunyai aliran yang deras dan mencukupi. Pembangkit listrik energi surya juga tidak mempunyai efek pencemaran alam sekitar seperti halnya nuklir dan batu bara (Supranto, 2015 : 21).

### 2.2.1 Radiasi Tenaga Surya

Daya yang dihasilkan sebuah panel surya bergantung pada radiasi matahari yang diterima, luas permukaan panel dan suhu panel. Daya yang dihasilkan semakin besar jika radiasi dan luas permukaan lebih besar, sedang kenaikan suhu mengakibatkan penurunan daya (<http://anggoero.blogspot.com/2010/03/panel-surya-sel-surya.html>). Gambar 2.2 berikut menunjukkan sinar matahari yang jatuh secara langsung ke permukaan modul surya.



Gambar 2.2 Cahaya matahari yang jatuh ke permukaan modul surya

Intensitas radiasi matahari di luar atmosfer bumi bergantung pada jarak antara matahari dengan bumi. Tiap tahun, jarak ini bervariasi antara  $1,47 \times 10^8$  km dan  $1,52 \times 10^8$  km dan hasilnya besar pancaran  $E_0$  naik turun antara  $1325 \text{ W/m}^2$  sampai  $1412 \text{ W/m}^2$ . Nilai rata-ratanya disebut sebagai konstanta matahari dengan nilai  $E_0 = 1367 \text{ W/m}^2$  (Yohana, 2012 : 1). Nilai konstan ini bukanlah besarnya radiasi yang sampai di permukaan bumi. Atmosfir bumi mereduksi atau mengurangi radiasi matahari tersebut melalui proses pemantulan, penyerapan (oleh ozon, uap air, oksigen dan karbon dioksida) dan penghamburan (oleh molekul-molekul udara, partikel debu atau polusi). Nilai ini relatif terhadap lokasi.

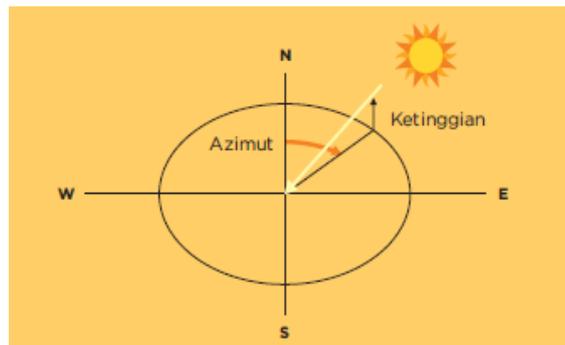
Lokasi matahari ditentukan oleh dua sudut, yaitu (PNPM Mandiri : 19):

- a. Sudut ketinggian matahari ( $\alpha$ ) adalah sudut antara cahaya matahari dan bidang horizontal.



- b. Azimuth matahari ( $\alpha$ ) adalah sudut antara proyeksi cahaya matahari pada bidang horizontal (sudut kemiringan modul) dan utara (di belahan bumi selatan) atau selatan (di belahan bumi utara).

Adapun hubungan sudut ketinggian dan azimuth matahari ditunjukkan oleh gambar 2.3.



Gambar 2.3 Hubungan sudut ketinggian dan azimuth matahari

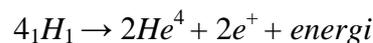
Radiasi matahari adalah integrasi atau penjumlahan penyinaran matahari selama periode waktu. Kecepatan di mana energi matahari mencapai kawasan bumi disebut dengan *solar irradiance* atau *insolation*. *Insolation* adalah ukuran energi radiasi matahari yang diterima di suatu kawasan bumi pada suatu waktu. Satuan ukuran untuk *irradiance* adalah watt per meter persegi ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). Sementara, satuan ukuran radiasi matahari atau adalah joule per meter persegi ( $\text{J}/\text{m}^2$ ) atau watt-hour per meter persegi ( $\text{Wh}/\text{m}^2$ ).

Radiasi matahari yang dapat diterima oleh panel surya dibagi menjadi tiga jenis, yaitu (Nugroho, 2012 : 2):

- Radiasi langsung (*direct radiation* atau *beam radiation*) yaitu intensitas radiasi matahari yang langsung diterima di permukaan bumi.
- Radiasi tersebar (*diffuse radiation*) yaitu radiasi matahari yang diterima di permukaan bumi karena pantulan awan dan partikel di atmosfer bumi.
- Radiasi pantulan yaitu radiasi yang dipantulkan oleh permukaan yang berdekatan, besarnya dipengaruhi oleh reflektansi permukaan yang berdekatan.



Nilai *irradiance* matahari maksimum digunakan dalam perancangan sistem untuk menentukan tingkat puncak input energi memasuki sistem matahari. Jika penyimpanan dimasukkan ke dalam perancangan sistem, maka penting untuk mengetahui variasi *irradiance* matahari selama periode tersebut untuk mengoptimalkan desain sistem. Energi yang diradiasikan akibat transformasi hidrogen menjadi helium yang kemudian menghasilkan energi



Sebagian energi tersebut ditransmisikan ke bumi dengan cara radiasi gelombang elektromagnetik. Radiasi menjalar dengan kecepatan cahaya ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ) dalam bentuk gelombang yang mempunyai panjang gelombang yang berbeda-beda. Peristiwa ini akan berhenti jika hidrogen dalam reaksi inti habis. Radiasi yang diemisikan oleh matahari dan ruang angkasa ke bumi menghasilkan intensitas radiasi matahari yang hampir konstan di luar atmosfer bumi (Afifudin, 2012 : 2).

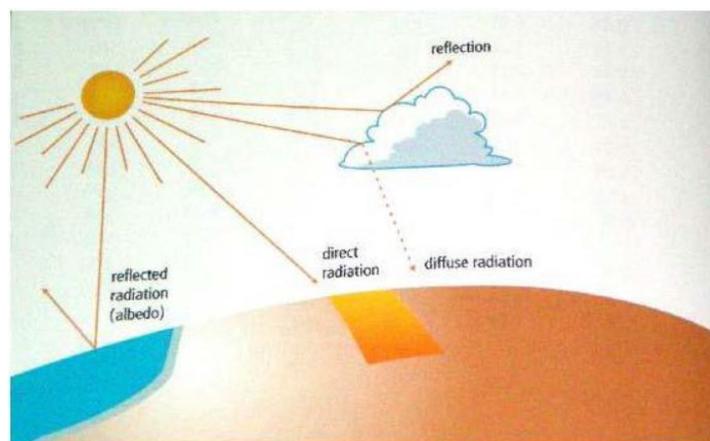
### 2.2.2 Distribusi Radiasi Matahari

Indonesia terletak di kawasan iklim khatulistiwa, sinar surya rata-rata harian adalah  $4000\text{-}5000 \text{ W/m}^2$ , sedangkan rata-rata jumlah jam sinaran antara 4 hingga 8 jam. Sinar surya mempunyai dua komponen (a) sinar surya langsung dan (b) sinar surya tidak langsung (berpendar). Komponen sinar surya langsung adalah yang dihantar tanpa diserap dalam awan dan langsung menimpa bumi, sedangkan sinar surya tak langsung adalah setelah mengenai awan dan menimpa bumi. Jumlah kedua-duanya dikenal sebagai sinar surya global atau sinaran surya sejagat. Keadaan langit di kawasan tropika ini berawan, karena komponen sinar surya langsung kurang dari 40%. Perincian ini penting terutama dalam membuat dan pemilihan pengumpul surya (Supranto, 2015 : 21).

Radiasi surya yang melalui atmosfer bumi akan mengalami penurunan intensitas atau berkurang, karena ada hamburan oleh partikel aerosols dan penyerapan oleh gas atmosfer seperti  $O_2$ , Ozone,  $H_2O$  dan  $CO_2$ . Radiasi yang



dihamburkan disebut difusi sebagian dan radiasi difusi kembali ke udara dan sebagian menuju ke permukaan bumi. Radiasi yang langsung mencapai permukaan bumi disebut radiasi langsung hanya 51% dan 4% dipantulkan kembali ke udara oleh permukaan bumi, 26% dihamburkan atau dipantulkan ke udara oleh partikel atmosfer dan awan, dan 19% diserap oleh gas atmosfer, partikel dan awan (Sudradjat, 2007 : 3). Proses distribusi radiasi matahari ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Distribusi radiasi matahari

Jumlah total radiasi yang diterima di permukaan bumi tergantung pada empat faktor sebagai berikut (Tilong, 2013 : 43).

- a. Jarak matahari. Setiap perubahan jarak bumi dan matahari menimbulkan variasi terhadap penerimaan energi matahari.
- b. Intensitas radiasi matahari, yaitu besar-kecilnya sudut datang sinar matahari pada permukaan bumi. Jumlah yang diterima berbanding lurus dengan besarnya sudut datang. Sinar dengan sudut datang yang miring kurang memberikan energi pada permukaan bumi dikarenakan energinya tersebar pada permukaan yang luas. Selain itu, juga karena sinar tersebut harus menempuh lapisan atmosfer yang datang lebih jauh ketimbang jika sinar dengan sudut datang yang tegak lurus.
- c. Panjang hari (*sun duration*), yaitu jarak dan lamanya antara matahari terbit dan matahari terbenam.



- d. Pengaruh atmosfer. Sinar yang melalui atmosfer sebagian akan diadsorpsi oleh gas-gas, debu-debu, dan uap air lalu dipantulkan kembali, dipancarkan, dan sisanya diteruskan ke permukaan bumi. Selain itu, radiasi matahari bisa menangkal *black hole* yang bisa memerangkap cahaya.

### 2.2.3 Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pemanfaatan energi matahari dalam pembangkitan energi listrik telah banyak dilakukan salah satunya dengan menggunakan panel surya. Tenaga surya adalah energi yang berasal dari matahari. Tenaga surya hadir dalam bentuk panas dan cahaya. Tidak seperti minyak bumi, batu bara dan energi fosil lainnya, energi matahari ramah lingkungan, untuk pemakaiannya tidak menghasilkan emisi gas buang CO<sub>2</sub> yang dapat merusak lingkungan, oleh karena itu teknologi panel surya sangat mendukung penyediaan energi alternatif pada saat krisis energi dan mendukung pencegahan pemanasan global di dunia (<http://anggoero.blogspot.com/2010/03/panel-surya-sel-surya.html>).

Dalam pengoperasian panel surya sebagai pembangkit listrik terdapat beberapa komponen pendukung yang melengkapi sistem pembangkitnya, yaitu meliputi panel surya, *controller regulator*, baterai/aki, dan inverter (Hakim, 2015 : 5).

#### 1. Panel Surya

Panel surya adalah teknologi berdasarkan semi-konduktor dalam kondisi padat yang mengkonversi energi cahaya matahari secara langsung menjadi energi listrik. Listrik yang dihasilkan oleh panel surya berupa listrik arus searah (*direct current*). Panel surya bervariasi panjang dan lebar dan sering tebal sekitar 2 inci. Modul tenaga surya dapat ditemukan dalam berbagai watt, dimana watts adalah ukuran utama panel surya bersama dengan tegangan nominal.



## 2. *Controller Regulator*

*Controller regulator* adalah alat elektronik pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Fotovoltaik (PLTSF). Berfungsi mengatur lalu lintas listrik dari modul surya ke *battery/accu* (apabila *battery/accu* sudah penuh maka listrik dari modul surya tidak akan dimasukkan ke *battery/accu* dan sebaliknya), dan dari *battery/accu* ke beban (apabila listrik dalam *battery/accu* tinggal 20-30% maka listrik ke beban otomatis dimatikan).

## 3. Baterai/ Aki

Baterai berfungsi menyimpan arus listrik yang dihasilkan oleh panel surya sebelum dimanfaatkan untuk menggerakkan beban. Beban dapat berupa lampu penerangan atau peralatan elektronik dan peralatan lainnya yang membutuhkan listrik. Penyimpan energi listrik dari panel surya adalah sangat penting dalam sistem *solar cell*. Fungsi utamanya adalah menyimpan kelebihan pasokan energi listrik yang dihasilkan panel surya. Kelebihan pasokan yang telah disimpan ke aki bisa digunakan saat panel surya berhenti mensuplai energi listrik. Contoh kasus adalah pada waktu matahari redup atau gelap (hujan), dimana tidak mungkin mendapatkan sinar matahari, maka digunakan energi listrik yang tersimpan dalam perangkat penyimpan energi listrik. Baterai yang digunakan sebagai penyimpan energi dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Baterai penyimpan energi

## 4. Inverter AC

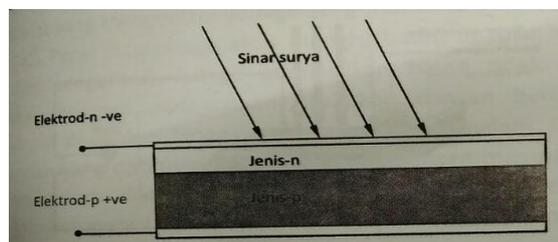
Inverter AC berfungsi merubah arus DC dari baterai/aki menjadi arus AC, arus yang dihasilkan oleh inverter sangatlah stabil, sehingga sudah tidak



memerlukan alat stabilizer lagi, serta aman dan berproteksi tinggi. Sangat fleksibel dalam penempatan desain Pembangkit Listrik Tenaga Surya.

### 2.3 Sel Surya (*Solar Cell*) dan Prinsip Kerjanya

*Solar cell* atau sel *photovoltaic*, adalah sebuah alat semikonduktor yang terdiri dari sebagian besar dioda *p-n junction* dan dengan adanya cahaya matahari mampu menciptakan energi listrik. Perubahan ini disebut efek *photovoltaic* (Afifudin, 2012). Sel surya ialah simpangan *p-n* yang terdiri dari sekeping wafer semikonduktor silikon jenis-*p* yang diendapkan di atasnya satu lapisan tipis semikonduktor silikon jenis-*n*. Wafer sebelah bawah dinamakan tapak, sedangkan lapisan di atasnya dinamakan lapisan permukaan. Lapisan jenis-*n* ialah lapisan yang menghadap sinar surya. Skema penerimaan cahaya pada sel surya dapat digambarkan dalam gambar 2.6. (Supranto, 2015 : 159).

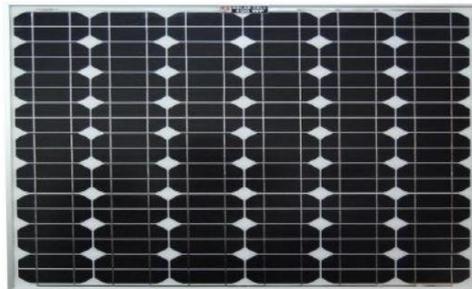


Gambar 2.6 Skema sel fotovoltaik

Untuk mendapatkan daya dan tegangan listrik yang diinginkan, sel surya dihubungkan secara seri dan parallel kemudian dilaminasi dan diberi bingkai dan disebut menjadi modul surya (Sudradjat, 2007 : 13). Modul surya fotovoltaik (PV) mengkonversi cahaya matahari menjadi listrik. Jumlah energi listrik yang dihasilkan oleh modul PV bergantung kepada tenaga surya yang tersedia, dan yang sangat khususnya, bergantung kepada arah modul surya terhadap matahari. Jika modul surya dipasang di selatan ekuator, maka harus menghadap utara dan sebaliknya. Modul PV akan menghasilkan output terbanyak jika diarahkan langsung ke matahari. Modul ini tersedia dalam berbagai kapasitas, mulai dari 1 watt hingga 300 watt. Energi yang dimiliki tanah pada bumi kita memiliki nilai maksimum 1000 watt per meter persegi. Ini dinamakan matahari puncak dan



tingkat modul PV adalah tenaga puncak yang bisa dipasok oleh modul pada saat energi dari matahari adalah 1000 watt per meter persegi. Gabungan dari beberapa modul surya disebut panel surya seperti ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Panel surya

*Photovoltaic* (PV) adalah teknologi berdasarkan semi-konduktor dalam kondisi padat yang mengkonversi energi cahaya matahari secara langsung menjadi energi listrik, tanpa ada bagian yang berputar, tidak menimbulkan kebisingan, dan tanpa mengeluarkan gas buangan.

Prinsip operasi sel fotovoltaic ditemukan oleh Adams dan Day pada tahun 1876 dengan menggunakan selenium. Pada 1919, Coblenz menemukan bahwa voltase dibangkitkan antara daerah yang disinari dan daerah yang gelap pada suatu kristal semi-konduktor. Pada tahun 1941, Ohl menemukan efek fotovoltaic pada sambungan *n-p* pada dua semikonduktor. Hal yang menarik dari sistem ini terutama adalah kemampuannya untuk mengubah energi elektromagnetik dari sinar matahari menjadi energi listrik secara langsung. Menurut hukum perpindahan energi panas radiasi dari Wiens, energi radiasi matahari yang paling mungkin adalah 2,8 eV (Sitompul, 1996 : 412).

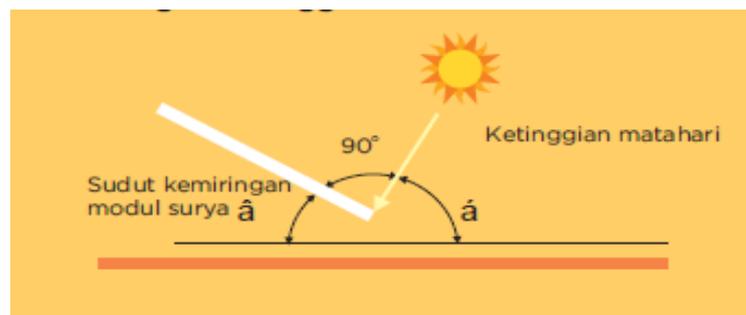
Adapun prinsip kerja suatu sistem *photovoltaic* secara umum adalah semua teknologi berbasis semi-konduktor bekerja dengan prinsip yang sama: foton dari sinar matahari menerpa elektron di dalam sel PV sehingga memberikan energi yang cukup bagi sebagian elektron untuk berpindah dari *junction* semi-konduktor dan menimbulkan “tekanan” listrik. Alasan untuk tekanan ini adalah bahwa ada ketidakseimbangan listrik, terlalu banyak elektron (bermuatan negatif)



pada satu sisi *junction*, dan terdapat terlalu banyak muatan positif di sisi lainnya. Pada saat elektron mengalir dari tempat dengan terlalu banyak elektron ke tempat dengan terlalu sedikit elektron, maka tekanan akan berkurang. Hal ini terjadi ketika ada interkoneksi di antara sel. Pada saat sel saling dihubungkan, maka terciptalah modul (PNPM Mandiri : 29)

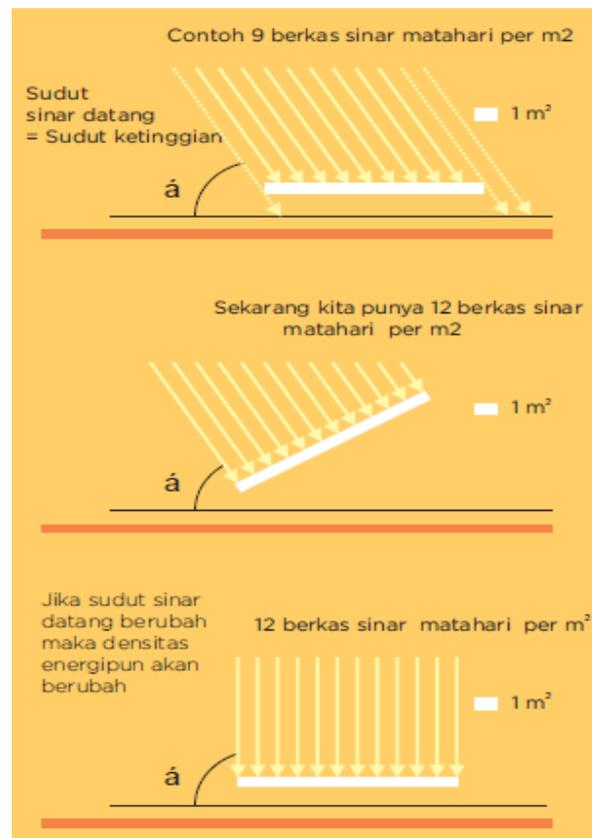
Modul surya menghasilkan arus searah (DC) yang berarti arus satu arah. Jika peralatan di rumah atau bangunan memerlukan arus bolak-balik (AC) untuk mengoperasikannya, maka arus searah (DC) dari modul PV harus diubah menjadi arus bolak-balik (AC). Hal ini bisa dilakukan menggunakan inverter.

Biasanya panel surya diletakkan dengan posisi statis menghadap matahari. Padahal bumi itu bergerak mengelilingi matahari. Orbit yang ditempuh bumi berbentuk elips dengan matahari berada di salah satu titik fokusnya. Karena matahari bergerak membentuk sudut selalu berubah, maka dengan posisi panel surya itu yang statis itu tidak akan diperoleh energi listrik yang optimal. Agar dapat terserap secara maksimum, maka sinar matahari itu harus diusahakan selalu jatuh tegak lurus pada permukaan panel surya (Ihsan, 2013 : 3). Hubungan modul surya terhadap ketinggian matahari dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Hubungan modul surya dengan ketinggian matahari

Jadi, untuk mendapatkan energi listrik yang optimal, sistem sel surya itu masih harus dilengkapi pula dengan rangkaian kontroler optional untuk mengatur arah permukaan panel surya agar selalu menghadap matahari sedemikian rupa sehingga sinar matahari jatuh hampir tegak lurus pada panel suryanya. Pengaruh efek geometri matahari ditunjukkan pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Efek geometri sinar matahari

### 2.3.1 Karakteristik Modul Surya

Kinerja sel surya yang terbaik ditunjukkan oleh karakteristik arus tegangan. Oleh karena itu, penting untuk mengetahui tegangan output ( $V$ ) dan arus keluaran ( $I$ ) dan bagaimana mereka bervariasi untuk hubungan satu sama lain. Daya ( $P$ ) yang diproduksi oleh sel surya adalah produk dari tegangan ( $V$ ) dan arus ( $I$ ) untuk karakteristik operasi tertentu (PNPM Mandiri : 31).

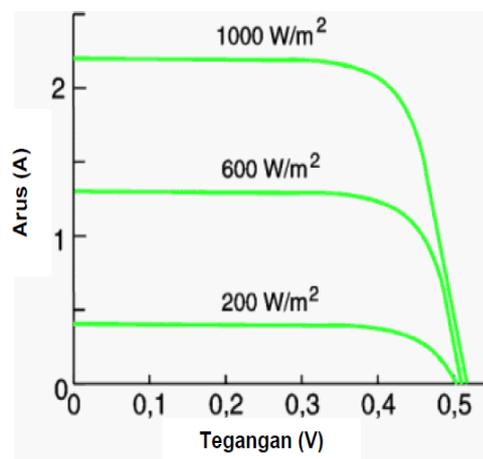
Kinerja modul surya digambarkan dengan karakteristik kurva I-V atau kurva arus listrik ( $I$ ) terhadap tegangan ( $V$ ). Modul surya akan menghasilkan arus listrik maksimum apabila tidak ada komponen tahanan ( $R$ ) pada rangkaian, dengan kata lain kutub positif dan kutub negatif dihubungkan. Arus maksimum biasa disebut sebagai arus hubung singkat ( $I_{sc}$ ) dimana terjadi pada saat tegangan modul surya sama dengan nol ( $V = 0$ ).



Sebaliknya tegangan maksimum dihasilkan pada saat rangkaian tidak terhubung. Tegangan ini disebut sebagai tegangan terbuka ( $V_{oc}$ ), pada kondisi tahanan  $R$  sangatlah besar dan tidak ada sama sekali arus yang mengalir karena rangkaian listrik tidak terhubung atau dengan kondisi terbuka.

Besaran daya listrik dengan satuan Watt didapatkan dengan cara mengalikan tegangan dan arus listrik ( $Watt = Volt \times Ampere$ ). Daya maksimum umumnya disebut dengan daya puncak dengan notasi mp, jadi arus listrik pada posisi maksimum dituliskan sebagai  $I_{mp}$  dan tegangan sebagai  $V_{mp}$ .

Kurva arus-tegangan setiap produk modul surya haruslah dibuat pada kondisi standar intensitas cahaya matahari dan temperatur modul surya, dikarenakan keluaran daya dari modul surya ini sangatlah tergantung kepada intensitas cahaya matahari yang jatuh di permukaan modul surya akan semakin besar arus listrik yang dihasilkan, dengan kata lain intensitas cahaya matahari berbanding lurus dengan keluaran arus listrik, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.10. Sedangkan temperatur modul surya akan berbanding terbalik dengan keluaran tegangan yang dihasilkan, jadi semakin besar temperatur modul surya, tegangannya akan semakin menurun. Standar kurva I-V suatu modul surya dibuat pada kondisi intensitas cahaya  $1000 \text{ W/m}^2$  dan temperatur modul surya  $25^\circ\text{Celcius}$  (Sudradjat, 2007 : 15).



Gambar 2.10 Pengaruh tingkat radiasi pada I-V sel surya



### 2.3.2 Jenis Solar Cell

*Solar cell* atau *photovoltaic* adalah alat yang dapat mengkonversi cahaya matahari secara langsung untuk diubah menjadi listrik. Bahan semikonduktor seperti *silicon*, *gallium arsenide*, dan *cadmium telluride* atau *copper indium deselenide* biasanya digunakan sebagai bahan bakunya. Semi-konduktor adalah bahan yang bukan bersifat isolator atau konduktor tetapi menunjukkan beberapa sifat keduanya. Berdasarkan jenis dan bentuk susunan atom-atom penyusunnya, *solar cell* dapat dibedakan menjadi 3 jenis, yaitu (Afifudin, 2012 : 2):

#### 1. Monokristal (*Mono-crystalline*)



Gambar 2.11 Sel surya jenis *Mono-crystalline*

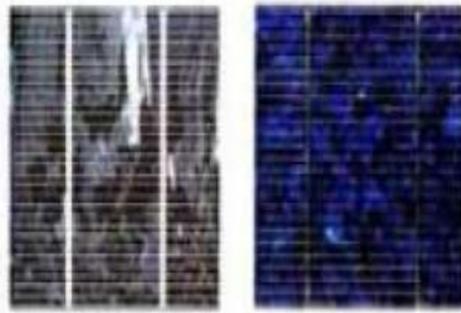
Gambar 2.11 menunjukkan sel surya jenis monokristal, yaitu kristal yang mempunyai satu jenis macamnya merupakan panel yang paling efisien yang dihasilkan dengan teknologi terkini dan menghasilkan daya listrik persatuan luas yang paling tinggi. Monokristal dirancang untuk penggunaan yang memerlukan konsumsi listrik besar pada tempat-tempat yang beriklim ekstrim dan dengan kondisi alam yang sangat ganas. Memiliki efisiensi sampai dengan 14% - 18%. Kelemahan dari panel jenis ini adalah tidak akan berfungsi baik ditempat yang cahaya matahari kurang (teduh), sehingga efisiensinya akan turun drastis dalam cuaca berawan. Jenis monokristal antara lain:

- a. *Gallium Arsenide Cell*, sangat efisien dari semua sel, tetapi harganya sangat mahal. Efisiensi dari sel ini mampu mencapai 25%.
- b. *Cadmium Sulfide Cell*, merupakan suatu bahan yang dapat dipertimbangkan dalam pembuatan sel surya, karena harga yang murah dan mudah dalam proses pembuatannya.



## 2. Polikristal (*Poly-crystalline*)

Merupakan panel surya yang memiliki susunan kristal acak karena dipabrikasi dengan proses pengecoran. Tipe ini memerlukan luas permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan jenis monokristal untuk menghasilkan daya listrik yang sama. Panel surya jenis ini memiliki efisiensi lebih rendah dibandingkan tipe monokristal, sehingga memiliki harga yang cenderung lebih rendah. Gambar sel surya jenis polikristal ditunjukkan pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Sel surya jenis *Poly-crystalline*

## 3. *Amorphous*

“Amorf” mengacu pada objek memiliki bentuk yang pasti dan tidak ada didefinisikan sebagai bahan non-kristal. Tidak seperti silikon kristal, dimana susunan atom yang teratur, fitur silikon amorf pengaturan atomnya tidak teratur. Bahan yang digunakan berupa proses film yang tipis dengan efisiensi sekitar 4-6%. Gambar 2.13 berikut menunjukkan sel surya jenis amorf.

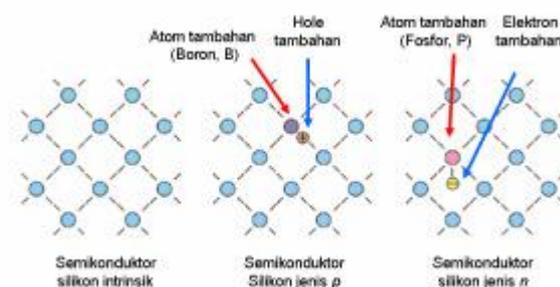


Gambar 2.13 Sel surya jenis *Amorphous*



Sel surya diproduksi dari bahan semikonduktor yaitu silikon/pasir silikat ( $\text{SiO}_2$ ) yang berperan sebagai insulator pada temperatur rendah dan sebagai konduktor bila ada energi dan panas. Bahan sel surya sendiri terdiri dari: kaca pelindung dan material *adhesive* transparan yang melindungi bahan sel surya dari keadaan lingkungan; material anti-refleksi untuk menyerap lebih banyak cahaya dan mengurangi jumlah cahaya yang dipantulkan; semi-konduktor tipe *p* dan tipe *n* (terbuat dari campuran silikon) untuk menghasilkan medan listrik; saluran awal dan saluran akhir (terbuat dari logam tipis) untuk mengirim elektron ke perabot listrik.

Proses pengubahan atau konversi cahaya matahari menjadi listrik ini dimungkinkan karena bahan material yang menyusun sel surya berupa semikonduktor. Lebih tepatnya tersusun atas dua jenis semikonduktor; yakni jenis *n* dan jenis *p*. Semikonduktor jenis *n* merupakan semikonduktor yang memiliki kelebihan elektron, sehingga kelebihan muatan negatif, (*n* = negatif). Sedangkan semikonduktor jenis *p* memiliki kelebihan hole, sehingga disebut dengan *p* (*p* = positif) karena kelebihan muatan positif. Caranya, dengan menambahkan unsur lain ke dalam semikonduktor, maka kita dapat mengontrol jenis semikonduktor tersebut, sebagaimana diilustrasikan pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.14 Jenis semi-konduktor silikon

Pada awalnya, pembuatan dua jenis semikonduktor ini dimaksudkan untuk meningkatkan tingkat konduktifitas atau tingkat kemampuan daya hantar listrik dan panas semikonduktor alami. Di dalam semikonduktor alami (disebut dengan semikonduktor intrinsik) ini, elektron maupun hole memiliki jumlah yang sama.



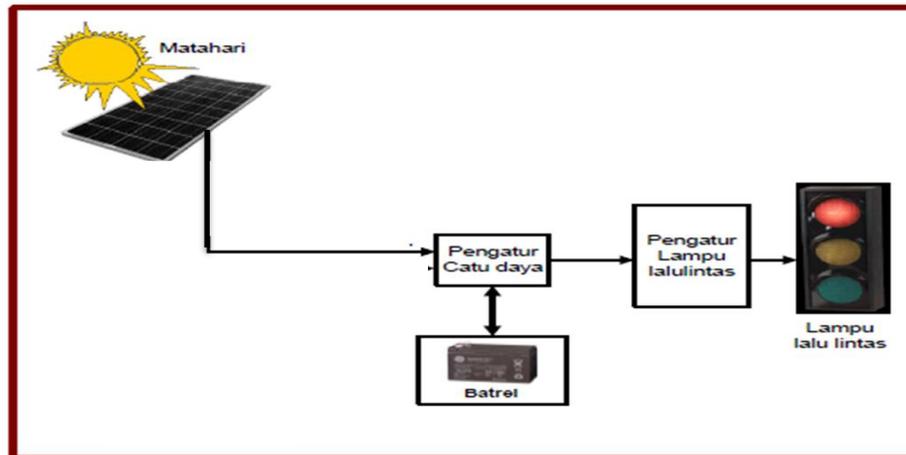
Kelebihan elektron atau hole dapat meningkatkan daya hantar listrik maupun panas dari sebuah semikonduktor.

Misal semikonduktor intrinsik yang dimaksud ialah silikon (Si). Semikonduktor jenis  $p$ , biasanya dibuat dengan menambahkan unsur boron (B), aluminum (Al), gallium (Ga) atau Indium (In) ke dalam Si. Unsur-unsur tambahan ini akan menambah jumlah hole. Sedangkan semikonduktor jenis  $n$  dibuat dengan menambahkan nitrogen (N), fosfor (P) atau arsen (As) ke dalam Si. Dari sini, tambahan elektron dapat diperoleh. Sedangkan, Si intrinsik sendiri tidak mengandung unsur tambahan. Usaha menambahkan unsur tambahan ini disebut dengan *doping* yang jumlahnya tidak lebih dari 1 % dibandingkan dengan berat Si yang hendak di-*doping*. Dua jenis semikonduktor  $n$  dan  $p$  ini jika disatukan akan membentuk sambungan  $p-n$  atau dioda  $p-n$  (istilah lain menyebutnya dengan sambungan metalurgi / *metallurgical junction*).

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

## 2.4 *Traffic Light*

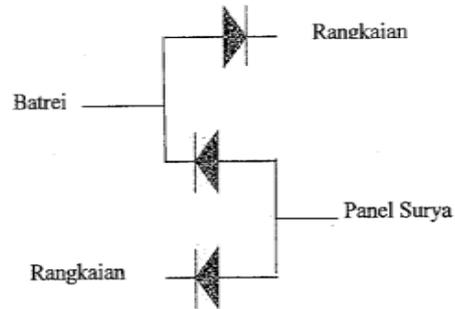
*Traffic light* adalah suatu rangkaian kontrol yang digunakan untuk mengontrol lampu lalu lintas dengan menggunakan alat-alat seperti relay dan timer. Pada umumnya, *traffic light* menggunakan listrik yang bersumber dari PLN sebagai sumber energi utama. Namun penggunaan sel surya sebagai sumber energi alternatif mulai diterapkan pada *traffic light*. Skema penggunaan panel surya sebagai catu daya *traffic light* dapat dilihat pada gambar 2.15 (Widodo, 2009).



Gambar 2.15 Sistem lampu lalu lintas dengan tenaga matahari

Penggunaan panel surya sebagai suplai energi listrik pada lampu pengatur lalu lintas merupakan inovasi teknologi pembangkitan energi listrik bersumber dari energi matahari. Tiga elemen utama yaitu panel surya sebagai media perubah energi sinar matahari menjadi energi listrik, baterai untuk menyimpan energi listrik dan lampu pengatur lalu lintas sebagai elemen yang mengkonsumsi energi listrik. Penggunaan baterai, setelah mendapatkan output dari *solar cell* yang berupa arus listrik dapat langsung digunakan untuk beban yang dimanfaatkan, arus listrik dapat digunakan sebagai pengisian dengan cara disimpan ke dalam baterai agar dapat digunakan pada saat yang diperlukan khususnya pada malam hari karena tidak ada sinar matahari (Subandi, 2014 : 3).

Energi surya dikonversikan menjadi energi listrik dengan menggunakan *controller* yang berfungsi sebagai pengendali pengisian baterai, energi disimpan sebagai cadangan dan sebagian dialirkan ke rangkaian pengendali lampu lalu lintas dan pencacah. Lamanya lampu merah, kuning, dan hijau diatur oleh mikrokontroller yang juga ditampilkan oleh lampu pencacah yang akan melakukan cacah mundur. Sedangkan *driver* digunakan sebagai saklar yang akan menyalakan dan mematikan lampu lalu lintas dan lampu pencacah berdasarkan informasi dari mikrokontroller.



Gambar 2.16 Rangkaian pengatur distribusi tegangan dari panel surya ke rangkaian

Rangkaian ini digunakan untuk mengatur dan mendistribusikan sumber tegangan dari panel surya untuk mensuplai rangkaian lampu lalu lintas dengan cara tegangan dari panel surya digunakan untuk mengisi baterai sampai penuh dan sekaligus mensuplai rangkaian lampu lalu lintas, apabila baterai sudah terisi penuh maka panel surya hanya akan mensuplai ke rangkaian lampu lalu lintas saja, dan sebaliknya apabila panel surya tidak menghasilkan tegangan/energi maka baterai akan menyuplai energi ke rangkaian lampu lalu lintas (<https://alextriso1.wordpress.com/2012/03/05/lampu-lalulintas-energi-surya/>).

## 2.5 Catu Daya

Pencatu Daya (Inggris: *power supply*) adalah sebuah piranti elektronika yang berguna sebagai sumber daya untuk piranti lain, terutama daya listrik. Pada dasarnya pencatu daya bukanlah sebuah alat yang menghasilkan energi listrik saja, namun ada beberapa pencatu daya yang menghasilkan energi mekanik, dan energi yang lain.

Secara garis besar, pencatu daya listrik dibagi menjadi dua macam, yaitu pencatu daya tak distabilkan dan pencatu daya distabilkan.

1. Pencatu daya tak distabilkan merupakan jenis pencatu daya yang paling sederhana. Pada pencatu daya jenis ini, tegangan maupun arus keluaran dari pencatu daya tidak distabilkan, sehingga berubah-ubah sesuai keadaan



tegangan masukan dan beban pada keluaran. Pencatu daya jenis ini biasanya digunakan pada peranti elektronika sederhana yang tidak sensitif akan perubahan tegangan. Pencatu jenis ini juga banyak digunakan pada penguat daya tinggi untuk mengkompensasi lonjakan tegangan keluaran pada penguat.

2. Pencatu daya distabilkan pencatu jenis ini menggunakan suatu mekanisme lolah balik untuk menstabilkan tegangan keluarannya, bebas dari variasi tegangan masukan, beban keluaran, maupun dengung. Ada dua jenis kalang yang digunakan untuk menstabilkan tegangan keluaran, antara lain:
  - Pencatu daya linier, merupakan jenis pencatu daya yang umum digunakan. Cara kerja dari pencatu daya ini adalah mengubah tegangan AC menjadi tegangan AC lain yang lebih kecil dengan bantuan Transformator. Tegangan ini kemudian disearahkan dengan menggunakan rangkaian penyearah tegangan, dan di bagian akhir ditambahkan kondensator sebagai penghalus tegangan sehingga tegangan DC yang dihasilkan oleh pencatu daya jenis ini tidak terlalu bergelombang. Selain menggunakan diode sebagai penyearah, rangkaian lain dari jenis ini dapat menggunakan regulator tegangan linier sehingga tegangan yang dihasilkan lebih baik daripada rangkaian yang menggunakan diode. Pencatu daya jenis ini biasanya dapat menghasilkan tegangan DC yang bervariasi antara 0 - 60 Volt dengan arus antara 0 - 10 Ampere.
  - Pencatu daya Sakelar, pencatu daya jenis ini menggunakan metode yang berbeda dengan pencatu daya linier. Pada jenis ini, tegangan AC yang masuk ke dalam rangkaian langsung disearahkan oleh rangkaian penyearah tanpa menggunakan bantuan transformer. Cara menyearahkan tegangan tersebut adalah dengan menggunakan frekuensi tinggi antara 10KHz hingga 1MHz, dimana frekuensi ini jauh lebih tinggi daripada frekuensi AC yang sekitar 50Hz. Pada pencatu daya sakelar biasanya diberikan rangkaian umpan balik agar



tegangan dan arus yang keluar dari rangkaian ini dapat dikontrol dengan baik. ([https://id.wikipedia.org/wiki/Pencatu\\_daya](https://id.wikipedia.org/wiki/Pencatu_daya))

Sumber energi listrik dibutuhkan sebagai catu daya pada kenyataannya masih mengandalkan minyak bumi sebagai penyangga utama kebutuhan energi. Pencarian energi alternatif terus dilakukan guna memenuhi kebutuhan daya listrik, salah satunya energi terbarukan yaitu energi matahari dengan memanfaatkan sel surya. Energi listrik hasil dari sel surya tersebut berupa arus DC sehingga bisa langsung digunakan atau bisa juga menggunakan baterai sebagai sistem penyimpan sehingga dapat digunakan pada saat dibutuhkan terutama pada malam hari (Satwiko, 2012 : 1).

## 2.6 Perhitungan Daya Masukan dan Daya Keluaran

Daya yang diterima (daya input), di mana daya tersebut adalah perkalian antara intensitas radiasi matahari yang diterima dengan luas area modul PV dengan persamaan 2.1 (Ihsan, 2013 : 4):

$$P_{in} = I_r \cdot A \quad (2.1)$$

dimana:

$P_{in}$  = Daya input akibat radiasi matahari (Watt)

$I_r$  = Intensitas radiasi matahari (Watt/m<sup>2</sup>)

$A$  = Luas area permukaan *photovoltaic module* (m<sup>2</sup>)

Intensitas cahaya adalah flux cahaya yang jatuh pada 1m<sup>2</sup> dari bidang itu. Dimana 1 lux = 1 lumen per m<sup>2</sup>, dan 1 lumen = 0,0015 Watt (P. Van Harten, 1995: 22). Maka,  $I_r$  juga dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.2 berikut:

$$I_r = lux \times 0,0015 \quad (2.2)$$

dimana:

$I_r$  = Intensitas cahaya (Watt/m<sup>2</sup>)



Sedangkan untuk besarnya daya keluaran pada *solar cell* ( $P_{out}$ ) yaitu perkalian tegangan rangkaian terbuka ( $V_{oc}$ ), arus hubung singkat ( $I_{sc}$ ), dan *Fill Factor* (FF) yang dihasilkan oleh sel fotovoltaik yang dapat dihitung dengan persamaan 2.3 sebagai berikut:

$$P_{out} = V_{OC} \times I_{SC} \times FF \quad (2.3)$$

dimana:

$P_{out}$  = Daya yang dibangkitkan oleh sel surya (Watt).

$V_{oc}$  = Tegangan rangkaian terbuka sel surya (Volt)

$I_{sc}$  = Arus hubung singkat sel surya (Ampere)

FF = *Fill Factor* yang dapat dihitung dengan persamaan 2.4 berikut:

$$FF = \frac{V_{oc} - I_n (V_{oc} + 0,72)}{V_{oc} + 1} \quad (2.4)$$

## 2.7 Efisiensi Sel Surya

Efisiensi sel surya adalah rasio output listrik dari sel surya untuk energi insiden dalam bentuk sinar matahari. Efisiensi yang terjadi pada sel surya merupakan perbandingan daya yang dapat dibangkitkan oleh sel surya dengan energi input yang diperoleh dari radiasi matahari. Efisiensi yang digunakan adalah efisiensi sesaat pada pengambilan data dapat dihitung dengan persamaan 2.5 berikut (Ihsan, 2013 : 4):

$$\eta = \frac{\text{Output}}{\text{Inp}} \times 100\% \quad (2.5)$$

dimana:

$\eta$  = Efisiensi *solar cell* (%)

Output= Daya output yang dibangkitkan oleh sel surya (Watt)

Input = Daya input yang diterima oleh sel surya (Watt)

Salah satu ukuran performansi sel surya adalah efisiensi, yaitu persentase perubahan energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Efisiensi sel surya bervariasi dari 6% untuk sel surya berbasis silikon amorf ke 44,0% dengan sel produksi *multi-junction* dan 44,4% dengan beberapa ini dirakit menjadi paket



*hybrid*. Efisiensi konversi energi sel surya untuk tersedia secara komersial *multicrystalline* Sel surya silikon sekitar 14-19% Sel-sel efisiensi tertinggi tidak selalu yang paling ekonomis - misalnya 30% efisien *multi-junction* sel berdasarkan bahan eksotis: seperti *galium arsenide* atau *indium selenide* diproduksi pada volume rendah mungkin juga biaya seratus kali lebih banyak sebagai efisien sel silikon amorf 8% dalam produksi massal, sementara memberikan hanya sekitar empat kali output (<http://www.vedcmalang.com/pppstkboemlg/listrik-electro/41-artikel/45-listrik-elektronika/1382-efisiensi-sel-surya>).