

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI**

#### **2.1 Tinjauan Pustaka**

Penelitian yang berhubungan dengan pembangkit listrik dari sumber energi alternatif sudah banyak dilakukan. Hasyim Asy'ari, Abdul Rozaq, Feri Setia Putra melakukan penelitian tentang “ pemanfaatan *solar cell* dengan PLN sebagai sumber energi listrik rumah tinggal ”. Penelitian ini memiliki tujuan yaitu energi listrik yang dihasilkan oleh *solar cell* digunakan untuk memenuhi kebutuhan rumah tangga. Metode penelitian yang dilakukan dalam pemanfaatan *solar cell* dengan PLN sebagai sumber energi listrik rumah tinggal yaitu dilakukannya pengukuran energi yang mampu disuplai oleh energi yang dihasilkan dari *solar cell*. Sedangkan, komponen yang digunakan dalam penelitian ini yaitu menggunakan dua panel surya yang masing-masing berkapasitas 100 *watt peak*, *controller* 12/24 Volt DC yang berkapasitas 60 A, *inverter* yang berkapasitas 500 Watt, *accumulator* yang berkapasitas 100 Ah, dan lampu DC Philips (5 Watt, 10 Watt, 13 Watt) serta lampu 5 buah SL 18 Watt. Setelah dilakukannya pengujian, maka didapatkan produksi arus yang paling tinggi yaitu terjadi pada jam 12.30, dengan nilai arus sebesar 13 A dan tegangan 14 Volt DC. Kemudian, energi listrik yang dihasilkan pada siang hari akan digunakan untuk memasok beban penerangan yaitu lampu pada jam 17.00 hingga jam 06.00 dengan rata-rata energi yang dapat digunakan sebesar 1,027 kWh per malam harinya.

Selain itu Puloeng Raharjo, juga melakukan penelitian yang berkaitan dengan pembangkit listrik sumber energi alternatif, yaitu tentang “ perancangan sistem *hibrid solar cell*-baterai-pln menggunakan *programmable logic controllers* ”. Dengan menggunakan sistem *hibrid* yang terdiri dari dua buah sumber pembangkitan dari *solar cell* dan dari PLN, pemakaian ini bertujuan untuk saling bantu antar pembangkit. Adapun komponen yang digunakan dalam sistem ini yaitu dengan menggunakan *solar cell* yang berkapasitas sebesar 100 *wattpeak* dengan menghasilkan tegangan 20,03 V; arus 4,52 A; dan daya sebesar 90,52 W;

serta mengalami beban puncak pada jam 13.00. Kemudian, pengisian baterai dinyatakan sudah penuh atau 100% ketika tegangan mencapai 12,7 V. Sedangkan, ketika baterai dalam keadaan 30% hingga 40% dengan tegangan sebesar 11,8 V, maka akan dilakukan pengisian baterai kembali. Semua sistem dikontrol dengan PLC menggunakan bahasa *ladder* diagram.

Penelitian lain yang berkaitan dengan pembangkit listrik sumber energi alternatif adalah Rudi Salman, dengan melakukan penelitian tentang “ analisis perancangan penggunaan sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) untuk perumahan (*solar home system*) ”. Penelitian ini menggunakan modul fotovoltaik dengan kapasitas 50 *wattpeak*. Radiasi matahari rata-rata harian yang didapat sebesar 4,5 kWh/m<sup>2</sup> yang akan menghasilkan energi listrik kurang lebih 125 hingga 130 watt-jam.

## **2.2 Landasan Teori**

### **2.2.1 Energi**

#### **a. Pengertian Energi**

Energi disebut juga dengan tenaga yang artinya adalah suatu kemampuan yang digunakan untuk melakukan suatu usaha atau pekerjaan. Sedangkan, menurut Hukum Kekekalan Energi, energi adalah tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, tetapi dapat diubah bentuknya.

Adapun beberapa pengertian energi menurut para ahli yaitu pertama, Arif Alfatah dan Muji Lestari menyatakan bahwa energi yaitu sesuatu yang diperlukan oleh sebuah benda agar benda tersebut dapat melakukan suatu usaha. Kedua, menurut Campbell, Reece dan Mitchell menyatakan bahwa energi adalah suatu kemampuan yang digunakan untuk mengatur ulang suatu materi. Dan ketiga, Kamus Besar Bahasa Indonesia menyatakan bahwa energi yaitu suatu kekuatan yang dibutuhkan untuk melakukan berbagai suatu proses kegiatan (Hedi Sasrawan, 2014).

Energi terbagi menjadi dua kategori yaitu energi potensial dan energi kinetik. Namun, selain energi potensial dan energi kinetik, terdapat pula energi yang lainnya yaitu energi mekanik, listrik, elektromagnetik, kimia, panas, nuklir, angin, dan lain-lain. Kemudian, dari sebagian energi tersebut harus diubah bentuknya agar dapat digunakan oleh manusia dalam kehidupan sehari-hari (Hedi Sasrawan, 2014).

#### b. Sumber Energi

Sumber energi adalah suatu sumber yang berasal dari alam, tanaman, benda-benda renik, sampah organik ataupun dari bahan bakar fosil yang sudah berumur jutaan tahun lamanya yang akan digunakan sebagai penghasil energi. Berikut energi yang dikelompokkan berdasarkan sumbernya yaitu sebagai berikut :

##### 1. Energi Konvensional

Energi konvensional atau disebut juga dengan energi tidak terbarukan adalah suatu energi yang tidak dapat diperbaharui atau diregenerasi yang sumbernya hanya tersedia di bumi dengan jumlah yang terbatas. Selain sumber-sumber energi tersebut cepat habis di bumi, kemudian juga berbahaya bagi makhluk hidup karena akan berdampak polusi yang mencemari udara, air, dan tanah yang mempengaruhi penurunan kesehatan. Energi tak terbarukan juga dapat berupa batubara, gas alam, uranium, dan minyak bumi, serta sumber energi lain yang merupakan bahan bakar fosil.

##### 2. Energi Terbarukan

Energi terbarukan yaitu suatu energi yang dapat diperbaharui yang sumbernya didapatkan dari alam yang ada di bumi dengan jumlahnya yang tidak terbatas atau akan habis secara alami. Energi terbarukan juga tidak menimbulkan polusi, ramah terhadap lingkungan maupun makhluk hidup lainnya, dan dianggap sebagai energi yang paling bersih di bumi seperti matahari, angin, sungai, ombak, tumbuhan, dan sebagainya.

### **2.2.2 Potensi Sumber Energi Alternatif**

Rata-rata sumber energi yang digunakan sebagai bahan bakar pembangkit tenaga listrik di Indonesia yaitu sumber energi yang didapatkan dari fosil yang tidak dapat diperbaharui dan tidak akan bertahan lama. Dan sekarang ini, penggunaan sumber energi dari bahan bakar fosil lambat laun akan menipis jika terus digunakan. Untuk itu, mengingat krisis energi yang terjadi di Indonesia tersebut, pengembangan dan penerapan sumber energi terbarukan merupakan suatu solusi guna untuk mengurangi ketergantungan terhadap pemakaian bahan bakar fosil sebagai sumber utama dalam pembangkitan tenaga listrik. Berikut macam-macam sumber energi terbarukan yaitu sebagai berikut :

#### **a. Energi Solar**

Energi solar adalah suatu energi yang berasal dari matahari yang dipancarkan ke bumi setiap menitnya yang dapat memenuhi keperluan energi seluruh manusia dalam satu tahun, apabila dalam penangkapan radiasinya dengan benar. Walaupun letak matahari berjarak sangat jauh dari bumi yaitu sekitar 149 juta kilometer. Kemudian, juga terdapat suatu alat yang digunakan untuk mengkonversikan cahaya matahari menjadi energi listrik secara langsung yaitu sel fotovoltaik.

#### **b. Tenaga Angin**

Tenaga angin adalah suatu energi yang berasal dari tiupan angin yang diikuti dengan energi gerak yang digunakan untuk melakukan suatu usaha. Tenaga angin juga dapat dikonversi menjadi energi listrik dengan menggunakan turbin angin.

#### **c. Biomassa**

Biomassa adalah suatu energi yang berasal dari kayu, tanaman pangan, dan limbah hewan serta tumbuhan. Energi ini pun bersifat terbarukan karena semua benda organik seperti kayu dan tanaman pangan akan selalu tumbuh dan akan selalu ada limbah hewan dan tumbuhan. Energi ini juga dapat digunakan untuk

memasak dan memanaskan, bahkan dapat digunakan sebagai sumber dari pembangkitan listrik.

#### d. Tenaga Air

Tenaga air adalah suatu energi yang berasal dari air yang ada di sungai maupun air terjun. Tenaga air juga dapat digunakan sebagai penghasil energi mekanik atau listrik yang dapat dilakukan dengan cara menempatkan sebuah baling-baling di sungai, kemudian air yang mengalir ke sungai tersebut akan menggerakkan baling-baling dan akan memproduksi energi listrik. Namun, sebenarnya tenaga air ini sudah banyak digunakan di seluruh Indonesia sebagai penghasil energi listrik dengan sebutan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA).

#### e. Energi Panas Bumi

Energi panas bumi adalah suatu energi yang memanfaatkan air panas atau uap yang didapatkan dari dalam bumi dan juga dapat diperbaharui selama uap atau air panas yang didapatkan dari dalam bumi dimasukkan kembali setelah dilakukannya pendinginan di pembangkit. Energi panas bumi ini juga dapat digunakan sebagai penghasil listrik yaitu dengan cara lubang tanah hingga sampai ke bawah tanah dengan menggunakan bor, masukkan pipa-pipa yang digunakan untuk mengalirkan uap atau air panas, lalu alirkan uap atau air panas tersebut ke pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTPB) yang kemudian akan diproses untuk menghasilkan listrik. Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTPB) juga seperti pembangkit tenaga batubara biasa, akan tetapi perbedaannya PLTPB ini tidak memerlukan bahan bakar.

#### f. Energi Pasang Surut

Energi pasang surut yaitu suatu energi yang memanfaatkan pasang surutnya air laut dan selama dua kali sehari ketika tingkat air laut pasang dan surut, maka akan menggerakkan volume air yang sangat banyak di sepanjang garis pantai. Energi pasang surut juga dapat dimanfaatkan sebagai penghasil listrik seperti tenaga air, namun dalam jumlah yang lebih besar. Cara kerja energi pasang surut

sebagai penghasil listrik yaitu ketika air laut pasang, air laut dapat ditahan di belakang bendungan. Sedangkan, ketika air laut surut, maka akan terlihat perbedaan antara ketika air laut pasang dan surut dalam segi ketinggian air lautnya, kemudian air laut yang berada di belakang bendungan dapat mengalir melalui turbin dan menyebabkan turbin tersebut berputar. Berputarnya turbin inilah yang akan memproduksi listrik.

#### g. Tenaga Ombak

Tenaga ombak yaitu suatu energi yang memanfaatkan ombak air laut. Dan penyebab ombak air laut beralun karena tertiup angin dari atas laut. Tenaga ombak ini juga memiliki potensi sebagai sumber energi yang hebat jika dapat dimanfaatkan dengan benar. Cara kerja dari tenaga ombak yang digunakan sebagai sumber penghasil listrik yaitu dengan cara menangkap ombak air laut dan dinaikkan ke bilik, kemudian dari bilik tersebut akan mengeluarkan udara secara paksa. Udara yang dikeluarkan secara paksa tersebut digunakan untuk menggerakkan turbin yang memproduksi listrik sama halnya seperti turbin angin yang menggerakkan generator.

### **2.2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)**

PLTS adalah sebuah pembangkit listrik yang memanfaatkan sinar matahari berupa radiasi sinar foton matahari yang kemudian akan dikonversikan menjadi energi listrik melalui sel surya (*photovoltaic*). Sel surya (*photovoltaic*) sendiri merupakan suatu lapisan tipis yang terbuat dari bahan semikonduktor silikon (Si) murni dan bahan semikonduktor lainnya. Sinar matahari yang dimanfaatkan oleh PLTS ini akan memproduksi listrik DC yang dapat dikonversi menjadi listrik AC apabila dibutuhkan. Dan PLTS ini akan tetap menghasilkan listrik meskipun cuaca mendung selama masih terdapat cahaya (Tjok Gd. Visnu Semara Putra, 2015).



Gambar 2.1 Contoh penerapan sel surya ke dalam panel surya

(Sumber: Tjok Gd. Visnu Semara Putra. 2015. *Analisa Unjuk Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya 15 KW Di Dusun Asah Teben Desa Datah Karangasem*. (Bachelor thesis). Bali: Universitas Udayana)

Pada dasarnya, PLTS yaitu penghasil listrik yang dapat dirancang untuk memenuhi kebutuhan listrik dalam jumlah kecil hingga besar, baik menggunakan sistem berdiri sendiri maupun sistem *hybrid* dan baik menggunakan metode desentralisasi (satu rumah dengan satu pembangkit) maupun metode sentralisasi (listrik yang didistribusikan dengan jaringan kabel). PLTS merupakan dari sumber energi terbarukan, dimana sinar matahari sebagai sumber energi yang tidak ada habisnya. Selain itu, PLTS merupakan pembangkit listrik yang ramah lingkungan karena tidak menggunakan komponen yang berputar, tidak berdampak polusi (udara, air, dan laut), dan tidak mengeluarkan emisi berupa gas buang atau limbah (Tjok Gd. Visnu Semara Putra, 2015).

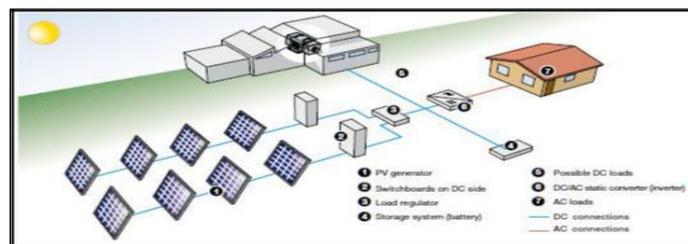
#### **2.2.4 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)**

Berdasarkan aplikasi dan konfigurasinya, secara garis besar PLTS diklarifikasi menjadi tiga yaitu sistem PLTS yang tidak terhubung dengan jaringan (*off-grid PV plant*), sistem PLTS *On-grid*, dan sistem PLTS *Hybrid* yaitu apabila PLTS dalam penggunaannya digabung dengan jenis pembangkit listrik lain.

Menurut IEEE standard 929-2000 sistem PLTS dibagi menjadi tiga kategori, yaitu PLTS skala kecil dengan batas 10 kW atau kurang, skala menengah dengan batas antara 10 kW hingga 500 kW, skala besar dengan batas di atas 500 kW (Omran, IEEE, 2000).

#### 2.2.4.1 Sistem PLTS Terpusat (*Off-Grid*)

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Terpusat (*Off-Grid*) merupakan sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan radiasi matahari tanpa terhubung dengan jaringan PLN atau dengan kata lain satu-satunya sumber pembangkitnya yaitu hanya menggunakan radiasi matahari dengan bantuan panel surya atau *photovoltaic* untuk dapat menghasilkan energi listrik. Sistem PLTS *Off-Grid* sendiri juga hanya dimanfaatkan untuk daerah yang tidak terjangkau pasokan listrik dari PLN seperti daerah pedesaan. Berikut konfigurasi dari sistem PLTS *Off-Grid* :



Gambar 2.2 Prinsip kerja PLTS *Off-Grid*

(Sumber: Anonim. 2010. *Technical Application Papers No. 10 Photovoltaic Platns*. Italy: ABB SACE)

Prinsip kerja sistem PLTS terpusat dapat dijelaskan sebagai berikut :

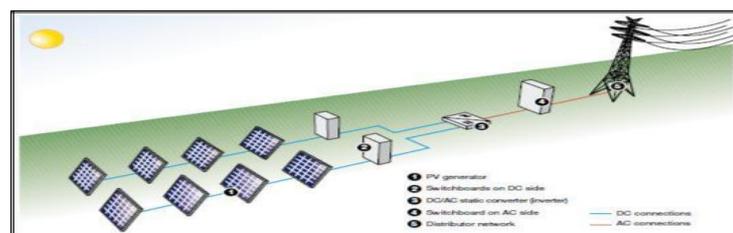
- Sel surya (*photovoltaic*) akan menghasilkan energi listrik pada siang hari dan baterai akan menyimpan energi listrik tersebut. Dan penyimpanan energi listrik dari *photovoltaic* ke dalam baterai dibantu dengan menggunakan *solar charge controller* dengan tujuan agar tidak terjadinya kelebihan dalam pengisian (*overcharge*). Besar daya yang diproduksi dari *photovoltaic* sebesar  $140 \text{ W/m}^2$  yang didapatkan dari intensitas matahari maksimum yang diterima oleh *photovoltaic* mencapai  $1000 \text{ W/m}^2$  dengan efisiensi *cell* sebesar 14%. Jadi,

besar daya yang dihasilkan dari PV sangat tergantung dari nilai intensitas penyinaran matahari dan efisiensi cellnya.

- Kemudian energi listrik yang tersimpan dalam baterai digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban AC. Namun, sebelum disuplai ke beban AC dari baterai, terlebih dahulu tegangan DC pada sisi baterai dikonversikan ke tegangan AC melalui inverter saat dibutuhkan.

#### 2.2.4.2 Sistem PLTS Terinterkoneksi (*On-Grid*)

Sistem PLTS terinterkoneksi (*On-Grid*) atau yang disebut dengan *Grid Connected PV System* adalah sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan radiasi matahari untuk menghasilkan listrik. Dan sesuai dengan namanya, maka sistem ini akan dihubungkan dengan jaringan PLN dengan mengoptimalkan pemanfaatan energi matahari melalui modul surya atau *photovoltaic modul* yang menghasilkan listrik semaksimal mungkin. Sistem ini juga dianggap ramah lingkungan dan bebas emisi. Sistem PLTS terinterkoneksi juga merupakan sebuah solusi *Green Energi* bagi masyarakat perkotaan baik perkantoran maupun perumahan yang bertujuan untuk dapat memperkecil tagihan rekening listrik dari PLN dan dapat memberikan nilai tambah kepada pemiliknya.



Gambar 2.3 Prinsip Kerja PLTS *On-Grid*

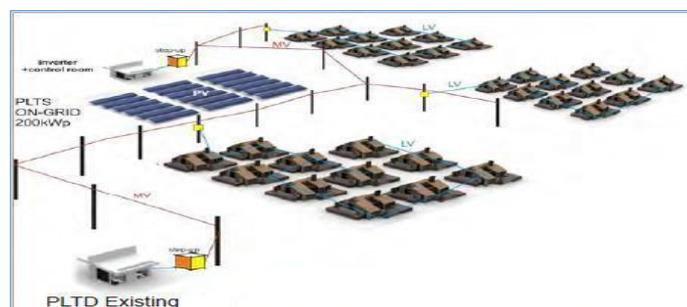
(Sumber: Anonim. 2010. *Technical Application Papers No. 10 Photovoltaic Plants*. Italy: ABB SACE)

#### 2.2.4.3 Sistem PLTS Hibrid

Sistem *hybrid* adalah sistem yang menghubungkan sistem pembangkit listrik satu dengan yang lain atau yang disebut berkolaborasi antara 2 atau lebih sistem pembangkit dan biasanya sumber pembangkit yang digunakan untuk

sistem ini yaitu energi solar, mikrohidro, energi angin, dan genset. Untuk itu, sistem *hybrid* dapat teriri dari PLTS-Genset, PLTS-Mikrohidro, PLTS-Energi Angin, dan lainnya. Dan sistem *hybrid* sudah banyak digunakan di Indonesia, baik PLTS Genset, PLTS Mikrohidro, maupun PLTS energi angin-mikrohidro, akan tetapi sistem *hybrid* yang paling banyak digunakan yaitu PLTS-Genset. Sistem *hybrid* PLTS-Genset ini umumnya menggunakan genset yang tidak terhubung dengan jaringan PLN atau yang disebut dengan genset yang berdiri sendiri.

Sistem *Hybrid PV-Genset* ini memiliki tujuan yaitu untuk mengkombinasikan keunggulan dan menutupi kelemahan antara PV dengan genset dalam keadaan tertentu, sehingga secara total sistem ini dapat bekerja lebih ekonomis dan efisien. Kolaborasi sistem *Hybrid* antara PV dengan genset dapat memberikan keuntungan bagi genset yaitu akan memperkecil jam kerja genset (semisal awalnya setiap hari beroperasi selama 24 jam kemudian berkurang menjadi hanya 4 jam per harinya ketika beban puncak saja), sehingga tarif operasi dan manajemen dapat lebih ekonomis. Sedangkan, bagi PV juga mendapatkan keuntungan dari sistem ini yaitu hanya digunakan sebagai pencatu beban base saja, maka tidak membutuhkan biaya modal awal yang besar. Dengan demikian, penggunaan sitem *Hybrid* PV-Genset ini dapat menghemat biaya operasi dan manajemen, mengurangi jam operasi genset, serta dapat menghindari kebutuhan biaya modal awal yang besar.



Gambar 2.4 Skema *hybrid photovoltaic power system*

(Sumber: LEN 2011, P.17)

## 2.2.5 Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Dalam perencanaan pembangunan sistem PLTS juga membutuhkan beberapa komponen yang dapat menunjang sistem ini, baik komponen utama maupun komponen pendukung, diantaranya yaitu :

### 2.2.5.1 Sel Surya (*Photovoltaic*)

#### 1. Pengertian Sel Surya

Sel surya atau yang disebut juga dengan *photovoltaic* adalah sebuah komponen elektronik yang dapat mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik, perubahan energi ini disebabkan sebuah proses yang di sebut efek *photovoltaic*. Efek *photovoltaic* sendiri adalah pelepasan muatan positif dan negatif dalam material padat melalui cahaya. Jadi secara tidak langsung output berupa arus dan tegangan dipengaruhi oleh besarnya intensitas cahaya (Nasrul Haq Rosyadi, 2016).

#### 2. Sistem Instalasi Sel Surya

Terdapat dua sistem dalam instalasi *solar cell*, yaitu sistem dengan rangkaian seri dan sistem dengan rangkaian paralel.

- Rangkaian Seri *Solar Cell*

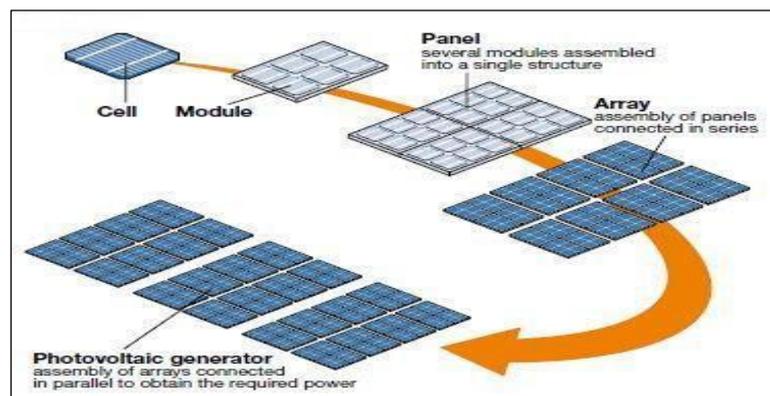
Rangkaian seri *solar cell* adalah suatu rangkaian yang dihubungkan secara seri yaitu dengan menghubungkan antara bagian depan (+) dari *solar cell* utama dengan bagian belakang (-) dari *solar cell* kedua.

- Rangkaian Paralel *Solar Cell*

Rangkaian parallel *solar cell* adalah suatu rangkaian yang dihubungkan secara parallel yaitu dengan menghubungkan antara terminal kutub positif dan negatif dari *solar cell* tersebut.

### 3. Modul Surya

Modul surya atau *Photovoltaic Module* adalah suatu komponen elektronik yang digunakan untuk mengkonversi radiasi matahari menjadi energi listrik yang disusun dari beberapa panel surya yang dirangkai seri maupun paralel, kemudian disusun dalam satu bingkai (*frame*) yang diberi laminasi atau 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 selnya. Sedangkan untuk arusnya dapat didesain sesuai kebutuhan dengan memperhatikan luas permukaan sel.



Gambar 2.5 Skema hubungan antara *solar cell*, modul, panel, dan *array*

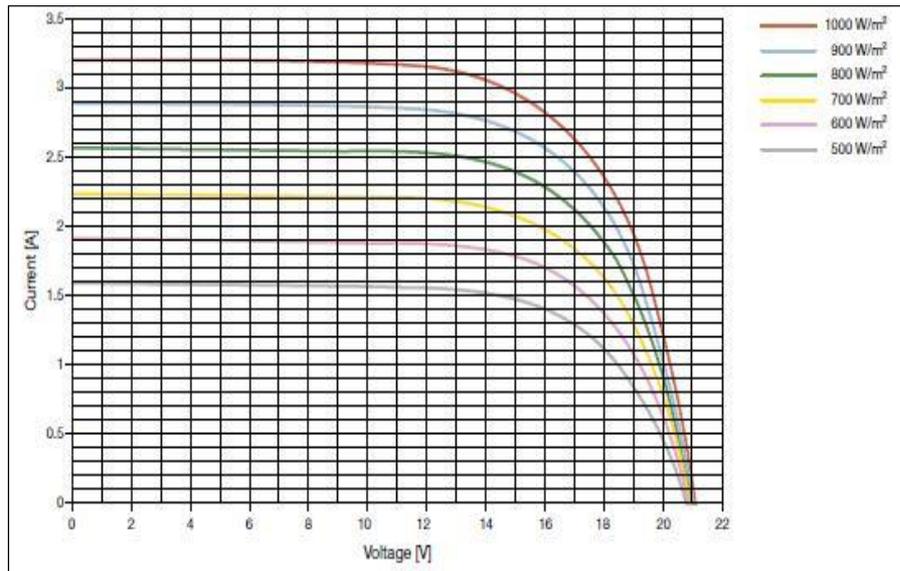
(Sumber: Anonim. 2010. *Technical Application Papers No. 10 Photovoltaic Plants*. Italy: ABB SACE)

### 4. Faktor-faktor yang mempengaruhi produksi energi listrik dari PLTS

Dalam memproduksi energi listrik, modul surya pun dapat dipengaruhi dari beberapa faktor utama, yaitu sebagai berikut :

#### a. Iradiasi (besarnya intensitas sinar matahari) pada modul surya

Pengaruh iradiasi terhadap produksi energi listrik pada panel surya dapat dilihat pada gambar di bawah, yang memperlihatkan fungsi peristiwa iradiasi terhadap kurva karakteristik tegangan (V) dan arus (I).



Gambar 2.6 Grafik pengaruh iradiasi terhadap modul surya

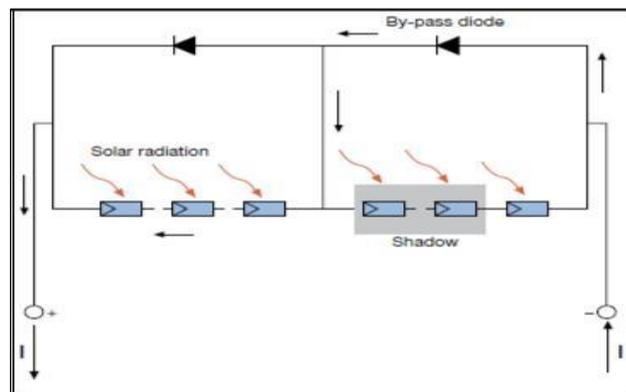
(Sumber: Anonim. 2010. *Technical Application Papers No. 10 Photovoltaic Plants. Italy: ABB SACE*)

Ketika nilai iradiasi atau intensitas sinar matahari menurun, maka arus yang dihasilkan oleh modul surya akan ikut menurun dengan proporsional, sedangkan variasi dari tegangan tanpa beban sangatlah kecil. Sebagai suatu kenyataan, efisiensi dari konversi pada modul surya tidak terpengaruh oleh iradiasi yang bervariasi asalkan masih dalam batas standar operasi dari modul surya, yang berarti bahwa efisiensi konversi adalah sama untuk keduanya, baik dalam kondisi cerah begitu juga kondisi mendung. Dengan demikian, kecilnya nilai energi listrik yang diproduksi dari panel surya ketika cuaca mendung dapat dijadikan acuan yang disebabkan oleh produksi arus listrik yang turun bukan karena penurunan efisiensi akibat rendahnya intensitas matahari.

#### b. Bayangan (*Shading*)

Berbicara mengenai area yang digunakan oleh modul surya pada suatu PLTS, sebagian darinya (satu atau lebih sel) mungkin dibayangi atau terhalangi

oleh pepohonan, daun yang jatuh, asap, kabut, awan, atau panel surya yang terpasang di dekatnya. Pada khusus shading ini, sel surya yang tertutupi akan berhenti memproduksi energi listrik dan berubah menjadi beban pasif. Sel ini akan berlaku seperti diode dalam kondisi memblokir arus yang diproduksi oleh sel lain dalam hubungan seri dan akan membahayakan keseluruhan produksi dari modul surya tersebut, terlebih dapat merusak modul akibat adanya panas yang berlebih. Dalam hal ini menghindari permasalahan yang lebih besar akibat shading pada suatu string, maka diantisipasi dengan penggunaan diode *by-pass* yang terpasang paralel pada masing-masing modul (ABB QT Vol. 10).

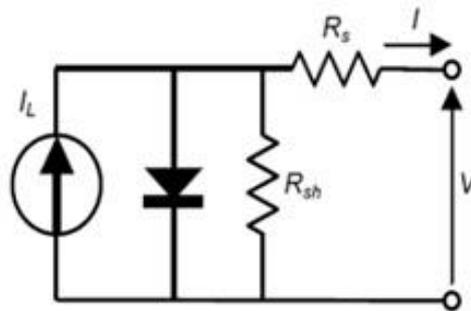


Gambar 2.7 Pengaruh *shading* terhadap modul surya

(Sumber: Anonim. 2010. *Technical Application Papers No. 10 Photovoltaic Plats. Italy: ABB SACE*)

## 5. Rangkaian Ekuivalen PV

Pada umumnya panel surya atau *photovoltaic* (PV) memiliki rangkaian ekuivalen dan pemodelan matematis yang sangat diperlukan untuk mengetahui parameter panel surya yang digunakan. Berikut rangkaian ekuivalen PV :



Gambar 2.8 Rangkaian ekivalen PV

(Sumber: Anonim, *Pengertian, Rangkaian Ekivalen, kurva karakteristik dan Parameter Panel Surya (Photovoltaic)*.

<http://electricityofdream.blogspot.co.id/2016/09/pengertian-rangkaian-ekivalen-kurva.html>, diakses tanggal 3 Februari 2017)

Sebuah sel panel surya dapat dimodelkan oleh sebuah sumber arus secara paralel dengan dioda. Sebuah *resistor shunt* dan sebuah *resistor paralel* ditambahkan untuk model mekanisme kerugian dalam sel panel surya. Dari gambar rangkaian ekivalen diatas yang dihasilkan oleh sel panel surya adalah sumber arus dikurangi arus yang mengalir melalui dioda dan yang mengalir melalui resistor paralel, sehingga dapat dituliskan persamaan seperti berikut :

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t a}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}}$$

Dimana  $I_L$  arus yang dibangkitkan cahaya (A),  $I_0$  arus saturasi dioda p-n (A),  $R_s$  merupakan resistor seri pada *photovoltaic* (ohm),  $R_{sh}$  resistor paralel sel panel surya (ohm),  $a$  adalah parameter diaoda  $1 < a < 2$  dan  $V_t$  tegangan terminal (V) yang dinyatakan seperti persamaan berikut :

$$V_t = N_s \frac{kT}{q}$$

Dimana,  $T$  merupakan temperatur (K),  $k$  konstanta Boltzmann ( $1.3806 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ) dan  $q$  muatan elektron ( $1.6021 \times 10^{-19} \text{C}$ ).  $R_p$  resistor shunt adalah suatu resistor parallel yang menunjukkan pada sambungan p-n diode terdapat nilai arus yang bocor (*leakage*) yang nilai arusnya sekitar  $0.1 - 10 \text{ m}^2$  untuk panel surya modul yang terbuat dari bahan semikonduktor berupa silikon.

Estimasi arus dan tegangan yang dihasilkan oleh modul sel surya yang menentukan besar produksi energi dari sistem sel surya, dimana daya keluaran sel surya ditentukan berdasarkan pada karakteristik teknis dan parameter lingkungan. Dengan demikian, model sel surya terdiri dari parameter listrik yang dalam keadaan standart yaitu  $\mu_{Isc}$  koefisien temperature arus hubung singkat,  $I_{sc}$  dan  $\mu_{Voc}$  koefisien temperature *open circuit voltage*,  $V_{oc}$ . Nilai  $I_{sc}$  dan  $V_{oc}$  ditentukan berdasarkan persamaan dengan meninjau parameter lingkungannya :

$$I_{sc} = I_{sc,ref} \frac{G}{G_{ref}} + \mu_{Isc} (T_c - T_{c,ref})$$

$$V_{oc} = V_{oc,ref} + mV_1 \ln \left( \frac{G}{G_{ref}} \right) + \mu_{voc} (T_c - T_{c,ref})$$

*Open Circuit Voltage*  $V_{oc}$ , adalah tegangan yang ketika tidak adanya arus (*current*), maka dapat mencapai tegangan yang memiliki kapasitas maksimum, sehingga daya yang dihasilkan adalah nol. Sedangkan, *Short Circuit Current*  $I_{sc}$ , adalah arus yang memiliki kapasitas maksimum yang dihasilkan oleh *photovoltaic* yang berada di bawah kondisi ketika tidak adanya resistansi (*short circuit*). Daya pada  $I_{sc}$  adalah 0 watt.

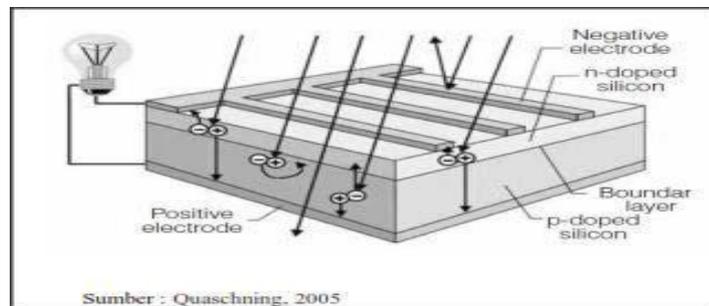
Efisiensi energi panel surya adalah perbandingan antara energi total (termal dan elektrik) dengan energi matahari yang ditangkap oleh bidang permukaan panel surya yang dirumuskan pada persamaan berikut :

$$\eta_{en} = \frac{V_{oc} \times I_{sc}}{A \times S_T}$$

Dimana  $V_{oc}$  (V) menyatakan tegangan *open circuit*,  $I_{sc}$  arus *short circuit* (A),  $S_T$  radiasi global Matahari ( $\text{W/m}^2$ ), dan  $A$  luas permukaan modul PV ( $\text{m}^2$ ).

## 6. Semikonduktor PV

Dalam *photovoltaic* memiliki dua lapisan tipis semikonduktor yang dihubungkan dengan sambungan (*junction*) yaitu positif dan negatif yang terbuat dari bahan semikonduktor berupa silikon. Bagian positif yaitu suatu bagian lapisan yang permukaannya dibuat sangat tipis dengan tujuan agar radiasi matahari dapat menembus langsung ke sambungan dan bagian ini juga diberi lapisan nikel berbentuk cincin yang digunakan sebagai terminal keluaran positif. Sedangkan, bagian negatif yang berada dibawah bagian positif ini juga diberi lapisan nikel yang digunakan sebagai terminal keluaran negatif. Proses terbentuknya arus listrik yaitu ketika radiasi matahari tertangkap oleh bidang permukaan *photovoltaic*, kemudian beberapa foton dari radiasi matahari tersebut diserap oleh atom semikonduktor, di dalam atom semikonduktor ini elektron akan dibebaskan dari ikatan atomnya. Elektron yang bergerak bebas dan berpindah-pindah inilah yang menimbulkan adanya arus listrik (Quaschnig, 2005).



Gambar 2.9 Hubungan sel surya dan panel surya

(Sumber: Quaschnig, Volker. 2005. *Understanding Renewable Energy Systems*.  
Ukraina: Earthscan)

## 7. Jenis Sel Surya

### a. Monokristal Silikon

Monokristal silikon merupakan jenis sel surya yang materialnya berasal dari silisium kristal tunggal yang berbentuk silinder yang ditarik dari cairan silisium dan jenis sel surya yang memiliki efisiensi yang paling tinggi yaitu mencapai 16-

25% (Narayana, 2010). Karena memiliki efisiensi yang tinggi, maka jenis ini sangat sesuai untuk digunakan area yang memiliki ruang yang sempit.

#### b. Polikristal Silikon

Polikristal silikon merupakan jenis sel surya yang materialnya berasal dari susunan Kristal yang acak dengan efisiensi yang dimiliki sebesar 14-16% (Narayana, 2010). Jenis ini terbuat dari coran silisium yang dipotong seperti bentuk bunga Kristal es, jenis ini juga memiliki efisiensi yang tidak cepat menurun jika sinar matahari redup.

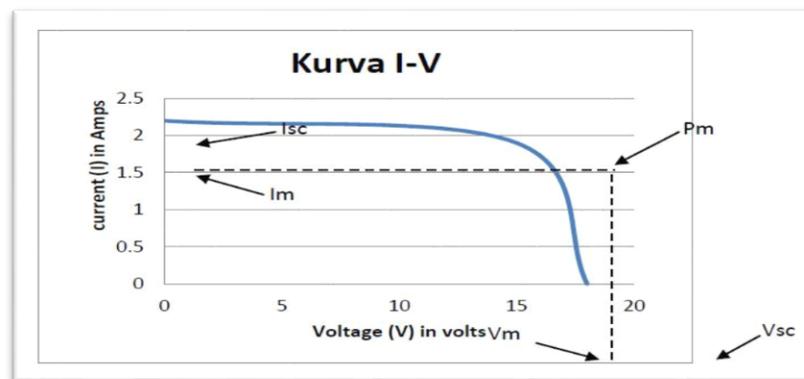
#### c. Amorphous Silikon

Amorphous silikon merupakan jenis sel surya yang memiliki tingkat efisiensi paling rendah sebesar 9-14% dengan harga yang paling murah (Narayana, 2010). Jenis ini juga biasanya digunakan pada alat-alat elektronik kecil berupa kalkulator dan jam tangan.

### 8. Karakteristik Sel Surya

Terdapat 3 karakteristik dari sel surya yaitu dilihat dari produksi listriknya, temperature, dan intensitas cahaya matahari. Pertama, dilihat dari produksi listriknya, *photovoltaic* dibuat dari semikonduktor berupa silikon yang digunakan sebagai insulator ketika suhunya kecil dan sebagai konduktor apabila terdapat energi dan panas. Besaran luas bidang semikonduktor jenis silikon ini tidak menentukan produksi energi listrik (energi matahari menjadi foton) dari *photovoltaic* dan secara stabil akan dapat memproduksi energi sekitar kurang lebih mulai dari 0.5 volt hingga mencapai 600 mV dengan arusnya sebesar 2 A dan nilai intensitas radiasi mataharnya sebesar  $1000 \text{ W/m}^2 = "1 \text{ Sun}"$ . Kekuatan radiasi solar matahari tersebut akan dapat memproduksi arus listrik (I) berkisar 30 mA/cm<sup>2</sup> setiap panel suryanya.

*Photovoltaic* akan dapat memproduksi energi maksimal apabila nilai tegangan maksimal ( $V_m$ ) dan arus maksimal ( $I_m$ ). Sedangkan arus hubung singkat ( $I_{sc}$ ) akan mengeluarkan arus listrik maksimal ketika tidak adanya nilai tegangan dan arus hubung singkat ( $I_{sc}$ ) berbanding langsung dengan intensitas radiasi matahari. Tegangan *open circuit* sendiri akan maksimal apabila nilai arusnya nol dan  $V_{oc}$  akan naik secara logaritma apabila intensitas radiasi matahari juga naik. Karakteristik inilah yang memungkinkan *photovoltaic* dapat mengisi aki..



Gambar 2.10 Kurva arus dan tegangan

(Sumber: Wulandari, Triyas Ika. 2010. *Rancang Bangun Sistem Penggerak Pintu Air Dengan Memanfaatkan Energi Alternatif Matahari* (Skripsi). Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh November)

Keterangan:

$I_{sc}$  = arus hubung singkat (*short circuit*)

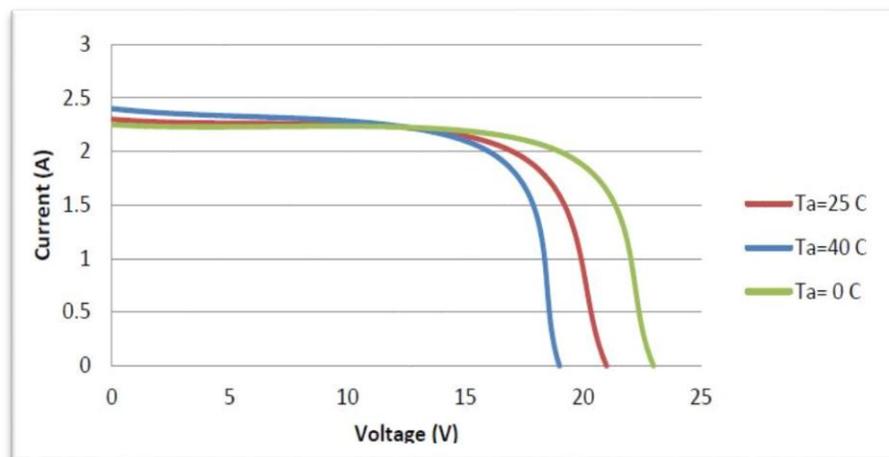
$V_{oc}$  = tegangan *open circuit* (volt)

$V_m$  = tegangan maksimum (volt)

$I_m$  = arus maksimum (ampere)

$P_m$  = daya keluaran maksimum dari *photovoltaic* array (watt)

Kedua, dilihat dari temperature, *photovoltaic* dapat berjalan secara maksimal apabila suhunya normal yaitu sebesar 25 derajat celcius. Namun, apabila suhunya naik lebih besar dari suhu normal, maka dapat menurunkan nilai tegangan yang diproduksi karena setiap kenaikan suhu sebesar 1 derajat celcius dari 25 derajat, maka dapat mengurangi nilai tegangan berkisar 0.4 % dari keseluruhan tenaga yang dihasilkan 8 atau akan melemah 2 kali lipat untuk menaikkan suhu setiap 10 derajat celcius. Berikut grafik pengaruh temperatur pada sel surya :

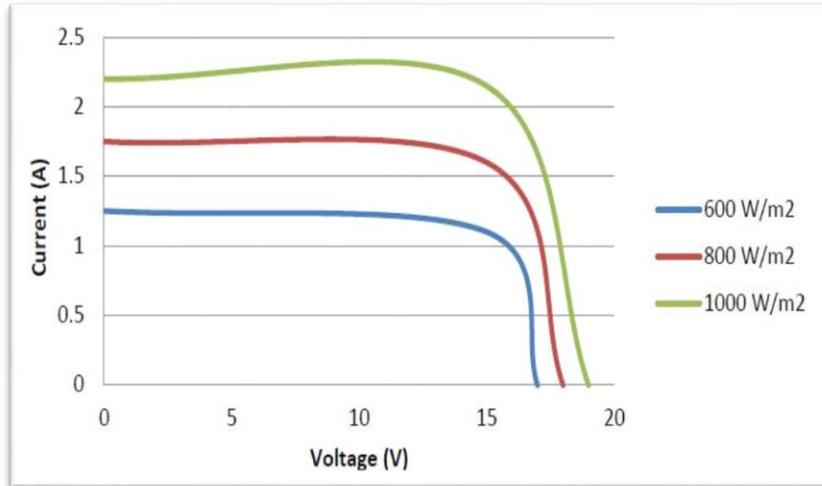


Gambar 2.11 Grafik pengaruh *temperature* terhadap arus sel surya

(Sumber: Wulandari, Triyas Ika. 2010. *Rancang Bangun Sistem Penggerak Pintu Air Dengan Memanfaatkan Energi Alternatif Matahari* (Skripsi). Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh November)

Ketiga, dilihat dari intensitas radiasi matahari, nilai intensitas radiasi matahari akan banyak berpengaruh terhadap arus dan sedikit pada tegangan yaitu apabila nilai intensitas radiasi matahari yang diserap oleh *photovoltaic* semakin rendah, maka arusnya pun akan semakin rendah pula. Dengan hal tersebut dapat menentukan titik *Maximum Power Point* dalam kondisi yang berada pada titik

yang semakin rendah juga. Berikut grafik antara arus dan tegangan berdasarkan intensitas matahari atau *insolation* dalam satuan W/m<sup>2</sup> :



Gambar 2.12 Grafik arus dan tegangan terhadap *insolation*

(Sumber: Wulandari, Triyas Ika. 2010. *Rancang Bangun Sistem Penggerak Pintu Air Dengan Memanfaatkan Energi Alternatif Matahari* (Skripsi). Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh November)

Efisiensi dari konversi energi surya dari sel surya di deskripsikan melalui persamaan:

$$\eta = \frac{\text{Daya Keluaran}}{\text{Daya Masukan}} \times 100\%$$

Tentunya dengan semakin tingginya nilai efisiensi maka semakin tinggi pula daya keluaran sel surya yang di dapatkan.

## 9. Parameter Sel Surya

Dalam masa operasi maksimal sel surya juga dipengaruhi oleh beberapa parameter, yaitu diantaranya :

a. *Ambient air temperature* (suhu)

*Photovoltaic* dapat bekerja maksimal apabila suhunya masih berada pada batas normal yaitu sebesar 25 derajat celcius. Namun, apabila suhunya lebih besar dari suhu normal, maka akan menurunkan nilai tegangan yang diproduksi karena setiap kenaikan suhu sebesar 1 derajat celcius dari 25 derajat, maka akan mengurangi nilai tegangan berkisar 0,4 % dari keseluruhan energi yang diproduksi. 8 atau akan menurun 2 kali lipat yang digunakan untuk menaikkan suhunya setiap 10 derajat celcius.

b. Radiasi matahari

Radiasi matahari yang tertangkap di bumi dan berbagai lokasi bervariasi akan sangat tergantung terhadap kondisi spektrum cahaya matahari yang tertangkap di bumi. Intensitas radiasi matahari akan sangat berpengaruh terhadap arus dan sedikit pada tegangan yaitu apabila nilai intensitas radiasi matahari yang diserap oleh *photovoltaic* semakin rendah, maka arusnya pun akan semakin rendah pula. Dengan hal tersebut dapat menentukan titik *Maximum Power Point* dalam kondisi yang berada pada titik yang semakin rendah juga.

c. Kecepatan tiupan angin

Kecepatan angin bertiup adalah parameter *photovoltaic* yang dapat membantu menurunkan suhu bidang permukaan *photovoltaic* yang berada disekitarnya.

d. Kondisi atmosfer bumi

Kondisi atmosfer bumi ini seperti mendung, berawan, polusi, kabut, uap air udara, dan jenis partikel debu udara lainnya akan sangat mempengaruhi sel surya dalam penentuan hasil maksimal arus listriknya.

e. Orientasi sel surya (array)

Orientasi sel surya sangatlah penting karena dari *photovoltaic* (array) yang dirangkai menghadap ke arah datangnya cahaya matahari secara optimal dapat

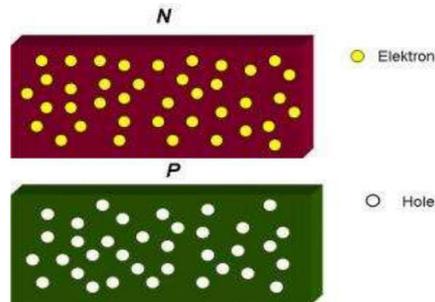
membuat sel surya menghasilkan energi yang maksimal. Dan apabila bidang sel surya tidak dapat mempertahankan ketegak lurusannya dengan cahaya matahari, maka diperlukan penambahan luas pada bidang panel surya karena perlu diketahui bahwa bidang panel surya terhadap sinar matahari akan berubah setiap jamnya dalam sehari.

#### 10. Proses Terbentuknya Listrik

Proses terbentuknya listrik yang berasal dari cahaya matahari yang menggunakan sel surya ini dimungkinkan yang disebabkan karena bahan penyusun *photovoltaic* sendiri yaitu bahan semikonduktor. Semikonduktor yang menyusun sel surya terdiri dari dua jenis semikonduktor, yaitu semikonduktor jenis negatif dan positif. Semikonduktor jenis negatif ini adalah jenis semikonduktor yang mempunyai elektron berlebih yang disebut juga dengan n= negatif karena muatan negatif yang terlalu banyak atau berlebih. Sedangkan, semikonduktor jenis positif adalah jenis semikonduktor yang terdapat kelebihan *hole* atau yang disebut juga dengan p=positif karena muatan positif yang terlalu banyak atau berlebih.

Pada awalnya, dua jenis semikonduktor yang dibuat ini mempunyai jumlah dan keunggulan yang sama dan keunggulannya yaitu dapat menaikkan tingkatan kemampuan daya hantar listrik dan panas dari semikonduktor alami ini. Dan apabila dua jenis semikonduktor dihubungkan menjadi satu, maka akan terbentuk hubungan atau sambungan yang disebut diode p-n atau dapat disebut juga sebagai sambungan metalurgi (*metallurgical junction*). Berikut proses perubahan cahaya matahari menjadi energi listrik dari sel surya :

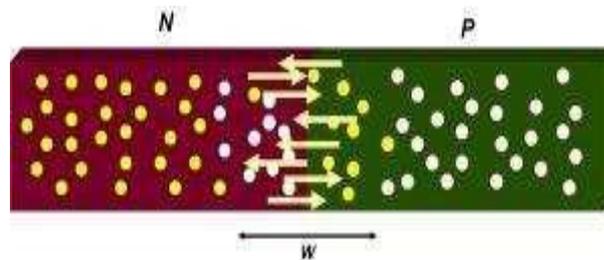
- a. Semikonduktor jenis positif dan negatif sebelum dilakukannya penyambungan, yaitu sebagai berikut :



Gambar 2.13 Sebelum disambung antara semikonduktor jenis positif dan negatif

(Sumber: Wibowo, Rachmat Adhi, *Melihat Prinsip Kerja Sel Surya Lebih Dekat*. <http://energisurya.wordpress.com/2008/07/10/melihat-prinsip-kerja-sel-surya-lebih-dekat/>, diakses tanggal 3 Februari 2017)

- b. Setelah dilakukannya penyambungan antara semikonduktor jenis p dan n, maka akan terjadi dua perpindahan yaitu perpindahan elektron yang bergerak bebas dari semikonduktor jenis negatif ke arah semikonduktor jenis positif dan pindahanya *hole* dari semikonduktor jenis positif ke semikonduktor jenis negatif.

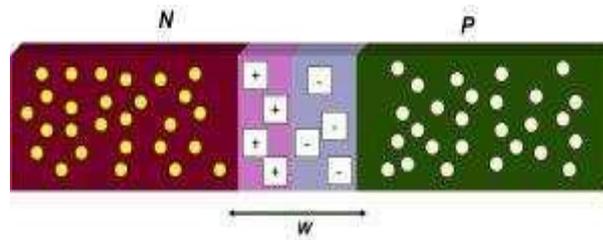


Gambar 2.14 Pergerakan elektron dan *hole* setelah disambung di dalam semikonduktor

(Sumber: Wibowo, Rachmat Adhi, *Melihat Prinsip Kerja Sel Surya Lebih Dekat*. <http://energisurya.wordpress.com/2008/07/10/melihat-prinsip-kerja-sel-surya-lebih-dekat/>, diakses tanggal 3 Februari 2017)

- c. Setelah terjadi dua perpindahan tersebut, maka akan menyebabkan semikonduktor jenis n lebih bermuatan positif dan semikonduktor jenis p akan

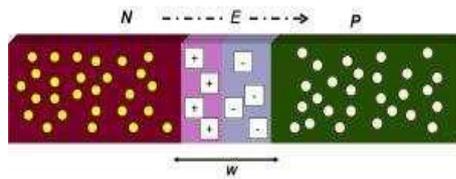
lebih bermuatan negatif. Hal tersebut dikarenakan baik kapasitas dari *hole* maupun elektron menjadi berkurang dengan adanya perpindahan tersebut.



Gambar 2.15 Hasil muatan positif dan negatif pada semikonduktor

(Sumber: Wibowo, Rachmat Adhi, *Melihat Prinsip Kerja Sel Surya Lebih Dekat*. <http://energisurya.wordpress.com/2008/07/10/melihat-prinsip-kerja-sel-surya-lebih-dekat/>, diakses tanggal 3 Februari 2017)

- d. Setelah terjadinya dua perpindahan antara semikonduktor p dan n, maka terbentuklah daerah penyatuan elektron dan *hole* yang disebut dengan daerah depresi (*depletion region*) yang tertera pada gambar diatas dengan simbol huruf W. Dan perpindahan tersebut menyebabkan elektron dan *hole* disebut sebagai pembawa muatan minoritas akibat keberadaannya yang berbeda di daerah depresi.
- e. Perpindahan dua jenis semikonduktor ini menyebabkan adanya perbedaan antara muatan positif dan negatif di daerah depresi, kemudian perbedaan tersebut akan menimbulkan adanya listrik dari sisi positif ke sisi negatif. Timbulnya energi listrik ini akan mencoba menarik kembali baik elektron maupun *hole* ke tempat muatan tersebut berasal. Hal tersebut dikarenakan energi listrik cenderung berlawanan dengan adanya perpindahan yang di di daerah depresi.

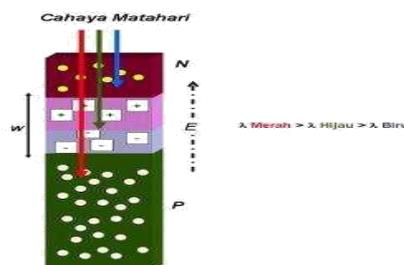


Gambar 2.16 Timbulnya listrik internal E

(Sumber: Wibowo, Rachmat Adhi, *Melihat Prinsip Kerja Sel Surya Lebih Dekat*. <http://energisurya.wordpress.com/2008/07/10/melihat-prinsip-kerja-sel-surya-lebih-dekat/>, diakses tanggal 3 Februari 2017)

- f. Timbulnya medan listrik ini akan membuat sambungan p-n menjadi setimbang karena kapasitas *hole* yang bergerak dari semikonduktor p ke n akan tertarik kembali ke semikonduktor p. Begitu juga dengan kapasitas elektron yang bergerak dari semikonduktor n ke p akan tertarik kembali ke semikonduktor n.

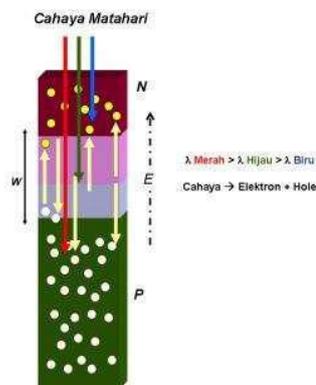
Dengan demikian, proses konversi cahaya matahari menjadi listrik terjadi pada sambungan p-n. Untuk menangkap cahaya matahari, maka posisi semikonduktor jenis n berada di atas lapisan semikonduktor jenis p dan menghadap ke radiasi matahari. Untuk itu, semikonduktor jenis n dibuat jauh lebih tipis dengan tujuan agar radiasi matahari yang tertangkap ke bidang permukaan *photovoltaic* dapat diserap yang kemudian masuk menuju daerah deperesi dan semikonduktor jenis positif..



Gambar 2.17 Posisi sambungan semikonduktor dalam penangkapan cahaya matahari

(Sumber: Wibowo, Rachmat Adhi, *Melihat Prinsip Kerja Sel Surya Lebih Dekat*. <http://energisurya.wordpress.com/2008/07/10/melihat-prinsip-kerja-sel-surya-lebih-dekat/>, diakses tanggal 3 Februari 2017)

Pada saat hubungan semikonduktor ini menangkap radiasi matahari, maka elektron yang berada pada semikonduktor jenis n ini akan mendapatkan energi dari cahaya matahari. Setelah elektron ini mendapat energi, maka elektron dapat bergerak bebas dari semikonduktor n, daerah deplesi maupun semikonduktor p. Bergeraknya elektron ini akan menyebabkan *hole* tertinggal di tempat yang ditinggalkan oleh elektron. Kejadian ini disebut dengan fotogenerasi elektron *hole*. Fotogenerasi elektron *hole* ini akan membentuk pasangan elektron dan *hole* yang diakibatkan karena terkenanya radiasi matahari.



Gambar 2.18 Sambungan semikonduktor setelah ditembus cahaya matahari

(Sumber: Wibowo, Rachmat Adhi, *Melihat Prinsip Kerja Sel Surya Lebih Dekat*. <http://energisurya.wordpress.com/2008/07/10/melihat-prinsip-kerja-sel-surya-lebih-dekat/>, diakses tanggal 3 Februari 2017)

Cahaya matahari yang menembus sambungan semikonduktor ini memiliki spektrum warna dan panjang gelombang (dilambangkan dengan simbol “ $\lambda$ ” yang dapat dilihat pada gambar diatas) yang berbeda-beda. Cahaya matahari yang spektrum warnanya merah, maka mempunyai bentuk  $\lambda$  yang lebih panjang, sehingga mampu menembus sampai di daerah semikonduktor p yang akan membentuk fotogenerasi disana. Sedangkan, cahaya matahari yang spektrumnya berwarna biru memiliki panjang gelombang lebih pendek yaitu hanya diserap di semikonduktor n. Adanya perbedaan panjang gelombang ini akan membuat fotogenerasi pada sambungan p-n menjadi berbeda pula.

## 11. Keuntungan dan Kelebihan Sel Surya

### a. Keuntungan

Sel surya dapat memberikan keuntungan dibandingkan dengan sumber-sumber tenaga lainnya, seperti generator diesel, fosil dan lain-lain (Nasrul Haq Rosyadi, 2016). Berikut adalah keuntungannya :

- Tidak membutuhkan bahan bakar untuk beroperasi. Hal ini menguntungkan karena tidak menyebabkan gangguan pada lingkungan karena tidak menyebabkan polusi akibat proses pemakaian bahan bakar, dan tidak mengeluarkan suara mesin yang bergerak sehingga tidak mengganggu lingkungan.
- Sel surya memiliki ketahanan dan kestabilan yang sudah teruji waktu operasinya cukup lama.
- Sel surya dapat dengan mudah di bangun di daerah terpencil dan dapat di pindahkan peletakannya.

### b. Kerugian

Di samping memiliki keuntungan sel surya juga memiliki beberapa kerugian (Nasrul Haq Rosyadi, 2016), yaitu :

- Terlalu bergantung pada matahari, sehingga sangat terpengaruh oleh keadaan cuaca dalam produksi listriknya.
- Biaya pembangunannya cukup mahal.
- Membutuhkan komponen tambahan untuk mengonversi dan memperbesar output listriknya.

## 2.2.5.2 Baterai

### 1. Pengertian Baterai

Baterai merupakan suatu komponen yang digunakan pada sistem PLTS memiliki fungsi sebagai penyimpan hasil dari *photovoltaic* yaitu energi listrik dalam bentuk energi arus DC. Energi yang disimpan pada baterai berfungsi sebagai cadangan (*back up*), yang biasanya digunakan pada saat panel surya tidak menghasilkan energi listrik, contohnya pada saat malam hari atau pada saat cuaca mendung, selain itu tegangan keluaran ke sistem cenderung lebih stabil. Satuan kapasitas energi yang dihasilkan pada baterai adalah *ampere hour* (Ah), yang artinya arus maksimum yang dapat dikeluarkan oleh baterai selama satu jam. Proses pengosongan baterai (*discharge*), baterai tidak boleh dikosongkan hingga titik maksimum, sebab hal ini mempengaruhi usia pakai (*life time*) dari baterai tersebut. Batas pengosongan dari baterai disebut dengan *depth of discharge* (DOD) dengan satuan persen. Apabila baterai memiliki *depth of discharge* sebesar 80%, maka energi yang tersedia di dalam baterai hanya dapat digunakan sebesar 80% dan 20% lainnya digunakan sebagai cadangan. Kemudian, semakin besar *depth of discharge* yang diberlakukan pada suatu baterai, maka umur teknis dari baterai akan semakin pendek (James P Dunlop (1997)).

Baterai dapat diartikan sebagai gabungan dari sel-sel yang terhubung seri. Secara umum ada dua jenis baterai yang digunakan untuk keperluan *solar electric systems*, yaitu *lead acid battery* (accu) dan *nicel cadmium battery*. Kedua jenis baterai tersebut memiliki komponen yang hampir sama, hanya saja berbeda dalam jenis elektroda yang dipakai dan jenis elektrolit yang digunakan untuk membangkitkan reaksi elektrokimia. *Lead acid battery* menggunakan lempengan yang terbuat dari lead, dan sebagai elektrolitnya digunakan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (asam sulfur) yang sama seperti pada accu serta memiliki efisiensi 80%. Sedangkan *nickel cadmium battery* menggunakan cadmium sebagai elektroda negatif dan nikel sebagai elektroda positif sedang elektrolitnya dipakai potassium hidroksida dan memiliki efisiensi 70% (James P Dunlop (1997)).

Baik *lead acid* baterai maupun nikel cadmium baterai secara umum mempunyai 4 bagian penting. Keempat bagian tersebut mempunyai fungsi yang berbeda-beda yang menunjang proses penyimpanan energi maupun pengeluaran energi. Empat bagian tersebut terdiri dari:

- a. Elektroda
- b. Pemisah atau separator
- c. Elektrolit
- d. Wadah sel

## 2. Jenis-Jenis Baterai

Sistem penyimpanan energi yang biasanya di pakai pada sel surya adalah baterai, dari segi penggunaannya baterai dapat diklasifikasikan menjadi 2 jenis yaitu (Nasrul Haq Rosyadi, 2016) :

### a. Baterai Primer

Baterai primer adalah baterai yang hanya digunakan atau di pakai sekali saja. Pada waktu baterai dipakai, material dari salah satu elektroda menjadi larut dalam elektrolit dan tidak dapat dikembalikan dalam keadaan semula.

### b. Baterai Sekunder

Baterai sekunder adalah jenis baterai yang dapat digunakan dan dapat diisi ulang kembali dengan mengembalikan komposisi awal elektroda dengan menggunakan arus yang berkebalikan.

Baterai berperan sangat penting dalam sistem sel surya karena baterai di gunakan untuk membantu agar sel surya dapat memenuhi kestabilan suplai daya ke beban. Baterai pada sel surya mengalami dua tahapan siklus yaitu tahapan siklus pengisian (*Charging*) dan tahapan siklus pengosongan (*Discharging*) yang sangat bergantung pada terdapat tidaknya radiasi matahari. Selama adanya ketersediaan radiasi matahari, maka *photovoltaic* dapat memproduksi energi listrik. Dan apabila

terdapat kelebihan energi listrik, maka kelebihan energi ini dapat digunakan untuk mengisi baterai. Namun, apabila tidak ada sinar matahari, maka kebutuhan listrik dapat dipasok dari energi yang tersimpan di baterai. Tahapan siklus mengisi dan mengosongkan baterai dinamakan dengan satu tahapan siklus baterai. Berikut beberapa hal yang harus diperhatikan pada baterai :

a. Tegangan baterai

Tegangan baterai yaitu suatu nilai tegangan yang merupakan watak dasar baterai yang ditentukan dari proses elektrolit baterai yaitu konversi antara energi kimia menjadi energi listrik.

b. Kapasitas baterai

Kapasitas baterai yaitu jumlah muatan yang tersimpan pada baterai yang menggambarkan sejumlah energi maksimal yang di keluarkan dari sebuah baterai yang dinyatakan dalam *Ampere Hour* (Ah). Nilai Ah ini didapatkan dari perkalian antara nilai arus yang dapat dikeluarkan baterai dengan berapa lamanya waktu untuk mengeluarkannya. Untuk itu, baterai yang bernilai 12 V 200 Ah berarti bahwa baterai akan dapat melepaskan baik sebesar 200 A dalam 1 jam, 50 A dalam 4 jam, 4 A dalam 50 jam, atau 1 A dalam 200 jam. Kemudian, ketika merancang kapasitas baterai untuk sistem PLTS yang paling penting dilakukan yaitu memperhatikan berapa jumlah hari-hari otonominya (*days of autonomy*). Hari-hari otonomi yaitu hari-hari disaat tidak adanya sinar matahari (Polarpowerinc, 2011).

c. Parameter *charging* dan *discharging* baterai

Kapasitas sebuah baterai sangat dipengaruhi oleh nilai *charging* dan *discharging*. Apabila baterai dikosongkan dengan cepat, maka energi listrik yang akan digunakan baterai akan menurun, untuk itu kapasitas baterai juga akan menurun. Hal tersebut disebabkan karena keperluan suatu komponen untuk melakukan reaksi yang terjadi hanya memiliki waktu yang terbatas untuk berpindah ke tempat yang seharusnya. Jadi seharusnya arus *discharging* yang digunakan harus

sangat rendah, sehingga energi yang digunakannya pun juga rendah dan kapasitas baterai yang didapat menjadi lebih besar.

Pengaturan aliran daya pada sistem dilakukan oleh BCR (*Battery Charger Regulator*). Hal ini berguna untuk melindungi baterai dan peralatan lainnya dari berbagai penyebab kerusakan. Jenis-jenis BCR yang ada di pasaran yakni adalah *controller* seri, *controller* parallel, dan *controller* menggunakan MPP (*Maximum Power Point*) *tracker*. Berikut formula untuk menghitung kapasitas BCR sebagai berikut :

$$I_{BCR} = I_{SC \text{ panel}} \times N_{\text{panel}} \times 125\%$$

Keterangan :

$I_{BCR}$  = Arus BCR (Ampere)

$I_{SC \text{ panel}}$  = Arus hubung-singkat panel surya (Ampere)

$N_{\text{panel}}$  = Jumlah panel surya

125% = Kompensasi

### 3. Perhitungan Daya Tahan Baterai

Intensitas arus listrik didefinisikan sebagai muatan listrik yang lewat per satuan waktu melalui suatu penampang daerah dimana muatan mengalir, seperti penampang tabung pemacu atau kawat logam. Karena itu jika dalam waktu  $t$ ,  $N$  partikel bermuatan yang masing-masing membawa muatan  $q$ , lewat melalui suatu penampang medium penghantar, maka muatan total yang lewat adalah  $Q = Nq$ , dan intensitas listriknya adalah :

$$I = \frac{Q}{t}$$

Keterangan :

$I$  = Arus listrik dalam satuan ampere

Q = Muatan listrik yang satuannya coulomb yang setara dengan ampere detik

t = Waktu (*second*) (Zuhal, 2004)

Dari persamaan diatas, persamaan muatan listrik dapat diperoleh sebagai berikut :

$$Q = I \times t$$

Perhitungan daya tahan baterai dihitung dari persamaan sebagai berikut :

$$t = \frac{Q}{I}$$

Dari persamaan tegangan diperoleh :

$$V = I \times R$$

### 2.2.5.3 Inverter

#### 1. Pengertian Inverter

Inverter adalah suatu komponen sistem PLTS yang digunakan untuk mengkonversikan arus DC dari panel surya atau baterai menjadi arus AC. Tegangan keluaran yang dihasilkan setelah dilakukannya konversei melalui inverter ini dapat bernilai tetap atau berubah-ubah sesuai kebutuhan. Bentuk gelombang keluaran dari inverter idealnya gelombang sinus. Tetapi pada kenyataannya tidak demikian karena adanya harmonisa. Inverter di bagi menjadi 2 macam yaitu, inverter satu fase dan inverter tiga fase. Dan menurut jenis gelombangnya ada tiga jenis inverter yang ada di pasaran yakni inverter gelombang sinus, gelombang sinus termodifikasi, dan inverter gelombang kotak. Berikut formula untuk menghitung kapasitas inverter (Rashid, 1993) :

$$P_{\text{inverter}} = P_{\text{max}} \times 125\%$$

Keterangan:

$P_{\text{inverter}}$  = Daya inverter (Watt)

$P_{max}$  = Beban puncak (Watt) 125%  
= Kompensasi

Berdasarkan karakteristik dari performa yang dibutuhkan, inverter untuk sistem PLTS berdiri sendiri (*stand-alone*) dan PLTS *grid-connected* memiliki karakteristik yang berbeda, yaitu:

- a. Pada PLTS *stand-alone*, inverter harus mampu mensuplai tegangan AC yang konstan pada variasi produksi dari modul surya dan tuntutan beban (*load demand*) yang dipikul.
- b. Pada PLTS *grid-connected*, inverter dapat menghasilkan kembali tegangan yang sama persis dengan tegangan jaringan pada waktu yang sama, untuk mengoptimalkan dan memaksimalkan keluaran energi yang dihasilkan oleh modul surya.

## 2. Parameter Performa Inverter

Keluaran energi listrik yang sudah dikonversikan oleh inverter akan terdapat adanya kualitas inverter secara normal dan *noise* yang mengganggu gelombang sinus yang dikeluarkan dari inverter yang dinamakan dengan harmonisa. Berikut parameter performa dari inverter ini (Nasrul Haq Rosyadi, 2016) :

- a. Harmonisa faktor dari harmonisa ke-n (HF<sub>n</sub>)

Harmonisa faktor dari ke-n yaitu jumlah dari pasokan harmonisa itu sendiri.

- b. Total *harmonic distortion* (THD)

Total *harmonic distortion* merupakan suatu ukuran kemiripan bentuk antara komponen dasarnya dengan sebuah gelombang.

- c. *Distortion Factor* (DF)

*Distortion factor* adalah ukuran efektivitas dari pengurangan harmonisa-harmonisa yang tidak diperlukan tanpa adanya nilai spesifik filter beban orde kedua.

#### d. Harmonisa Orde Terendah

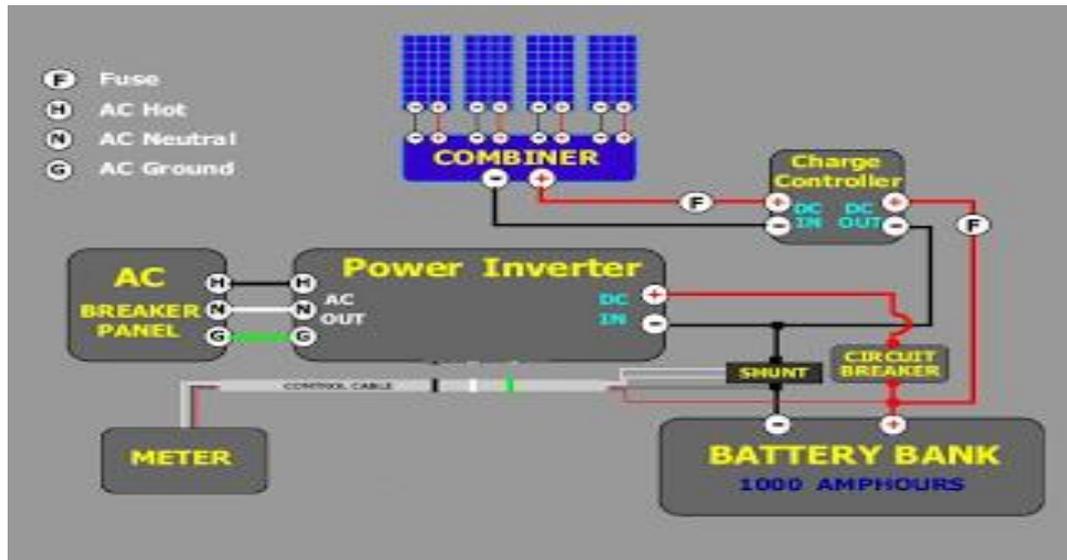
Harmonisa pada orde paling rendah yaitu harmonisa yang memiliki nilai frekuensi yang hampir dekat dengan nilai frekuensi dari komponen dasarnya. Sedangkan, nilai amplitudonya lebih tinggi yaitu sebesar 3% dari amplitudo komponen dasarnya..

### 2.2.6 Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Dalam pembuatan atau pendirian pembangkit listrik tenaga surya, ada beberapa yang harus diperhatikan dalam merencanakannya. Perencanaan yang baik sangat diperlukan karena pembangkit listrik ini memanfaatkan radiasi matahari sebagai bahan utama pembangkitnya. Berikut beberapa perencanaannya :

- Menentukan dan menghitung keseluruhan kapasitas daya yang diperlukan dalam penggunaan energi sehari-hari dengan satuannya watt.
- Menentukan berapa besar nilai arus yang diproduksi dari *photovoltaic* dalam satuan *Ampere Hour* dengan memperhitungkan jumlah panel surya yang dibutuhkan dalam sistem PLTS.
- Menentukan dan menghitung jumlah baterai yang dibutuhkan dalam sistem PLTS dengan mempertimbangkan penggunaan tanpa adanya sinar matahari (*Ampere hour*).

Dari segi ekonomi, sistem PLTS ini dalam pembangunannya sangat dibutuhkan biaya investasi awal yang sangat tinggi. Namun, khususnya untuk daerah terpencil yang tidak terjangkau listrik dari PLN, sangat dibutuhkan pembangkit listrik dari energi terbarukan, terlebihnya menggunakan tenaga surya karena di Indonesia intensitas radiasi matahari sangat baik untuk dijadikannya pembangkit listrik. Dari segi jangka panjang, sistem PLTS ini memiliki masa operasi hingga 20-25 tahun. Dan komponen sistem ini yaitu baterai maupun komponen yang lain memiliki daya tahan hingga 3-5 tahun.



Gambar 2.19 Skema prinsip kerja pembangkit listrik tenaga surya

(Sumber: Anonim, *Cara Menghitung Daya Tenaga Surya*.

<http://katalognatopringsewu.blogspot.co.id/2014/04/cara-menghitung-daya-tenaga-surya.html>, diakses tanggal 20 April 2017)

Dari skema pembangkit listrik tenaga surya diatas merupakan prinsip kerja dari sistem PLTS. Prinsip kerjanya yaitu sebagai berikut :

1. Beberapa solar panel disusun secara paralel dengan tujuan untuk menghasilkan arus yang lebih besar. Kemudian panel surya ini akan menyerap energi matahari dan mengubah menjadi energi listrik DC atau searah.
2. Setelah cahaya matahari diubah menjadi energi listrik di panel surya, kemudian energi disalurkan ke *charge controller*.
3. Dari *charge controller* ini akan digunakan untuk mengisi baterai.
4. Apabila akan memenuhi beban AC, maka listrik DC yang ada di dalam baterai harus dikonversikan dulu menjadi listrik AC dengan menggunakan inverter. Beban AC seperti televisse, radio, computer, dan lain-lain. Sedangkan, arus baterai disuplai oleh inverter.