



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

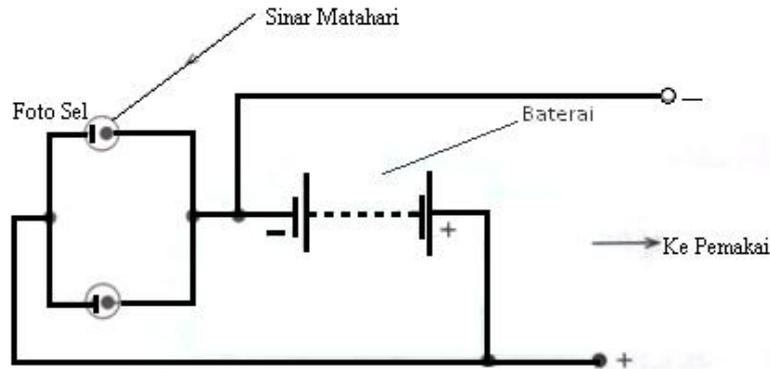
2.1 Teori Dasar Semikonduktor

Semikonduktor adalah sebuah bahan dengan konduktivitas listrik yang berada di antara insulator (isolator) dan konduktor. Semikonduktor disebut juga sebagai bahan setengah penghantar listrik. Suatu semikonduktor bersifat sebagai insulator jika tidak diberi arus listrik dengan cara dan besaran arus tertentu, namun pada temperatur, arus tertentu, tatacara tertentu dan persyaratan kerja semikonduktor berfungsi sebagai konduktor, misal sebagai penguat arus, penguat tegangan dan penguat daya.

Dalam semikonduktor ada muatan yang bisa bergerak sehingga bisa didapatkan arus listrik karena gerakan muatan itu. Dalam logam setiap atom kira-kira mempunyai satu elektron yang bisa bergerak. Itu berarti jumlah muatan yang bisa bergerak sama dengan jumlah atom yang ada. Konduktivitas yang dihasilkan oleh kelebihan elektron disebut konduktivitas kelebihan atau disebut semikonduktor n. Sedangkan konduktivitas yang dihasilkan oleh lowong disebut konduktivitas kekurangan elektron atau konduktivitas p atau semikonduktor p. (Richard Blocher: 2014; 87)

2.2 Teori Dasar PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya)

Pada prinsipnya, pembangkit listrik tenaga surya terdiri dari sekelompok foto sel yang mengubah sinar matahari menjadi gaya gerak listrik (ggl) untuk mengisi baterai aki (B). Dari baterai aki (B) energi listrik dialirkan kepemakai. Pada waktu banyak sinar matahari (siang hari), baterai aki (B) diisi oleh foto sel. Tetapi pada saat malam hari, foto sel tidak menghasilkan energi listrik, maka energi listrik diambil dari baterai aki (B) tersebut. (Djiteng Marsudi: 2005; 132)



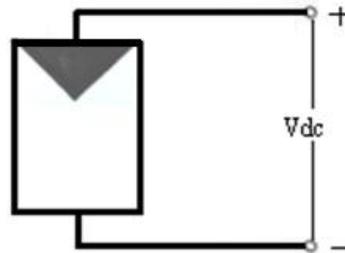
Gambar 2.1 Foto sel dan baterai aki (B) sebagai sumber energi listrik

Sumber : Djiteng Marsudi: 2005: 132

Sel surya atau sel fotovoltaik berasal dari bahasa Inggris “*Photo Voltaic*”. Kata photovoltaic berasal dari dua kata “*photo*” berasal dari kata Yunani yakni “*phos*” yang berarti cahaya, dan kata “*volt*” adalah nama satuan pengukuran arus listrik yang diambil dari nama penemu Alessandro Volta (1745-1827), sebagai pionir dalam mempelajari teknologi kelistrikan. Jadi secara harfiah “*photovoltaic*” mempunyai arti Cahaya-Listrik, dan itu dilakukan sel surya yaitu merubah energi cahaya menjadi listrik, penemunya Edmond Becquerel dan kawan-kawan pada abad 18. (Iman Permana: 2008; 30)

Photovoltaic adalah bahan semikonduktor yang berfungsi untuk membangkitkan tenaga listrik. Jadi pada *photovoltaic* ini, bahan semikonduktor yang diproses sedemikian rupa sehingga apabila bahan tersebut terkena sinar matahari atau cahaya, maka akan mengeluarkan tegangan listrik arus searah (DC). Photovoltaic ini juga sejenis dengan dioda yang tersusun atas PN junction. (Zuhal: 1995; 194)

Simbol yang diberikan untuk photovoltaic ini dapat dilihat pada gambar dibawah:



Gambar 2.2 Simbol yang diberikan untuk *photovoltaic*.

Sumber: Zuhail: 1995; 194

2.2.1 Prinsip Kerja Sel Surya

Sel surya terbuat dari rangkaian dua atau lebih lapisan semikonduktor yang didukung oleh piranti lain untuk meningkatkan efisiensinya. Berdasarkan konfigurasi semikonduktor yang menyusunnya, secara umum sel surya digolongkan menjadi dua macam yaitu:

a. Tipe p-n junction

Pada tipe ini sel surya terdiri dari dua lapisan semikonduktor yaitu tipe n (sebagai window) dan tipe p (sebagai adsorber). Tebal lapisan window berkisar antara 0,6-1 μm sedangkan tebal lapisan adsorber berkisar antara 1-2 μm .

Semikonduktor sendiri ialah suatu material yang dapat bersifat sebagai konduktor dan insulator pada kondisi tertentu. Contoh semikonduktor yang paling terkenal ialah silikon. Silikon memiliki empat elektron valensi sehingga agar dapat stabil silikon harus melepas empat elektron terluarnya atau justru menangkap empat elektron. Jadi pada silikon murni, material memiliki kecenderungan yang sama untuk menangkap atau melepas elektron.

Semikonduktor semacam ini disebut semikonduktor intrinsik (tipe 1). Jika silikon dicampurkan atau didoping dengan unsur lain maka sifat semikonduktor silikon akan berubah. Semikonduktor yang dibuat dengan menambahkan unsur lain ini disebut semikonduktor ekstrinsik. Jika silikon dicampurkan dengan Boron



(golongan III) yang memiliki tiga elektron valensi, elektron valensi dari material menjadi tujuh sehingga agar dapat stabil material cenderung untuk menerima satu elektron alih-alih melepaskan ketujuh elektron valensinya.

Karena kekurangan elektron agar dapat stabil inilah (kelebihan hole), semikonduktor jenis ini disebut semikonduktor tipe p. Sebaliknya jika silikon digabungkan dengan fosfor (golongan V) yang memiliki lima elektron valensi, material cenderung untuk melepaskan satu elektron agar dapat stabil. Karena kelebihan elektron semikonduktor semacam ini disebut semikonduktor tipe n. Elektron dalam suatu atom memiliki energi yang berbeda-beda tergantung pada tingkat atau posisi suatu elektron dalam atom. Semakin tinggi energinya, semakin jauh orbitalnya dari inti. Elektron pada tingkat energi yang paling tinggi yang masih terikat oleh inti disebut elektron valensi. Pada jenis material tertentu, sebagian elektronnya tidak terikat pada satu inti atom melainkan bergerak dari satu atom ke atom lain, bergerak dari ujung material ke ujung lainnya.

Jika pita energi yang memuat elektron valensi terisi penuh, maka pita ini disebut pita valensi dan pita tertinggi selanjutnya disebut pita konduksi. Jika pita yang memuat elektron valensi tidak terisi penuh, pita ini disebut pita konduksi. Selisih energi terendah dari pita konduksi dengan energi tertinggi dari pita valensi disebut *band gap* (BG). Pada logam, pita konduksi dan pita valensinya saling tumpang-tindih (*overlapping*, $BG \approx 0$) sehingga elektron valensinya bebas bergerak dari satu inti ke inti lain namun tetap berada pada material.

Elektron yang bebas mengalir inilah yang menyebabkan arus listrik dapat mengalir dan material dengan sifat seperti ini disebut konduktor. Dalam kasus ini, elektron dianggap sebagai “gas elektron” yang disumbangkan oleh atom-atom dalam zat. Sifat konduktifitas zat bergantung dari band gapnya, semakin tinggi band gap-nya semakin sulit suatu elektron bisa mencapai pita konduksi sehingga sulit untuk menghantarkan panas dan listrik. Untuk semikonduktor *band gap*nya berkisar antara 1-6 eV.

b. Prinsip Kerja Sel Surya p-n junction

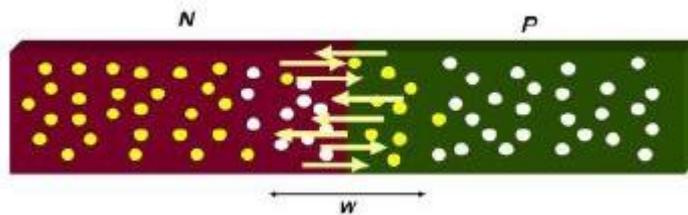
Prinsip kerja sel surya didasarkan pada penggabungan semikonduktor tipe-p yang kelebihan hole dan semikonduktor tipe-n yang kelebihan elektron.

1. Semikonduktor tipe-p dan tipe-n sebelum disambungkan



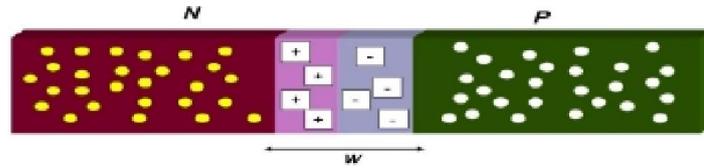
Gambar 2.3 Semikonduktor tipe-P dan tipe-N

2. Ketika kedua jenis semikonduktor ini disambung, terjadi perpindahan elektron dari semikonduktor tipe-n menuju semikonduktor tipe-p dan perpindahan hole dari semikonduktor tipe-p ke semikonduktor tipe-n pada daerah sambungan. Perpindahan elektron maupun hole ini hanya sampai pada jarak tertentu dari batas sambungan awal.



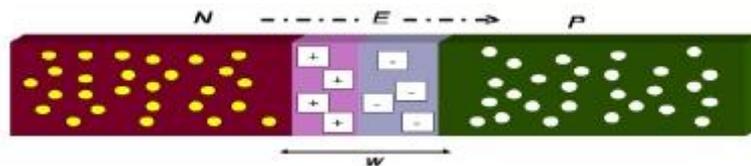
Gambar 2.4 : Semikonduktor tipe-P dan tipe-N disambung

3. Elektron dari semikonduktor n yang bersatu dengan hole pada semikonduktor p yang mengakibatkan jumlah hole pada semikonduktor p akan berkurang. Daerah ini akhirnya berubah menjadi lebih bermuatan positif. Pada saat yang sama. Hole dari semikonduktor p bersatu dengan elektron yang ada pada semikonduktor n yang mengakibatkan jumlah elektron di daerah ini berkurang. Daerah ini akhirnya lebih bermuatan positif.



Gambar 2.5 : Semikonduktor tipe-P dan tipe-N bersatu

- Daerah negatif dan positif ini disebut dengan daerah deplesi (*depletion region*) ditandai dengan huruf W. Pada daerah deplesi ini terdapat banyak keadaan terisi (hole + elektron). Baik elektron maupun hole yang ada pada daerah deplesi disebut dengan pembawa muatan minoritas (*minority charge carriers*) karena keberadaannya di jenis semikonduktor yang berbeda.
- Perbedaan muatan pada daerah deplesi ini menimbulkan medan listrik internal E dari daerah positif ke daerah negatif pada daerah deplesi yang disebut arus *drift*. Dengan memperhatikan perpindahan elektron pada arus *drift* dari arah semikonduktor p ke arah semikonduktor n, sebaliknya perpindahan hole dari arah semikonduktor tipe-n ke arah semikonduktor tipe-p yang mana berlawanan dengan arus yang muncul pada point 2.



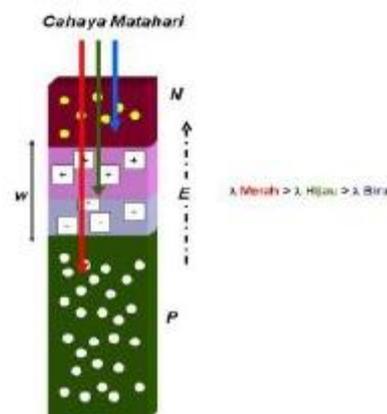
Gambar 2.6 : Perbedaan muatan semikonduktor tipe-P dan tipe-N

- Adanya medan listrik mengakibatkan sambungan p-n berada pada titik setimbang, yakni saat di mana jumlah hole yang berpindah dari semikonduktor p ke n dikompensasi dengan jumlah hole yang tertarik kembali ke arah semikonduktor p akibat medan listrik E. Begitu pula dengan jumlah elektron yang berpindah dari semikonduktor n ke p, dikompensasi dengan mengalirnya kembali elektron ke semikonduktor

n akibat tarikan medan listrik E. Dengan kata lain, medan listrik E mencegah seluruh elektron dan hole berpindah dari semikonduktor yang satu ke semikonduktor yang lain. Dengan demikian dalam keadaan ini tidak ada arus dan tegangan yang timbul.

Jadi jika sel surya tidak menerima energi cahaya, tidak ada arus yang dapat dimanfaatkan. 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.

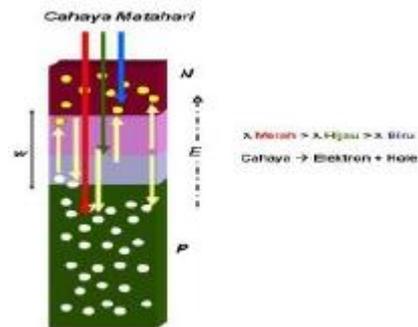
Pada sambungan p-n inilah proses konversi cahaya matahari menjadi listrik terjadi. Untuk keperluan sel surya, semikonduktor n berada pada lapisan atas sambungan p yang menghadap ke arah datangnya cahaya matahari, dan dibuat jauh lebih tipis dari semikonduktor p, sehingga cahaya matahari yang jatuh ke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



Gambar 2.7 : Konversi cahaya pada semikonduktor P-N

Ketika sambungan semikonduktor ini terkena cahaya matahari, maka elektron mendapat energi dari cahaya matahari untuk melepaskan

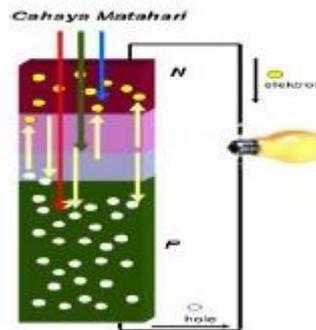
dirinya dari semikonduktor n, daerah deplesi maupun semikonduktor. Terlepasnya elektron ini meninggalkan hole pada daerah yang ditinggalkan oleh elektron yang disebut dengan fotogenerasi elektron-hole (*electron-hole photogeneration*) yakni, terbentuknya pasangan elektron dan hole akibat cahaya matahari.



Gambar 2.8 : Terbentuknya pasangan elektron dan hole akibat matahari

Cahaya matahari dengan panjang gelombang yang berbeda, membuat fotogenerasi pada sambungan pn berada pada bagian sambungan pn yang berbeda pula. Spektrum merah dari cahaya matahari yang memiliki panjang gelombang lebih panjang, mampu menembus daerah deplesi hingga terserap di semikonduktor p yang akhirnya menghasilkan proses fotogenerasi di sana. Spektrum biru dengan panjang gelombang yang jauh lebih pendek hanya terserap di daerah semikonduktor n.

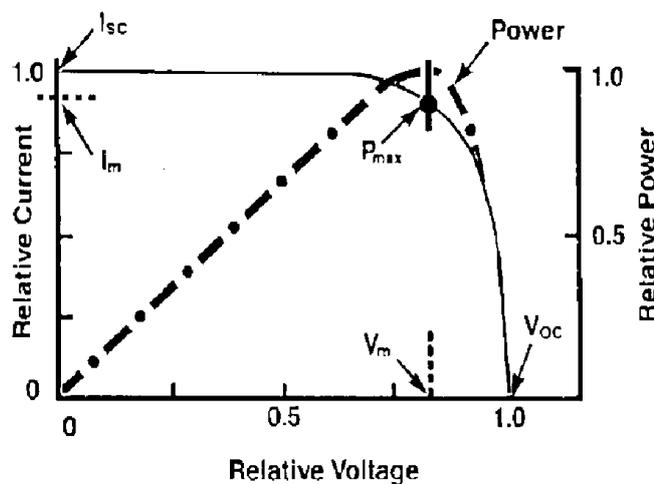
Selanjutnya, dikarenakan pada sambungan pn terdapat medan listrik E, elektron hasil fotogenerasi tertarik ke arah semikonduktor n, begitu pula dengan hole yang tertarik ke arah semikonduktor p. Apabila rangkaian kabel dihubungkan ke dua bagian semikonduktor, maka elektron akan mengalir melalui kabel. Jika sebuah lampu kecil dihubungkan ke kabel, lampu tersebut menyala dikarenakan mendapat arus listrik, dimana arus listrik ini timbul akibat pergerakan elektron.



Gambar 2.9 : Arus listrik akibat pergerakan elektron ditandai lampu menyala (<http://paradoks77.blogspot.com/2011/11/semikonduktor-sel-surya-terbuat-dari.html>) 06 april 2014

2.2.2 Karakteristik Modul Fotovoltaik

Sifat-sifat listrik dari modul fotovoltaik biasanya diwakili oleh karakteristik arus tegangannya, yang mana disebut juga kurva I-V (lihat gambar 2.10). Kurva I-V dapat diukur menurut susunan peralatan seperti ditunjukkan dalam gambar kurva 2.10 menunjukkan arus yang diberikan oleh modul fotovoltaik (I_{mod}), sebagai suatu fungsi dari tegangan modul fotovoltaik (V_{mod}), pada suatu radiasi tertentu. Untuk mendapatkan daya yang maksimum dari suatu *photovoltaic*, maka beban harus terletak pada titik yang disebut *Maximum Power Point* (MPP).



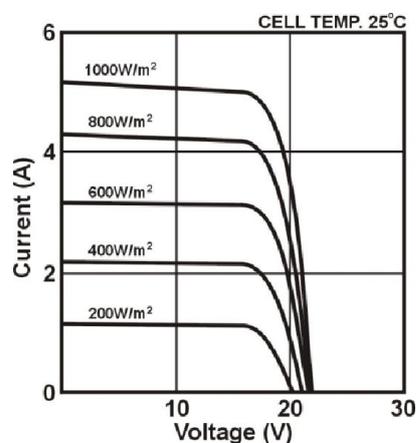
Gambar 2.10 Kurva arus-tegangan dari sebuah modul surya

Sumber: Zuhail: 1995; 199

Jika sebuah modul *photovoltaic* dikenai hubung singkat ($V_{\text{mod}} = 0$), maka arus hubung singkat (I_{sc}) mengalir. Pada keadaan rangkaian terbuka ($I_{\text{mod}} = 0$), maka tegangan modul disebut tegangan terbuka (V_{oc}). Daya yang dihasilkan modul *photovoltaic*, adalah sama dengan hasil kali arus dan tegangan yang dihasilkan oleh modul *photovoltaic*. Jika tegangan dari modul ditambah, misalnya dengan menambah tahanan beban dan dimulai dari $V_{\text{mod}} = 0$ (pada kondisi hubung singkat), maka daya dari modul bertambah dari nol sampai ke daya maksimum pada suatu tegangan tertentu.

Pada nilai dimana modul memberikan daya maksimumnya disebut nilai daya maksimum, dan dikarakteristikan dengan besaran tegangan nilai daya maksimum (V_{mp}), daya nilai daya maksimum (P_{mp}) dan arus nilai daya maksimum (I_{mp}). Untuk beban yang konstan, titik MPP tidak dapat dicapai oleh semua radiasi. Hal ini memerlukan suatu rangkaian pengatur yang mampu membawa beban pada titik MPP-nya. Rangkaian ini dikenal sebagai rangkaian pengatur MPP (*MPP Regulator Circuit*). Tetapi apabila *photovoltaic* ini digunakan untuk mengisi baterai maka hampir semua titik MPP dapat didekati, yaitu dengan mendesain *photovoltaic* agar tegangannya sama dengan tegangan baterai. (Zuhail: 1995; 196)

Berikut ini merupakan karakteristik tegangan versus arus yang dipengaruhi oleh radiasi yang berbeda-beda pada *photovoltaic*.



Gambar 2.11 Karakteristik photovoltaic

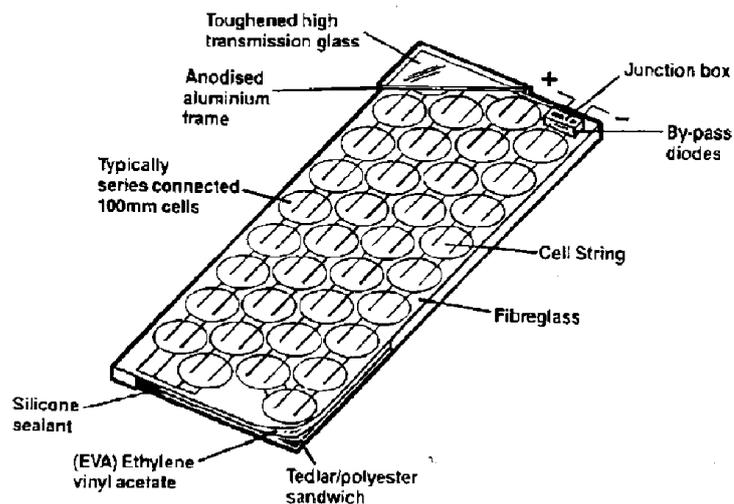
Sumber: Zuhail: 1995; 195

Pada gambar 2.11 diatas dapat dilihat bahwa tegangan *open circuit* yang terjadi (V_{oc}) konstan, tetapi arusnya berubah-ubah sesuai dengan besarnya radiasi yang mengenainya. (Zuhal: 1995; 195)

2.2.3 Hubungan Sel Surya Secara Seri dan Pararel

Pada umumnya modul surya mampu bertahan 20 hingga 25 tahun, khususnya untuk modul *mono-crystalline*. Modul tipe ini dirancang untuk masa operasi 30 tahun pada saat perancangan dengan acuan kondisi *lab-test*. Sel-sel silikon itu sendiri tidak mengalami kerusakan atau degradasi bahkan setelah puluhan tahun pemakaian. Namun demikian, output modul akan mengalami penurunan dengan berjalannya waktu. Degradasi ini diakibatkan oleh dua faktor utama, rusaknya lapisan atas sel (*ethylene vinyl acetate-EVA*) dan lapisan bawah (*polyvinyl fluoride film*) secara perlahan-lahan, serta kerusakan secara alami EVA yang terjadi secara bertahap di antara lapisan gelas dan sel-sel itu sendiri.

(Iman Permana: 2008 :37)



Gambar 2.12 Konfigurasi sebuah modul fotovoltaik.

Sumber : Iman Permana: 2008; 37

Sel Fotovoltaik yang dihubungkan secara seri dibungkus untuk membentuk sebuah kesatuan mekanik. Kesatuan seperti ini dinamakan sebuah modul



fotovoltaik. Satu sel surya menghasilkan tegangan sebesar 0,45 Volt. Tegangan ini sangat rendah untuk dapat dimanfaatkan secara praktis, sehingga diperlukan sejumlah sel surya yang dihubungkan secara seri. Besar nilai tegangan serta arus pada sistem *maksimum power point tracker* (MPPT) solar cell tergantung dari karakteristik solar cell tersebut. Besar arus solar cell ditulis dengan persamaan. (Green, A.M.: 1982)

$$I = I_{sc} (e^{\frac{k.T}{q}} - 1) \dots\dots\dots(2.1)$$

- Dimana : $k.T/q$ = Tegangan thermal = 0.02586 V pada suhu 300 °K
- I_{sc} = Arus hubung singkat (A)
- I_0 = Arus beban nol (A)

Dan besar tegangan solar cell pada saat hubungan terbuka ditulis dengan persamaan :

$$V_{oc} = \frac{k.T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I}{I_0} + 1 \right) \dots\dots\dots(2.2)$$

Total daya yang dibangkitkan dirumuskan :

$$P = V_{oc} \cdot I_{sc} \dots\dots\dots(2.3)$$

Daya maksimum pada solar cell diperoleh ketika :

$$\frac{dP}{dV} = 0$$

Maka dari persamaan (2.3) tersebut diatas diperoleh titik tegangan maksimum (V_m), dan titik arus maksimum (I_m) yang ditulis :

$$\frac{dP}{dV} = 0 = I_{sc} \left(e^{\frac{k.T}{q}} - 1 \right) - I_0 + \left(\frac{I.V}{I_0} \cdot e^{\frac{k.T}{q}} \right) \dots\dots\dots(2.4)$$

Berdasarkan persamaan (2.4) maka tegangan maksimum ditulis :

$$V_M = V_{oc} - V_t \cdot \ln \left[1 + \frac{V_{oc}}{V_t} \right] \dots\dots\dots(2.5)$$

Dan arus maksimum ditulis :

$$I_M = I - I_0 \left(e^{\frac{V_m}{V_t}} - 1 \right) \dots\dots\dots(2.6)$$



Dan daya maksimum yang di hasilkan dirumuskan :

$$P_m = I_m \times V_M \dots\dots\dots(2.7)$$

Daya yang dihasilkan modul surya pada titik daya maksimum dinyatakan dalam satuan watt-puncak (Watt Peak (Wp)), dan masih perlu ditambah 20% sehingga diperoleh persamaan :

$$P_T = P_N + (20 \% \times P_N) \dots\dots\dots(2.8)$$

Besarnya energi listrik yang diterima oleh solar cell diperoleh dari perkalian intensitas radiasi yang diterima dengan luas permukaan solar cell tersebut dengan persamaan berikut ini :

$$E = I_r \times A \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana :

E = Energi listrik yang diterima (Watt)

I_r = Intensitas cahaya matahari (W/m²)

A = Luas permukaan solar cell (m²)

Sedangkan untuk menghitung energi listrik yang dihasilkan atau dibangkitkan oleh panel surya adalah sebagai berikut :

$$E = P \times t \quad \text{Atau} \quad E = (V \cdot I) \times t \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana :

E = Energi listrik yang dihasilkan/dibangkitkan (Joule)

P = Daya yang terpakai oleh solar cell (Watt)

t = Lama pemakaian daya pada solar cell (detik/s)

Cara menentukan jumlah modul dilakukan dengan pendekatan :

$$n = \frac{\sum P}{KPM} \dots\dots\dots(2.11)$$



Dimana :

- n = Jumlah modul surya
- P = Jumlah daya listrik (Watt)
- KPM = Kapasitas daya modul surya (Watt)

Selain pemanfaatan energi surya diatas, perhitungan energi surya dalam hal ini adalah daya dan efesiensi solar cell tersebut seperti dibawah ini :

a. Daya

Untuk menghitung besarnya daya sesaat diperoleh dari hasil perkalian tegangan dan arus yang dihasilkan oleh solar cell dengan persamaan berikut :

$$P = V \times I \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana :

- P = Daya (Watt)
- V = Tegangan(Volt)
- I = Arus (Amper)

b. Efisiensi

Sedangkan untuk menghitung nilai efesiensi dari solar cell dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.13)$$

$$P_{input} = I_r \times A \dots\dots\dots(2.13)$$

$$P_{output} = V \times I \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana :

- η = Efisiensi (%)
- P_{input} = Daya yang diterima pada solar cell (Watt)
- P_{output} = Daya yang keluar pada solar cell (Watt)

- I_r = Intensitas cahaya matahari (Watt/m^2)
 A = Luas permukaan solar cell (m^2)
 V = Tegangan (Volt)
 I = Arus (Amper)

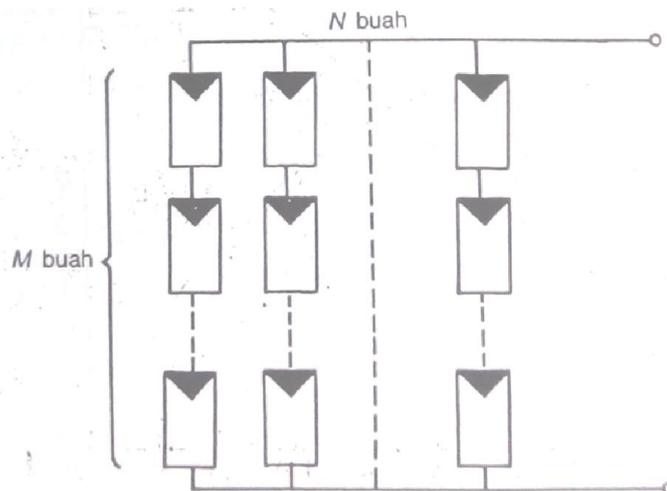
Dimana untuk mencari nilai efisiensi dari sebuah solar cell diperoleh dari perbandingan daya input (daya yang diserap oleh solar cell) dibagi dengan daya output (daya yang dihasilkan pada solar cell). (Agus Maryadi, 2012).

Adapun radiasi cahaya matahari itu sendiri harus diubah menjadi energi listrik. Dibawah ini adalah satuan konversi :

$$1 \text{ Lux} = 1 \text{ Lumen/m}^2$$

$$1 \text{ Lumen} = 0,0015 \text{ Watt}$$

Dari satuan konversi diatas maka dapat dicari berapa energi surya yang diterima oleh panel surya dari sinar matahari. Pada umumnya, satu unit solar cell hanya mampu menghasilkan daya yang kecil. Daya yang diperbesar dapat dihasilkan dengan menghubungkan-hubungkan beberapa solar cell secara seri dan paralel. Susunan dari beberapa solar cell disebut modul dan susunan beberapa module menghasilkan *array*. Sebagai contoh pada gambar 2.13



Gambar 2.13 Rangkaian seri-paralel PV

Sumber : Zuhail: 1995; 196

Diperlihatkan hubungan seri-paralel pada *photovoltaic* N buah *photovoltaic* dihubungkan paralel dan M buah dihubungkan seri. Anggap tiap cahaya mempunyai $I_{opt} = I_o$ dan $V_{opt} = V_o$ untuk radiasi maksimumnya. Maka dapat dikatakan bahwa module atau array tersebut mempunyai daya puncak. (Watt Peak) sebesar $M \times N \times I_o \times V_o$ watt. Dengan tegangan output sebesar $M \times V_o$ volt dan arus maksimum sebesar $N \times I_o$ amper. (Zuhal: 1995; 197)

2.2.4 Jenis-jenis Sel Surya

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

A. Generasi Pertama Kristal (*Single Crystal*)

Konfigurasi normal untuk sel *photovoltaic* terdiri *p-n Junction* Mono Kristal silikon material mempunyai kemurnian yang tinggi yaitu 99,999%. Efisiensi sel surya jenis *single kristal silikon* mempunyai efisiensi konversi yang cukup tinggi yaitu sekitar 16% sampai dengan 17%.



(a)



(b)

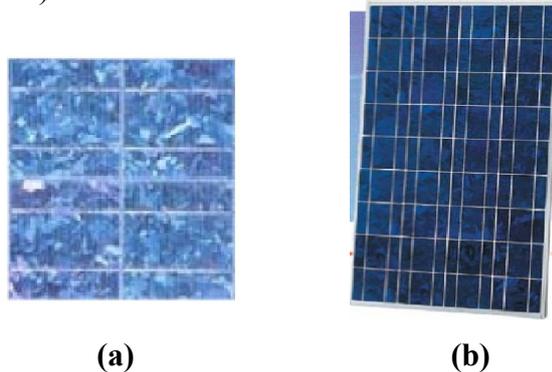
Gambar 2.14 (a). Sel surya single kristal, (b) Modul surya single kristal

Sumber: <http://energisurya.wordpress.com>

B. Generasi Kedua Kristal (*Polikristal*)

Material monokristal harga per kilogram masih mahal, untuk menurunkan harga material, dikembangkan material lain yang disebut *Polikristal*. Efisiensi

modul *photovoltaic* polikristal yang komersial mencapai 12% sampai dengan 14%. (Iman Permana: 2008: 33)

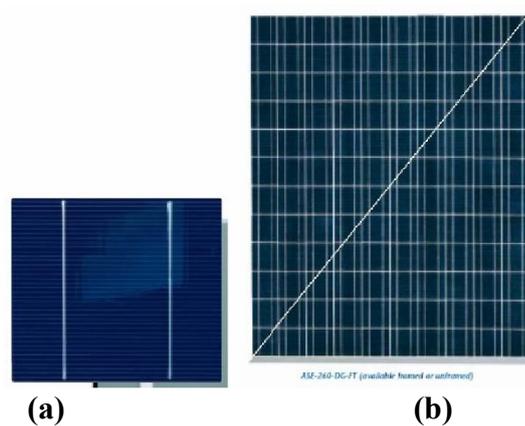


Gambar 2.15 (a). Sel surya polikristal, (b) Modul surya polikristal

Sumber: <http://energisurya.wordpress.com>

C. Generasi Ketiga, EFG the Edge Defined Film Growth Ribbon

Proses ini menumbuhkan *wafer monokristal* seperti pita langsung dari cairan silikon dengan menggunakan pita kapiler, dapat menghasilkan dengan lebar 5-10cm. Pada proses ini penumbuhan terjadi 5 m/menit dengan ketebalan 250-350 mikrometer, dengan efisiensi 13%. (Iman Permana: 2008 :34)



Gambar 2.16 (a) Sel surya jenis polikristal dengan metode EFG

(b) Modul surya

Sumber: <http://energisurya.wordpress.com>

D. Generasi Keempat (*Thin Film*)

Generasi ke-empat lapisan tipis atau thin film, mempunyai ketebalan sekitar 10 nm di atas substrat kaca/*steel* (baja) atau disebut *advanced* sel fotovoltaik. Efisiensi sel *amorphous silicon* berkisar 6% sampai dengan 9%. (Iman Permana: 2008 :35)



Gambar 2.17 *Amorphous silicon, Heterojunction dan Stack/ tandem sel.*

Sumber: <http://energisurya.wordpress.com>

2.3 *Baterai Charge Regulator (BCR)/ Regulator*

Baterai Charge Regulator (BCR) pada dasarnya berfungsi untuk mengatur pengisian (*charging*) dan pemakaian (*discharging*) listrik dari panel ke batere, agar tidak *overload*. Pada saat batere terisi penuh, alat pengatur akan memutuskan hubungan antara modul *photovoltaic* dan batere, sedangkan pada saat batere kosong, alat penagatur akan memutuskan hubungan antara batere dengan beban.

Baterai Charge Regulator (BCR) memiliki karakteristik yaitu :

- Penurunan arus pengisian dari modul photovolataik, yaitu membatasi tegangan agar tidak melampaui tegangan batas atas.
- Membatasi DOD (*Depth of discharge*) dengan pemutus arus otomatis kerangkaian beban, ketika tegangan batere turun dibawah tegangan batas bawah. (Iman Permana: 2008 : 40)

Untuk menentukan nilai arus BCR yang dibutuhkan diperoleh dari hasil bagi antara daya modul surya yang digunakan dibagi dengan tegangan keluaran modul surya.



$$I_{BCR} = P_{\text{module}} / V_{\text{Module}} \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana:

I_{BCR} = Kapasitas arus pada module (Amper)

P_{module} = Kapasitas daya modul surya (Watt Peak)

V_{Module} = Kapasitas tegangan modul surya (Volt)

2.4 Inverter

Yang dimaksud dengan inverter disini adalah suatu rangkaian yang mampu mengubah tegangan DC menjadi AC. Ada dua jenis inverter yang umum digunakan pada sistem tenaga listrik yaitu:

1. Inverter dengan frekuensi dan tegangan keluar yang konstan CVCF (*Constant Voltage Constant frequency*).
2. Inverter dengan frekuensi dan tegangan keluaran yang berubah-ubah. Umumnya inverter dengan frekuensi yang berubah-ubah digunakan pada pemakaian khusus seperti pemakaian pada pompa listrik 3 fasa dengan menggunakan sumber tegangan dc. Kerugian cara ini adalah bahwa sistem hanya dapat digunakan pada pemakaian khusus saja, sedangkan keuntungannya adalah kemampuan untuk menggerakkan sistem (beban) dengan sumber yang berubah-ubah seperti misalnya *photovoltaic* atau *solar cell*. (Zuhal: 1998; 220)

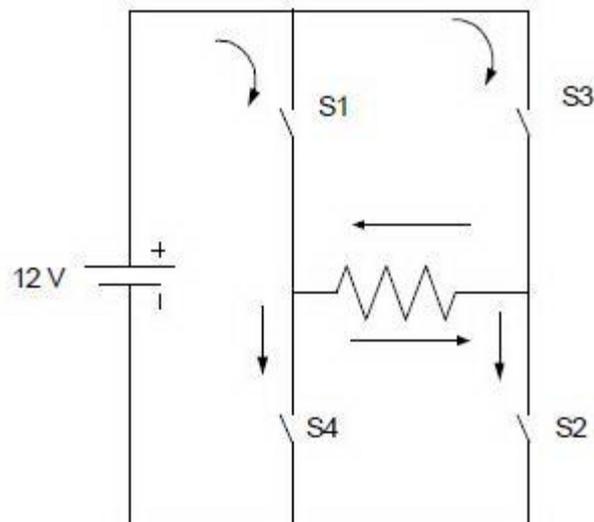
Sedangkan jenis gelombang yang dihasilkan inverter ada 3 jenis, pemilihan dari ketiga jenis gelombang ini sangat penting dalam menentukan jenis inverter dalam memenuhi kebutuhannya. Ketiga jenis gelombang itu adalah :

- a. *Sine wave inverter*, yaitu inverter yang memiliki tegangan output dengan bentuk gelombang sinus murni. Inverter jenis ini dapat memberikan supply tegangan ke beban (Induktor) atau motor listrik dengan efisiensi daya yang baik.
- b. *Sine wave modified inverter*, yaitu inverter dengan tegangan output berbentuk gelombang kotak yang dimodifikasi sehingga menyerupai

gelombang sinus. Inverter jenis ini memiliki efisiensi daya yang rendah apabila digunakan untuk mensupplay beban induktor atau motor listrik.

- c. *Square wave inverter*, yaitu inverter dengan output berbentuk gelombang kotak, inverter jenis ini tidak dapat digunakan untuk mensuplai tegangan ke beban induktif atau motor listrik.

2.4.1 Prinsip Kerja Inverter



Gambar 2.18 Prinsip kerja rangkaian inverter

Sumber <http://elektronika-dasar.web.id/artikel-elektronika/inverter-dc-ke-ac/>

Prinsip kerja inverter dapat dijelaskan dengan menggunakan saklar seperti ditunjukkan pada diatas. Bila sakelar S1 dan S2 dalam kondisi on maka akan mengalir aliran arus DC ke beban R dari arah kiri ke kanan, jika yang hidup adalah sakelar S3 dan S4 maka akan mengalir aliran arus DC ke beban R dari arah kanan ke kiri. Inverter biasanya menggunakan rangkaian modulasi lebar pulsa (*pulse width modulation* – PWM) dalam proses konversi tegangan DC menjadi tegangan AC.

(Sumber <http://elektronika-dasar.web.id/artikel-elektronika/inverter-dc-ke-ac/>)



2.5 Pengertian Akkumulator / Batere

Istilah akkumulator atau *accu* (baterai) ini berasal dari istilah asing “*Accumularem*” yang mempunyai arti mengumpulkan atau menyimpan. Dalam garis besarnya akkumulator itu bekerja sebagai berikut :

a. Pengisian

Akkumulator ini diberikan tenaga listrik berasal dari arus searah. Didalam akkumulator, tenaga (energi listrik) ini mengerjakan proses-proses kimia, sehingga dapat dikatakan bahwa :

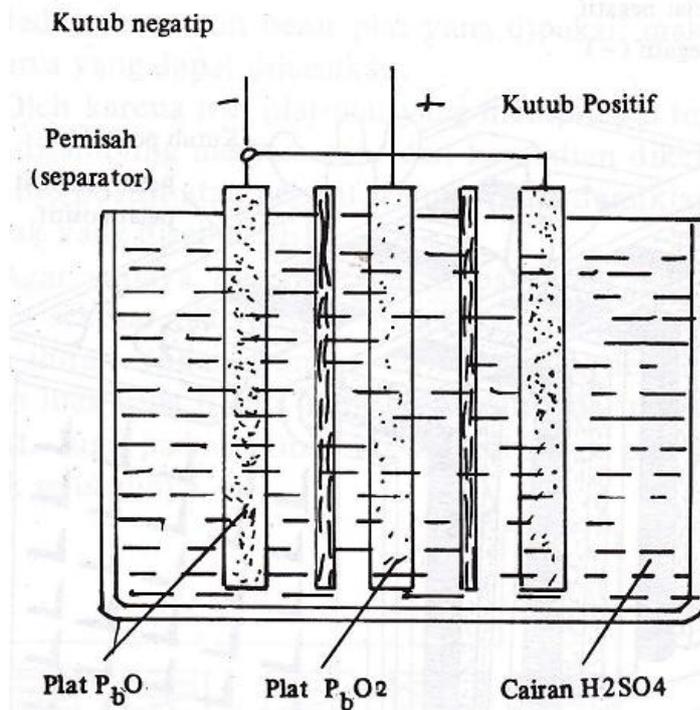
“Tenaga listrik dari luar diubah kembali menjadi tenaga kimia didalam akkumulator dan kemudian disimpan didalamnya”.

b. Pengosongan (Pemakaian)

Kalau pada akumulator yang telah terisi dengan tenaga kimia dipasangkan suatu alat yang membutuhkan tenaga listrik maka terjadilah proses kimia didalam akkumulator yang menyebabkan :

“Tenaga kimia didalam akkumulator tadi diubah kembali menjadi tenaga listrik yang kemudian mengosongkan akkumulator”.

Prinsip dasar yang digunakan dalam akkumulator yaitu: prinsip polarisasi (mengutup). Polarisasi akan menyebabkan bahan kimia yang berada didalam elektrolit ini akan berubah sifatnya dan susunannya, sehingga bahan-bahan tersebut kemudian dapat membangkitkan potensial galvanis. (F. Suryatmo: 1995; 43)



Gambar 2.19 Susunan dan konstruksi akkumulator timah

Sumber : (F. Suryatmo: 2014; 45)

Gambar diatas menunjukkan suatu susunan akkumulator yang terdiri dari sebuah bak gelas atau ebonit yang didalamnya terisi oleh cairan asam belerang (H₂SO₄) sedikit-dikitnya dimasukkan 3 buah pelat yang terbuat dari *oxida Plumbuis* (PO). Didalam susunan yang terdapat pada gambar 2.19 bahwa pelat yang berada ditengah-tengah separator itu akan menjadi pelat positif terbuat dari *Oxida Plumbuis* sedangkan untuk kutub negatifnya terbuat dari plumbum (Pb). Perhatikan pada kutub negatif (terbuat dari Pb) ini didalam baknya disambung menjadi satu yang kemudian 2 kutub ini dikeluarkan diatas bak ebonit diaman masing-masing bekerja sebagai kutub positif dan kutub negatif. Jika terdapat lebih dari pada tiga pelat, pelat-pelat tersebut harus disusun sedemikian rupa sehingga satu pelat positif selalu diapit oleh pelat negatif.

Besarnya kuat arus yang dapat dihasilkan oleh sebuah akkumulator tergantung dari luasnya pelat yang dipergunakan. Jadi makin besar pelat yang



dipakai makin besar pula kuat arus yang dapat dihasilkan. Oleh karena itu pelat-pelat yang mempunyai tegangan sama, harus disambung menjadi satu dan kemudian dikeluarkan sebagai kutub positif atau negatif, dengan cara demikian terdapatlah satu bak yang disebut sel.

Pada akkumulator terdiri atas sel-sel yang mempunyai tegangan kira-kira 2 volt untuk masing-masing sel. Ketika pengisian dilakukan, tegangan pada ukuran 14-14,8 volt harus dipertahankan. Terdapat batas minimum dan maksimum tinggi permukaan air aki untuk masing-masing sel. Bila permukaan air akkumulator di bawah level minimum akan merusak fungsi sel aki. Jika air aki melebihi level maksimum, mengakibatkan air aki menjadi panas dan meluap keluar melalui tutup sel. (F. Suryatmo: 2014; 53)

2.5.1 Jenis-Jenis Akkumulator

a. Akkumulator Basah

Akkumulator jenis ini masih perlu diberi air akkumulator yang dikenal dengan sebutan zuur. Kelemahan akkumulator tipe basah ini yaitu tingkat penguapan cairan yang tinggi, yang dapat menyebabkan karat pada benda logam sekitar akkumulator, bahkan dapat memperpendek umur pemakaian akkumulator. Saat pengisian (*recharge*), akan keluar uap dari lubang kecil seperti jarum dipenutup cell. Dalam kondisi normal, uap yang keluar tidak terlalu besar, kecuali pada kondisi pengisian yang berlebih. Pada akkumulator yang sudah berumur, penguapan akan lebih besar.

b. Akkumulator kering

Pengertian akkumulator sebenarnya adalah *maintenance free battery*. Pengertian “kering” pada istilah diatas sebetulnya agak kurang tepat karena sebetulnya aki tersebut tetap menggunakan liquid H_2SO_4 sebagai salah satu unsur utama fungsi aki yaitu sebagai media penyimpanan listrik. Unsur utama dalam material cell atau plat di batere tersebut adalah Ca atau calcium. Keunggulan unsur Ca dalam pembuatan cell atau plat adalah mempunyai sifat penguapan air sedikit berbanding dengan yang unsur



utamanya menggunakan Pb (Plumbum)/timah hitam, oleh sebab itu unsur Ca ini cocok dipakai pada maintenance free batere. Akkumulator jenis ini tidak memakai cairan, mirip seperti baterai telepon seluler. Akkumulator ini tahan terhadap getaran dan suhu rendah. Dimensinya yang kecil bisa menimbulkan keuntungan dan kerugian. Keuntungannya tak banyak makan tempat, sedangkan kerugiannya, tidak pas didudukan aki aslinya. Aki jenis ini tidak butuh perawatan, tetapi rentan terhadap pengisian berlebih dan pemakaian arus yang sampai habis, karena dapat merusak sel-sel penyimpanan arusnya.

(<http://www.scribd.com/mobile/login?actioncontext=missingpagesignup&docid=55609868&from=premium>)

2.5.2 Cara Kerja Akkumulator

Dalam akkumulator terdapat elemen dan sel untuk penyimpan arus yang mengandung asam sulfat (H_2SO_4) tiap sel berisikan pelat positif dan pelat negatif. Pada pelat positif terkandung oksid timah coklat (PbO_2), sedangkan pelat negatif mengandung timah coklat (Pb). Pelat-pelat ditempatkan pada batang penghubung. Pemisah/sparator menjadi isolasi diantara pelat itu, agar baterai *acid* mudah beredar disekeliling pelat. Bila ketiga unsur kimia ini berinteraksi, muncullah arus listrik. (F. Suryatmo: 2004; 45)

2.5.3 Kapasitas Baterai

Kuat arus listrik, tergantung pada banyak sedikitnya elektron bebas yang pindah melewati suatu penampang kawat dalam satuan waktu. Rumus-rumus untuk menghitung banyaknya muatan listrik, kuat arus dan waktu.

$$Q = I \times t \dots\dots\dots(2.16)$$



Dimana :

Q = Banyaknya muatan listrik (Coulumb)

I = Kuat arus (Amper)

t = Waktu (detik)

Menurut (Marsudi, D: 2005; 24) waktu otonomi baterai dapat dikatakan estimasi lama waktu operasional Baterai, saat tidak ada suplai dari modul surya. Makin lama waktu otonomi, makin tinggi kapasitas baterai yang diperlukan, dapat diperlihatkan dengan menggunakan persamaan

$$Q = \frac{E}{V} \dots\dots\dots(2.17)$$

Dimana :

Q = Muatan arus baterai harian (Ah)

E = Total pemakaian daya (Wh)

V = Tegangan baterai (volt)

Kapasitas suatu baterai menyatakan berapa lama kemampuannya untuk memberikan aliran listrik pada tegangan tertentu yang dinyatakan dalam ampere-jam (Ah), karena tidak mungkin suatu baterai dikosongkan penuh 100 %, maka perlu diperhitungkan tingkat pengosongannya, biasanya antara 50%-75%, tergantung dari jenis baterainya dan karakteristik dari baterai. Waktu pengosongan baterai dituliskan:

$$t = \frac{\sum \text{Energi Listrik}}{\sum \text{Daya Terpasang}} \dots\dots\dots(2.18)$$

2.5.4 Hubungan Baterai

Besar tegangan dan arus baterai dapat dihasilkan dengan melakkan dua cara menghubungkan baterai. Hubungan seri, berfungsi untuk menghasilkan jumlah tegangan yang lebih besar sesuai yang direncanakan. (Marsudi, D. 2005; 25)

$$I_T = I_{G1} + I_{G2} + I_{G3} + I_{G4} \dots\dots\dots(2.19)$$



Hubungan paralel, berfungsi untuk memperoleh arus listrik yang besar sesuai yang direncanakan.

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + V_n \dots \dots \dots (2.20)$$

2.6 Kabel

Menurut (Sigalingging:1994;38) kabel yang digunakan untuk sistem PLTS penampangnya dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$I = \frac{P}{V} \dots \dots \dots (2.21)$$

Dimana :

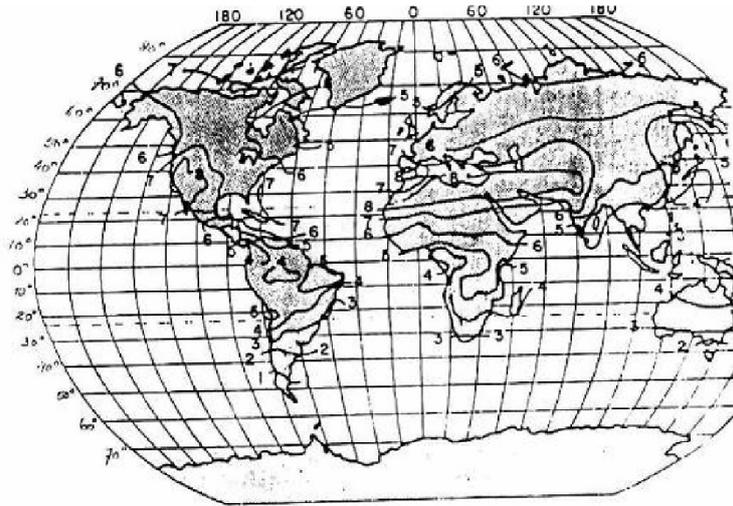
P = Daya yang melewati kabel (Watt)

V = Tegangan yang melewati kabel (Volt)

I = Arus yang melewati kabel (Amper)

2.7 Trackers

Trackers berguna untuk membenarkan posisi penghadapan panel surya kematahari. Pemasangan panel surya yang mudah dan murah adalah dengan memasang panel surya dengan posisi tetap dengan sudut kemiringan tertentu. Untuk menentukan arah sudut kemiringan panel surya harus disesuaikan dengan letak geografis Indonesia berada antara 0⁰ sampai 10⁰ terhadap LU (Lintang Utara) dan LS (Lintang Selatan) hal ini dapat kita lihat pada gambar 2.20 dibawah ini.



Gambar 2.20 Letak geografis indonesia

Sumber : Archie W. Culp, Jr dan Ir. Darwin Sitompul: 1993; 89

Dilihat dari letak geografis Indonesia (gambar 2.20) maka peletakan dan sudut kemiringan panel surya yang paling banyak menyerap sinar matahari adalah mengarah keposisi di wilayah Indonesia bagian utara khatulistiwa adalah sebesar 10° LU dan untuk sudut kemiringan rata-rata pemasangan panel surya di wilayah Indonesia bagian selatan 10° LS. (Archie W. Culp, Jr dan Ir. Darwin Sitompul: 1993 ;89)

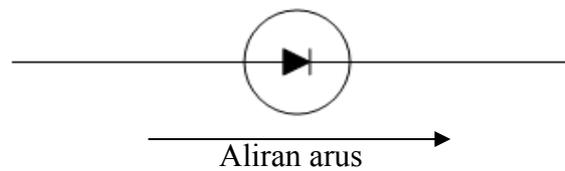
2.8 Komponen Elektronik Yang Digunakan

Secara umum komponen elektronika yang digunakan pada peralatan PLTS ini diantaranya yaitu:

- a. Dioda
- b. Kapasitor
- c. Resistor
- d. Transistor
- e. IC (Integrated Circuit)
- f. Transformator
- g. Induktor

2.8.1 Dioda

Dioda merupakan alat dengan dua terminal dan berbentuk dari dua jenis semikonduktor (silikon jenis n dan jenis p) yang tersambung. Alat ini mampu dialiri arus secara selektif mudah dalam satu arah, tetapi amat sukar dalam arah kebalikannya (Woollard: 2003; 49). Untuk simbol dari dioda secara umum diperlihatkan pada gambar 2.21 tanda panah pada simbol menunjukkan arah yang dapat dialiri arus secara mudah.



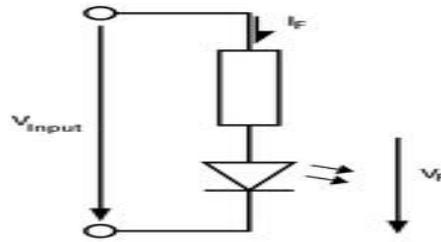
Gambar 2.21 Simbol sirkit untuk dioda

Sumber: Barry Wollard: 2003; 49

Jenis-jenis dari dioda diantaranya : Dioda Zener, LED, Infrared, photodioda dan sebagainya.

1. Dioda Zener, biasanya dipasang pada suatu rangkaian elektronika sebagai pembatas tegangan pada nilai tertentu
2. LED (*Light Emitting Diode*), yaitu Dioda yang dapat memancarkan sinar, biasa digunakan sebagai lampu indikator dengan kelebihan yaitu umur aktifnya sangat lama jika dibandingkan dengan lampu pijar. LED akan aktif jika pada anoda dan katoda LED terdapat beda potensial sebesar 2 V dengan arus yang mengalir ke LED sebesar 20 mA. Jika kita tegangan sumber yang ada diatas 2V, maka LED tersebut harus diseriikan dengan sebuah resistor. Dimana resistor ini berfungsi sebagai pembatas arus. Rangkaian resistor pembatas arus pada LED dapat dilihat pada gambar 2.21 Persamaan yang digunakan untuk mencari nilai resistor yang digunakan. (Woollard: 2003; 143)

$$R = \frac{V_s - V_f}{I_f} \dots\dots\dots(2.22)$$



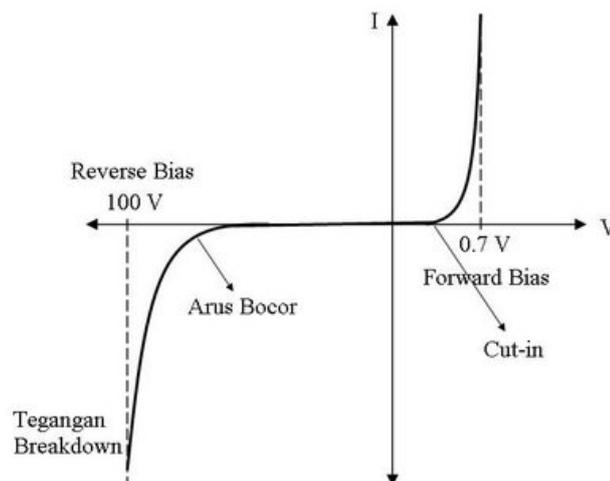
Gambar 2.22 Resistor pembatas arus pada LED

Sumber: Barry Wollard: 2003;143

3. Infrared, bentuk fisiknya sama seperti LED, perbedaan terdapat pada keluaran /output-nya, dimana infrared hanya memancarkan sinar infra merah yang pancarannya tidak dapat terlihat oleh mata.

a. Karakteristik Dioda

Berikut ini gambar 2.23 menjelaskan tentang karakteristik operasi dioda:



Gambar 2.23 Karakteristik dioda

Sumber : <http://komponenelektronika.biz/karakteristik-dioda.html>

Menyatakan bahwa karakteristik pada dioda ada 2 macam yaitu karakteristik bias maju (*forward bias*) dan karakteristik bias balik (*reverse bias*). Karakteristik bias maju dioda diperoleh jika elektroda-elektroda dioda diberi potensial sehingga arus dapat mengalir (jadi anoda diberi



potensial positif, sedangkan katoda diberi potensial negatif). Karakteristik dioda bias maju dapat dilihat pada gambar 2.23. Sebaliknya karakteristik bias balik (*reverse bias*) dioda diperoleh jika elektroda-elektroda diberi potensial-potensial yang menyebabkan arus tidak dapat mengalir (yaitu anoda diberi potensial negatif, sedangkan katoda diberi potensial positif atau katoda lebih positif terhadap anoda). (Warsito: 1983; 123)

Dari gambar 2.23 di atas, dapat diketahui bahwa: tegangan mula (sama dengan tegangan antara anoda dan katoda) yang kecil-kecil saja sudah akan membangkitkan arus. Di bawah 0,6V, arus naik dengan lambat sekali. Mulai dari 0,6V arus naik dengan cepat, dioda menghantar. tegangan 0,6V itu dinamakan tegangan ambang. Pada dioda Silikon tegangan ambangnya atau tegangan lutut sebesar 0,6 - 0,7V, sedangkan pada dioda Germanium tegangan ambangnya itu ada kira-kira 0,2 – 0,3V.

2.8.2 Kapasitor

Kapasitor merupakan alat penyimpanan muatan listrik yang dibentuk dari dua permukaan (piringan) yang berhubungan, tetapi dipisahkan oleh suatu penyekat. Bila elektron berpisah dari suatu plat ke plat yang lain, akan terdapat muatan diantara mereka pada medium penyekat tadi. Muatan ini disebabkan oleh muatan positif pada plat yang kehilangan elektron dan muatan negatif pada plat yang memperoleh elektron. (Woollard: 2003; 26)

a. Karakteristik Operasi Tegangan

Karakteristik operasi kapasitor juga searah. Dengan kata lain, sebuah kapasitor 200 V dapat dialiri tegangan DC sebesar 200 V. Untuk suplai AC tegangan suplai yang ada (misalnya, suplai utama dalam rumah sebesar 240 V) merupakan nilai rms tegangan. Untuk menentukan karakteristik operasi tegangan sebuah kapasitor yang hendak digunakan pada suplai ini, besar maksimum (atau puncak) tegangan suplai harus dihitung:

$$V_m = \sqrt{2} \times 240 \dots \dots \dots (2.23)$$

akan membentuk suplai gelombang sinusoidal. Oleh karena itu,

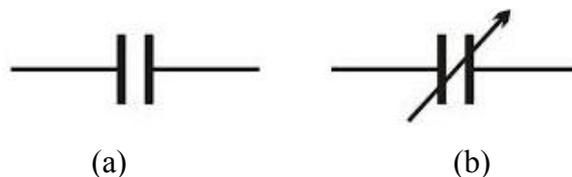
$$V_m \approx 340 \text{ V}$$

dan dengan demikian, kapasitor yang mempunyai karakteristik operasi 400 V akan dipilih untuk digunakan suplai AC 240.

b. Konstruksi dan Kode

Kapasitor yang dapat digunakan terdapat beberapa macam, tetapi semuanya terbagi dalam dua kelompok yaitu:

1. Nonelektrolitis, simbol sirkitnya terlihat pada gambar 2.24 untuk memperoleh kapasitor yang mempunyai kapasitansi terbesar dengan volume dan berat terkecil, plat kapasitor dibuat dari *foil aluminium* atau perak yang tipis.



Gambar 2.24 a. simbol sirkit untuk kapasitor nonelektrolitis yang tetap, b. dan yang variabel

Sumber: Barry Wollard: 2003; 28

2. Eletrolitis, simbol sirkitnya terlihat pada gambar 2.25 kapasitor elektrolitis mula-mula dibentuk dengan mengoksidasi salah satu plat aluminium dan menggantikan medium dielektrisnya dengan elektrolit basah, sehingga namanya menjadi elektrolitis.



Gambar 2.25 Simbol sirkit untuk kapasitor elektrolitis

Sumber: Barry Wollard: 2003; 30

Tabel 2.1 Kode Warna Kapasitor

Warna	Lajur 1 & 2	Lajur 3	Lajur 4 Toleransi	Lajur 5 V.kerja
Hitam	0		$\pm 20\%$	
cokelat	1			
merah	2			250 VDC
Jingga	3	$\times 0,001\mu\text{F}$		
Kuning	4	$\times 0,01\mu\text{F}$		00 VDC
Hijau	5	$\times 0,1\mu\text{F}$		
Biru	6			
Ungu	7			
Abu-abu	8			
Putih	9		$\pm 10\%$	

Sumber: Barry Wollard, Elektronika Praktis, 2003: 29

2.8.3 Resistor

Resistor dapat diumpamakan dengan sekeping papan yang dipergunakan untuk menahan aliran air yang deras di selokan/parit kecil. Dengan memakai tahanan papan ini, maka arus air bisa terhambat alirannya. Perumpamaan ini dapat diterapkan dalam tahanan listrik. Makin lebar/besar papan yang dipergunakan untuk menahan air got, makin kecil air yang mengalir. Begitu pula kejadian ini dapat diterapkan dalam pelajaran elektronika. Makin besar resistansi, makin kecil arus listrik dan tegangan yang melaluinya. Satuan dari resistansi resistor adalah Ohm dan dilambangkan dengan lambang. (Sumisjokartono: 1985; 6)

Untuk simbol skematis dari resistor dapat dilihat pada gambar 2.26 Resistor yang digunakan dalam rangkaian elektronika dibagi dalam dua katagori utama. (Woollard: 2003; 16)



Gambar 2.26 Resistor

Sumber : <http://Fmamaynisaa.blogspot.com>

1. Resistor linear (resistor yang bekerja sesuai dengan hukum Ohm).
2. Resistor non-linear, yang biasa dipakai terdiri dari tiga jenis, yaitu: foto resistor (Peka terhadap sinar), thermistor (Peka terhadap perubahan suhu), dan resistor tergantung pada tegangan listrik

Tabel 2.2 Kode Warna Pada Resistor

Gelang ke-	Lingkaran 1	Lingkaran 2	Lingkaran 3	Lingkaran 4
Warna	Angka	Angka	Faktor Kali	Toleransi (%)
Hitam	0	0	$\times 10^0$	-
Cokelat	1	1	$\times 10^1$	-
Merah	2	2	$\times 10^2$	-
Jingga	3	3	$\times 10^3$	-
Kuning	4	4	$\times 10^4$	-
Hijau	5	5	$\times 10^5$	-
Biru	6	6	$\times 10^6$	-
Ungu	7	7	$\times 10^7$	-
Abu-abu	8	8	$\times 10^8$	-
Putih	9	9	$\times 10^9$	-
Emas	-	-	-	5
Perak	-	-	-	10

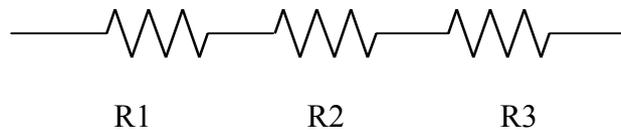
Sumber: Barry Wollard, Elektronika Praktis, 2003: 18

2.8.3.1 Hubungan Pada Resistor

Untuk mendapatkan nilai resistor yang diinginkan terkadang sulit didapatkan dipasaran, sehingga kita dapat merangkai resistor tersebut baik secara seri maupun paralel.

a. Rangkaian Seri pada Resistor

Apabila dua buah resistor atau lebih disambungkan pada ujung-ujungnya sehingga arus listrik mengalir melewati masing-masing resistor secara bergiliran, maka resistor-resistor ini dikatakan terhubung secara seri. Rangkaian seri dari resistor ini dapat dilihat pada gambar 2.27



Gambar 2.27 Resistor dirangkai seri

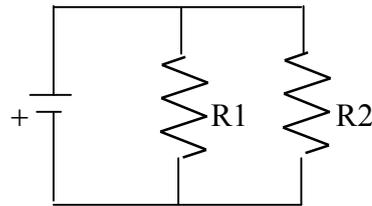
(Sumber : Rusdianto:1999;19)

Perhitungan secara matematis yang digunakan, agar nilai suatu resistor diketahui adalah dengan menggunakan persamaan :

$$R_{\text{total}} = R1 + R2 + Rn \dots \dots \dots (2.24)$$

b. Rangkaian Pararel pada Resistor

Suatu rangkaian dinyatakan paralel jika dua buah komponennya atau lebih dihubungkan pada sumber tegangan yang sama. Rangkaian paralel menyediakan lebih dari satu jalur bagi arus untuk mengalir setia jalur yang mengalir disebut cabang. Rangkaian paralel dari resistor ini dapat dilihat pada gambar 2.28



Gambar 2.28 Resistor dirangkai secara-pararel

Perhitungan secara matematis yang digunakan, agar nilai suatu resistor diketahui adalah dengan menggunakan persamaan :

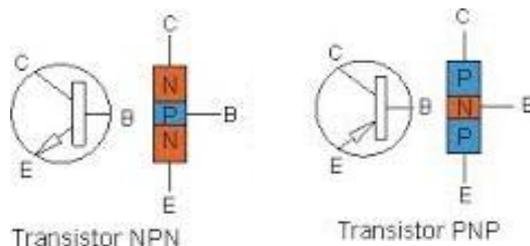
$$\frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_n} \dots \dots \dots (2.25)$$

Arus yang mengalir pada setiap resistor dapat diketahui dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$I = \frac{V}{R} \dots \dots \dots (2.26)$$

2.8.4 Transistor

Transistor merupakan salah satu semikonduktor yang dapat dipergunakan untuk perataan arus, menahan sebagian arus, menguatkan arus, pensaklaran (switching), membangkitkan frekuensi rendah maupun frekuensi tinggi. Pada umumnya transistor terbuat dari bahan Silikon (Si) dan Germanium (Ge). (Sumisjokartono: 1985: 35)



Gambar 2.29 simbol sirkit transistor

Sumber : <http://elektronika-dasar.web.id>



Transistor merupakan alat tiga terminal seperti yang diperlihatkan oleh simbol sirkit 2.29 pada dasarnya transistor merupakan tiga lapisan gabungan yaitu npn dan pnp. Simbol sirkit kedua jenis transistor itu hampir sama. Perbedaannya terletak pada arah panah diujung emitter. Arah panah ini menunjukkan arah aliran arus konvensional yang berlawanan arah dalam kedua jenis tadi tetapi selalu dari bahan jenis p ke jenis n dalam sirkit emitter dasar. (Woollard: 2003; 70)

Daerah kerja transistor dapat diklasifikasikan dalam empat macam dengan menggunakan tegangan bias yang berlainan polaritasnya:

1. Daerah Putus: bila diberikan tegangan bias mundur yang cukup besar pada kedua hubungan (*junction*) emitor dan kolektornya, arus pada terminal tetap konstan.
2. Daerah Aktif: bila hubungan emitor mendapat tegangan bias maju dan hubungan kolektor dengan tegangan bias mundur.
3. Daerah gandeng-mundur: bila hubungan emitor dengan tegangan bias mundur dan hubungan kolektor dengan tegangan bias maju. Sifatnya seperti pada daerah aktif hanya ada pertukaran fungsi emitor dengan kolektornya.
4. Daerah Jenuh: Bila hubungan emitor dan hubungan kolektor keduanya mendapat tegangan bias maju.

Dari banyak tipe-tipe transistor modern, pada awalnya ada dua tipe dasar transistor, bipolar junction transistor (BJT atau transistor bipolar) dan *field-effect* transistor (FET), yang masing-masing bekerja secara berbeda. Transistor bipolar dinamakan demikian karena kanal konduksi utamanya menggunakan dua polaritas pembawa muatan lektron dan lubang, untuk membawa arus listrik. Dalam BJT, arus listrik utama harus melewati satu daerah/lapisan pembatas dinamakan *depletion zone*, dan ketebalan lapisan ini dapat diatur dengan kecepatan tinggi dengan tujuan untuk mengatur aliran arus utama tersebut

FET (juga dinamakan transistor unipolar) hanya menggunakan satu jenis pembawa muatan (elektron atau hole, tergantung dari tipe FET). Dalam FET, arus listrik utama mengalir dalam satu kanal konduksi sempit dengan *depletion zone* di



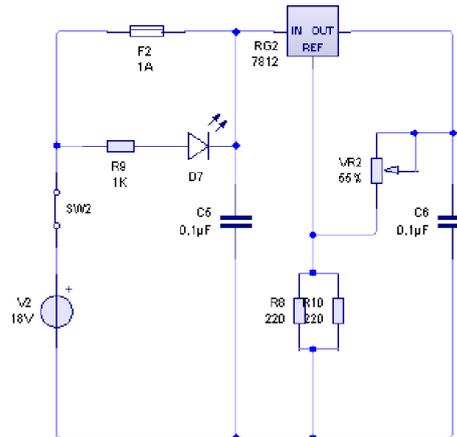
kedua sisinya (dibandingkan dengan transistor bipolar dimana daerah Basis memotong arah arus listrik utama). Dan ketebalan dari daerah perbatasan ini dapat diubah dengan perubahan tegangan yang diberikan, untuk mengubah ketebalan kanal konduksi tersebut. (Reka Rio. Masamori : 2014 ; 132).

2.8.5 IC (*Integrated Circuit*)

Rangkaian terintegrasi (*integrated circuit*) didefinisikan sebagai “Realisasi secara fisik dari elemen-elemen rangkaian yang secara terpisah tetapi merupakan kesatuan yang berada diatas atau didalam sebuah badan yang kontinu untuk membentuk satu rangkaian”. Seperti dalam sebuah potongan kristal tunggal Si diatasnya terbentuk rangkaian dengan fungsi tertentu dengan, transistor, dioda, resistor, kapasitor dan lain-lain, disebut rangkaian terintegrasi (*integrated circuit*). (Reka Rio. Masamori : 2014 ; 193)

Salah satu tipe regulator tegangan tetap adalah 7812. Regulator tegangan tipe 7812 adalah salah satu regulator tegangan tetap dengan tiga terminal, yaitu terminal V_{IN} , GND dan V_{OUT} . Tegangan keluaran dari regulator 7812 memungkinkan regulator untuk dipakai dalam sistem logika, instrumentasi dan hifi. Regulator tegangan 7812 dirancang sebagai regulator tegangan tetap, meskipun demikian dapat juga keluaran dari regulator ini diatur tegangan dan arusnya melalui tambahan komponen eksternal.

Pada umumnya catu daya selalu dilengkapi dengan regulator tegangan. Tujuan pemasangan regulator tegangan pada catu daya adalah untuk menstabilkan tegangan keluaran apabila terjadi perubahan tegangan masukan pada catu daya. Fungsi lain dari regulator tegangan adalah untuk perlindungan dari terjadinya hubung singkat pada beban. Cara pemasangan dari regulator variabel 7812 pada catu daya dapat dilihat pada gambar 2.30 berikut.



Gambar 2.30 Rangkaian Regulator Variabel Tegangan Positif 7812

Sumber : www.hqew.com.pdf

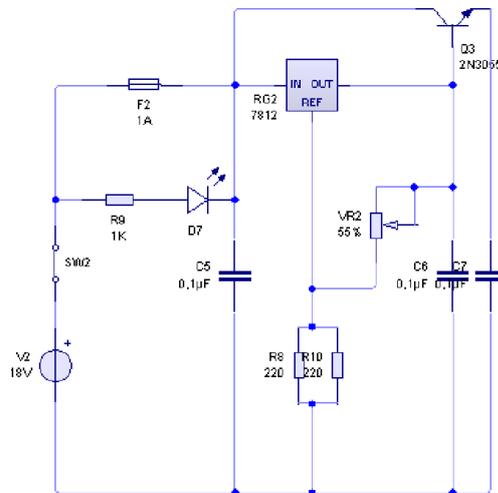
Kondensator masukan C1 dibutuhkan untuk perata tegangan sedangkan kondensator keluaran C2 memperbaiki tanggapan peralihan. Data karekteristik dari regulator tegangan tipe 7812 dapat dilihat pada tabel berikut. <http://elektronika-dasar.web.id/komponen/regulator-tegangan-positif-78xx/> diakses tanggal 30 Mei 2014

Tabel 2.3 Karakteristik Regulator Tegangan Positif 78xx

Parameter	Symbol	Condition	Min	Type	Max	Unit
Output Voltage	V_o	$T_j = 25^0 C$	11,5	12	12,5	V
Line Regulation	ΔV_o	$V_1 = 14,5 V - 30 V T_j = 25^0 C$		10	240	mV
		$V_1 = 16 V - 22 V T_j = 25^0 C$		3,0	120	
Load Regulation	ΔV_o	$I_o = 5 mA - 1,5 A, 25^0 C$		12	240	mV
		$I_o = 250 \mu A - 750 mA, 25^0 C$		4	120	
Ripple Rejection	RR	$V_1 = 15 V - 25 V f=120 Hz$	55	71		db
Output Noise Voltage	V_N	$F= 10 Hz - 100 Hz T_j=25^0 C$		75		μV
Dropout Voltage	V_D	$T_j=25^0 C$		2,0		V
Quiescent Current		$T_j=25^0 C$		4,3	8,0	
Quiescent Current Change	ΔI_o	$V_1 = 14,5V-30 V T_j = 25^0 C$			1,0	mA
		$I_o = 5 mA-A, T_j = 25^0 C$			0,5	

Sumber : <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheetpdf/view/85508/ETC/LM7812>

berdasarkan data pada tabel 2.3 bahwa dijelaskan kapasitas maksimum arus yang dapat dilewati IC LM 7812 sebesar 1,5 ampere. Sedangkan berdasarkan spesifikasi pada panel surya yang digunakan pada rancang bangun ini bahwa arus short circuit pada panel sebesar 4,23 ampere. Sehingga dibutuhkan penguat arus dengan kapasitas 5 ampere. Kita dapat menggunakan transistor jengkol tipe 2N3055 karena transistor jenis ini mudah didapat. Berdasarkan *datasheet* transistor 2N3055 bahwa kapasitas arus yang dapat dilewati transistor jenis sebesar mencapai 15 ampere. Skema rangkaian dapat kita lihat pada gambar 2.31 berikut ini.



Gambar 2.31 Rangkaian regulator 12V DC 5 Ampere

Sumber : <http://elektronika-dasar.web.id/komponen/regulator-tegangan-positif>

Berdasarkan *datasheet* LM 7812 untuk menghitung tegangan keluaran yang diharapkan dapat kita tentukan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$I_B = \frac{V_{out} (IC)}{R_1} \dots\dots\dots(2.27)$$

$$V_{out} = V_{out} (IC) \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + R_2 \cdot I_B \dots\dots\dots(2.28)$$

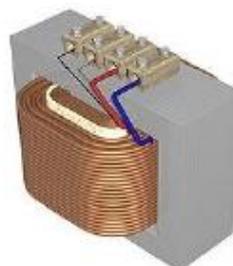
Nilai resistansi pada R2 diperoleh dari *datasheet* yaitu sebesar 180 Ω , sedangkan untuk R1 saya menggunakan potensiometer 5 K Ω agar tegangan keluaran dapat kita atur sesuai dengan kebutuhan. Sedangkan untuk mendapatkan tegangan keluaran 13,8 volt, kita dapat memposisikan R1 pada tahanan 2,2 K Ω . (www.hqew.com.pdf)

2.8.6 Transformator

Dalam arti kata yang sederhana, *transformator* adalah suatu alat pengubah arus atau tegangan yang terdiri dari dua buah lilitan atau lebih, yang disatukan secara induktif. Bilamana suatu tegangan bolak-balik diberikan kepada salah satu lilitannya (biasanya disebut lilitan primer), maka akan muncul suatu tegangan bolak-balik yang ada kaitannya dengan tegangan bolak-balik pada lilitan primer. Tegangan ini muncul pada lilitan yang satunya lagi (yang biasanya disebut sekunder). Besar tegangan yang muncul pada lilitan sekunder ini ditentukan oleh banyaknya lilitan pada bagian primer, maupun pada bagian sekunder, dan seandainya kedua lilitan tersebut bisa disatukan dengan memadai secara magnetis, maka besarnya dinyatakan dalam :

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots(2.29)$$

Atau boleh dikatakan bahwa tegangan lilitan besarnya berbanding lurus dengan banyaknya lilitan. Prinsip inilah yang dipakai pada seluruh *transformator* atau trafo dengan mengabaikan frekuensi trafo.



Gambar 2.32 Transformator

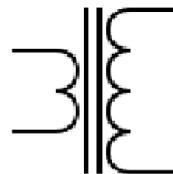
Sumber : <http://id.wikipedia.org/wiki/Transformator>

a. Prinsip kerja

Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Tegangan masukan bolak-balik yang membentangi primer menimbulkan fluks magnet yang idealnya semua bersambung dengan lilitan sekunder. Fluks bolak-balik ini menginduksikan GGL dalam lilitan sekunder. Jika efisiensi sempurna, semua daya pada lilitan primer akan dilimpahkan kelilitan sekunder.

b. Jenis - jenis transformator

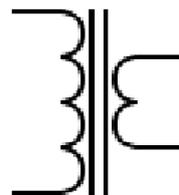
1. Step-Up



Gambar 2.33 Skema transformator step-up

Transformator step-up adalah transformator yang memiliki lilitan sekunder lebih banyak dari pada lilitan primer, sehingga berfungsi sebagai penaik tegangan. Transformator ini biasa ditemui pada pembangkit tenaga listrik sebagai penaik tegangan yang dihasilkan generator menjadi tegangan tinggi yang digunakan dalam transmisi jarak jauh.

2. Step-Down



Gambar 2.34 Skema transformator step-down

Transformator step-down memiliki lilitan sekunder lebih sedikit dari



pada lilitan primer, sehingga berfungsi sebagai penurun tegangan. Transformator jenis ini sangat mudah ditemui, terutama dalam adaptor AC-DC. (Perangkat Elektronika PEDC Bandung : 9.1)

c. Karakteristik

1. Hubungan Dasar

Apabila drop tegangan dan kerugian-kerugian lain diabaikan (trafo ideal), maka besarnya daya yang diterima oleh trafo akan sama besarnya dengan daya yang diberikan kepada beban.

$$V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2 \dots\dots\dots(2.30)$$

Atau

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_1}{I_2} \dots\dots\dots(2.31)$$

Dan dari persamaan (2.29)

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots(2.32)$$

Atau boleh dikatakan, bahwa besarnya arus lilitan berbanding terbalik dengan banyaknya lilitan. Dengan mengganti bagian primer dari trafo dengan ekivalen impedansinya Z_1 dan beban sekunder R_2 dengan Z_2 , maka besarnya arus primer dan arus sekunder bisa dinyatakan sebagai :

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_1} \dots\dots\dots(2.33)$$

Dan

$$I_2 = \frac{V_2}{Z_2} \dots\dots\dots(2.34)$$

Dengan memasukkan pernyataan-pernyataan ini kedalam persamaan (2.31), kita dapatkan

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \left[\frac{V_1}{V_2} \right]^2 \dots\dots\dots(2.35)$$



Dan dari persamaan (2.29) kita dapatkan :

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \left[\frac{N_1}{N_2} \right]^2 \dots\dots\dots(2.36)$$

Dimana :

- N_1 = Lilitan primer
- N_2 = Lilitan sekunder
- V_1 = Tegangan primer
- V_2 = Tegangan sekunder
- I_1 = Arus primer
- I_2 = Arus sekunder
- Z_1 = Impedansi primer
- Z_2 = Impedansi sekunder (impedansi beban)

2.8.7 Induktor

Induktor adalah salah satu komponen yang cara kerjanya berdasarkan induksi magnet. Induktor biasa disebut juga spul dibuat dari bahan kawat beremail tipis. Induktor dibuat dari bahan tembaga, diberi simbol L dan satuannya Henry disingkat H. Fungsi utama induktor adalah untuk menimbulkan medan magnet. Induktor berupa kawat yang digulung sehingga menjadi kumparan. Kemampuan induktor untuk menimbulkan medan magnet disebut konduktansi. Satuan induktansi adalah henry (H) atau milihenry (mH). Untuk memperbesar induktansi, didalam kumparan disisipkan bahan sebagai inti. Induktor yang berinti dari bahan besi disebut elektromagnet. Induktor memiliki sifat menahan arus AC dan konduktif terhadap arus DC.

Sebuah induktor atau reaktor merupakan sebuah komponen elektronika pasif yang dapat menyimpan energi pada medan magnet yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melintasinya. Kemampuan induktor untuk menyimpan energi magnet ditentukan oleh induktansinya, dalam satuan Henry. Biasanya sebuah induktor adalah sebuah kawat penghantar yang dibentuk menjadi kumparan, lilitan membantu membuat medan magnet yang kuat di dalam kumparan dikarenakan



hukum induksi Faraday. Induktor adalah salah satu komponen elektronik dasar yang digunakan dalam rangkaian yang arus dan tegangannya berubah-ubah dikarenakan kemampuan induktor untuk memproses arus bolak-balik.

Sebuah induktor yang ideal memiliki induktansi, tetapi tanpa resistansi atau kapasitansi, dan tidak memboroskan daya. Sebuah induktor pada kenyataannya merupakan gabungan dari induktansi, beberapa resistansi karena resistivitas kawat, dan beberapa kapasitansi. Pada suatu frekuensi, induktor dapat menjadi sirkuit resonansi karena kapasitas parasitnya. Selain memboroskan daya pada resistansi kawat, induktor berinti magnet juga memboroskan daya di dalam inti karena efek histeresis, dan pada arus tinggi mungkin mengalami nonlinearitas karena penjumlahan.

Induktor sering digunakan pada sirkuit analog dan pemroses sinyal. Induktor berpasangan dengan kondensator dan komponen lain membentuk sirkuit tertala. Penggunaan induktor bervariasi dari penggunaan induktor besar pada pencatu daya untuk menghilangkan dengung pencatu daya, hingga induktor kecil yang terpasang pada kabel untuk mencegah interferensi frekuensi radio untuk dprd melalui kabel. Dua induktor atau lebih yang terkopel secara magnetik membentuk transformator.

Induktor digunakan sebagai penyimpan energi pada beberapa pencatu daya moda sakelar. Induktor dienergikan selama waktu tertentu, dan dikuras pada sisa siklus. Perbandingan transfer energi ini menentukan tegangan keluaran. Reaktansi induktif X_L ini digunakan bersama semikonduktor aktif untuk menjaga tegangan dengan akurat. Induktor juga digunakan dalam sistem transmisi listrik, yang digunakan untuk mengikangkan paku-paku tegangan yang berasal dari petir, dan juga membatasi arus pensakelaran dan arus kesalahan. Dalam bidang ini, induktor sering disebut dengan reaktor. Induktor yang memiliki induktansi sangat tinggi dapat disimulasikan dengan menggunakan girator.

(<http://kendarikomputer.blogspot.com/2013/12/induktor-dalam-rangkaian-elektronika.html>)

diakses tanggal 25 Juni 2014

2.8.7.1 Macam-Macam Induktor

Macam-macam induktor menurut bahan pembuat intinya dapat dibagi 4 yaitu :

- a. Induktor dengan inti udara (air core)



Gambar 2.35 Induktor dengan inti udara (air core)

- b. Induktor dengan inti besi



Gambar 2.36 Induktor dengan inti besi

- c. Induktor dengan inti ferit



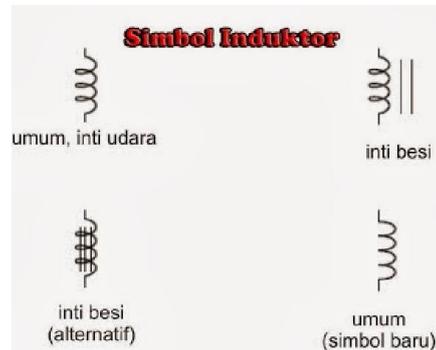
Gambar 2.37 Induktor dengan inti ferit

- d. Induktor dengan perubahan inti



Gambar 2.38 Induktor dengan perubahan inti

e. Simbol Induktor



Gambar 2.39 Simbol induktor

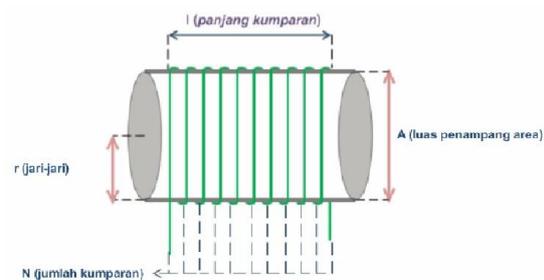
2.8.7.2 Prinsip Kerja Induktor

a. Induktor berfungsi sebagai :

1. Tempat terjadinya gaya magnet
2. Pelipat tegangan
3. Pembangkit getaran

b. Berdasarkan kegunaannya Induktor bekerja pada :

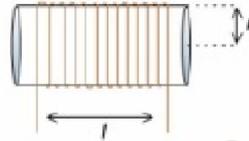
1. Frekuensi tinggi pada spul antena dan osilator
2. Frekuensi menengah pada spul MF
3. Frekuensi rendah pada trafo input, trafo output, spul speaker, trafo tenaga, spul relay dan spul penyaring

2.8.7.3 Cara Menghitung Induktansi

Gambar 2.40 Cara menghitung induktansi

Induktansi kumparan satu lapis tanpa inti (inti udara) dapat dihitung dengan rumus yang telah disederhanakan yaitu :

a. Kumparan Lapisan Tunggal

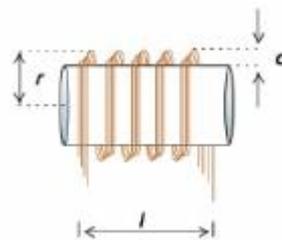


Gambar 2.41 Kumparan lapisan tunggal

Persamaannya :

$$L = \frac{0,394.r^2.N^2}{9r+10l} \dots\dots\dots(2.37)$$

b. Kumparan Lapisan Jamak

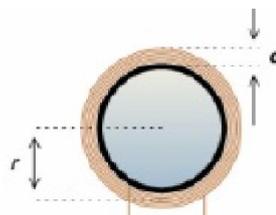


Gambar 2.42 Kumparan lapisan jamak

Persamaannya :

$$L = \frac{0,315.r^2.N^2}{6r+9l+10d} \dots\dots\dots(2.38)$$

c. Kumparan Spiral



Gambar 2.43 Kumparan spiral

Persamaannya :

$$L = \frac{0,394.r^2.N^2}{8r+11d} \dots\dots\dots(2.39)$$



Dimana :

L = Induktansi dalam (H)

d = Diameter induktor dalam (m)

r = Jari-jari kumparan (m)

l = Panjang induktor dalam (m)

N = Banyaknya lilitan

<http://oprekzone.com/cara-membuat-induktor-atau-lilitan/>