

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Fundamental Energi Surya

Energi Surya merupakan sumber energi yang sangat penting dan dibutuhkan oleh bumi dan seluruh penghuninya. Tanpa energi surya dipastikan tidak ada kehidupan. Energi surya menciptakan angin, menguapkan air yang mendukung terjadinya hujan, gelombang laut dan kekuatan termal lautan keduanya adalah hasil dari energi surya. Faktanya, terlepas dari energi nuklir, energi panas bumi, dan energi samudera, surya bertugas untuk mendukung semua bentuk energi yang ada di bumi.

2.1.1 Sumber Energi Surya

Matahari merupakan pabrik tenaga nuklir dengan proses fusi yang mengubah 4 ton massa hydrogen menjadi helium tiap detiknya dan menghasilkan 1020 kWjoule/detik. Potensi energi surya sangat bergantung pada posisi kedudukan matahari dengan koordinat wilayah tersebut dipermukaan bumi di mana hal ini akan berubah tiap waktu, sudut datang, tergantung kondisi atmosfer.

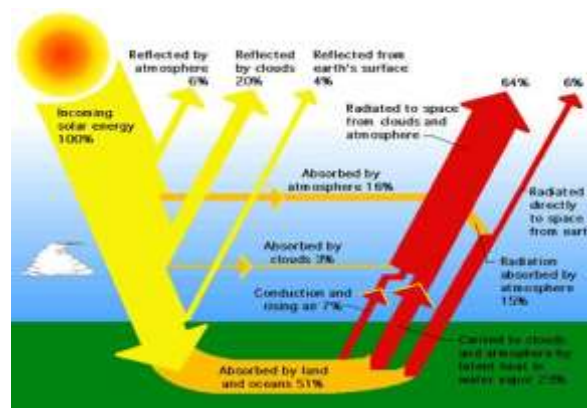
Sinar matahari membutuhkan waktu sekitar 8,3 menit untuk mencapai bumi dari permukaan dari permukaan matahari sebuah foton mulai di pusat matahari dan mengubah arah setiap kali bertemu dengan sebuah partikel bermuatan akan memakan waktu antara 10.000 dan 170.000 tahun untuk sampai ke permukaan. Jumlah total radiasi yang diterima di permukaan bumi tergantung 4 faktor, yaitu jarak matahari setiap perubahan jarak bumi dan matahari menimbulkan variasi penerimaan energy matahari. Intensitas radiasi matahari pada besar kecilnya susut datang sinar matahari ke permukaan bumi. Besar sudut sinar datang dari matahari, sinar pada sudut yang miring tidak memberikan energi pada permukaan bumi karena energinya tersebar pada permukaan yang luas dan sinar tersebut harus

menembus lapisan atmosfer yang lebih banyak ketika dibandingkan dengan sinar datang pada sudut yang tegak lurus.⁴

2.1.2 Neraca Energi Surya Ke Permukaan Bumi

Sifat alami matahari dibagi 2, yaitu *incoming short radiation* dan *outgoing long radiation*. *incoming short radiation* adalah radiasi matahari yang datang dalam gelombang pendek. *Albedo* berada dalam radiasi matahari gelombang pendek. *Albedo* merupakan besaran yang menyatakan adanya rasio perbandingan antara radiasi matahari yang sampai ke permukaan bumi dengan radiasi yang dipantulkan kembali ke luar angkasa.

Sinar matahari yang tersebar disebut radiasi difus, sedangkan sinar matahari yang dipantulkan dari tanah disebut radiasi albedo. Radiasi matahari setiap bulannya dapat diprediksi, jumlah total energi matahari yang diterima suatu lokasi dapat bervariasi dari musim ke musim, tetapi cukup konstan dari tahun ke tahun.



Gambar 2 1 Radiasi Matahari ke Permukaan Bumi⁹

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah suatu pembangkit listrik yang menggunakan sinar matahari melalui sel surya (*photovoltaic*) untuk

⁴ Iskandar, Rusiana Handoko. (2020). "Praktis Belajar Pembangkit Listrik Tenaga Surya". Yogyakarta : Deepublish. Hlm.32

⁹ <http://daedun.blogspot.com/2018/radiasi-matahari-radiasi-bumi- html>

mengkonversikan radiasi sinar foton matahari menjadi energi listrik. Sel surya merupakan lapisan-lapisan tipis dari bahan semikonduktor silikon (Si) murni, dan bahan semikonduktor lainnya. PLTS memanfaatkan cahaya matahari untuk menghasilkan listrik DC, yang dapat diubah menjadi listrik AC apabila diperlukan, oleh karena itu meskipun cuaca mendung, selama masih terdapat cahaya, maka PLTS tetap dapat menghasilkan listrik.

Salah satu sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid*. Suatu PLTS *off-grid* yang dikelola secara komunal atau yang sering disebut sistem PLTS berdiri sendiri (*stand-alone*), beroperasi secara independen tanpa terhubung dengan jaringan PLN. Sistem PLTS *off-grid* ini hanya mengandalkan energi matahari sebagai satu-satunya sumber energi utama dengan menggunakan rangkaian *photovoltaic module* untuk menghasilkan energi listrik sesuai kebutuhan. Sistem ini membutuhkan baterai untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan di siang hari untuk memenuhi kebutuhan listrik di malam hari.

Stand-alone PV system atau Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Terpusat (PLTS Terpusat) merupakan sistem pembangkit listrik alternatif untuk daerah-daerah terpencil/pedesaan yang tidak terjangkau oleh jaringan PLN.

2.2.1 Jenis – Jenis PLTS

Umumnya sistem PLTS dapat dibagi berdasarkan :

a. Mode Pengoperasian

- PLTS *On-Grid* (terhubung ke jaringan listrik)

Pembangkitan tenaga listrik yang energinya bersumber dari radiasi matahari melalui konversi sel fotovoltaik dimana sistem kelistrikannya terhubung ke jaringan listrik umum. Sistem ini pada umumnya tidak dilengkapi dengan baterai.

- PLTS *Off-Grid* (tidak terhubung ke jaringan listrik)

Pembangkitan tenaga listrik yang energinya bersumber dari radiasi matahari melalui konversi sel fotovoltaik dimana sistem kelistrikannya tidak terhubung ke jaringan listrik umum. Sistem ini pada umumnya

dilengkapi dengan baterai.

b. Posisi Pemasangan

- PLTS *Ground Mounted* (dipasang diatas permukaan tanah)
- PLTS *Rooftop* (dipasang diatas atap atau dapat terintegrasi dengan atap)
- PLTS Terapung

c. Desain sistem

- PLTS Terpusat

Sistem PLTS yang modul fotovoltaiiknya didesain secara terpusat (dalam satu area) dan memiliki sistem jaringan distribusi untuk menyalurkan daya listrik ke beban.

- PLTS Tersebar/Terdistribusi

Sistem PLTS yang modul fotovoltaiiknya didesain secara tersebar dan umumnya tidak memiliki sistem jaringan distribusi, sehingga setiap pelanggan memiliki sistem PLTS tersendiri.

Tabel 2.1 Jenis – jenis PLTS

	PLTS <i>Off-Grid</i>	PLTS <i>On-Grid</i>	PLTS <i>Hybrid</i>
Deskripsi	Sistem PLTS yang <i>output</i> daya listriknya secara mandiri menyuplai listrik ke jaringan distribusi pelanggan atau tidak terhubung dengan jaringan listrik PLN.	Bisa beroperasi tanpa baterai, karena <i>output</i> listriknya disalurkan ke jaringan distribusi yang telah disuplai pembangkit lainnya (misalnya Jaringan PLN).	Gabungan dari sistem PLTS dengan pembangkit yang lainnya (mis. PLTD (Pembangkit Listrik Tenaga Disel), PLTB (Pembangkit Listrik Tenaga Bayu)).

	PLTS <i>Off-Grid</i>	PLTS <i>On-Grid</i>	PLTS <i>Hybrid</i>
Baterai	Ya, supaya bisa memberikan suplai listrik sesuai kebutuhan beban.	Tidak	Bisa <i>off-grid</i> (pakai baterai) atau <i>on-grid</i> (tanpa baterai).
Manfaat	Untuk menjangkau daerah yang belum ada jaringan listrik PLN.	Untuk berbagi beban atau mengurangi beban pembangkit lain yang terhubung pada jaringan yang sama.	Memaksimalkan penyediaan energi dari berbagai potensi sumber daya daerah.

2.3 Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Komponen-komponen yang diperlukan untuk instalasi listrik tenaga surya, terdiri dari:

2.3.1 Panel Surya

Panel Surya adalah alat yang terdiri dari sel surya yang mengubah cahaya menjadi listrik. Mereka disebut surya atas matahari atau "sol" karena matahari merupakan sumber cahaya terkuat yang dapat dimanfaatkan. Panel surya sering kali disebut sel *photovoltaic*, *photovoltaic* dapat diartikan sebagai "cahaya-listrik". Sel surya atau sel PV bergantung pada efek *photovoltaic* untuk menyerap energi Matahari dan menyebabkan arus mengalir antara dua lapisan bermuatan yang berlawanan.



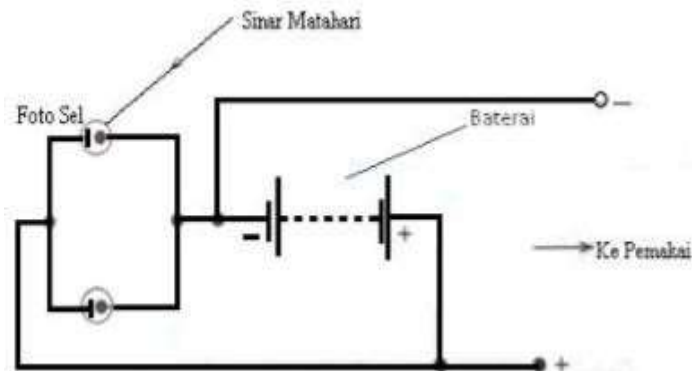
Gambar 2 2 Panel Surya¹⁰

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

Posisi ideal panel surya adalah menghadap langsung ke sinar matahari (untuk memastikan efisiensi maksimum). Panel surya modern memiliki perlindungan *overheating* yang baik dalam bentuk semen konduktif termal.

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

¹⁰ <https://jarwinn.com/products-category/jual-panel-surya-mono/>

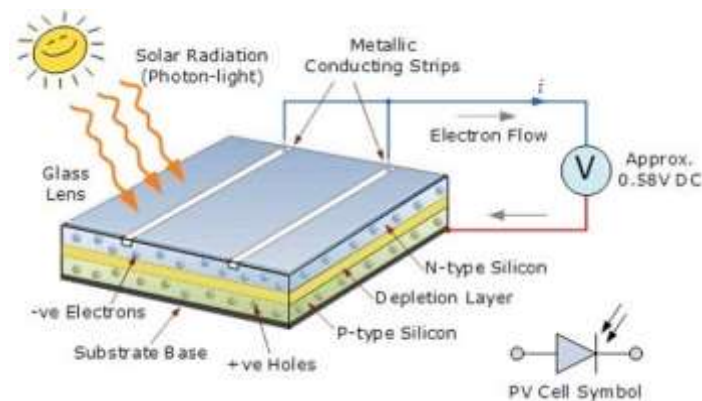


Gambar 2 3 Foto Sel dan Baterai Aki Sebagai Sumber Listrik¹¹

Pada umumnya prinsip kerja *silicon-monocrystalline* sama dengan jenis lain, yaitu cahaya matahari digambarkan sebagai partikel yang disebut “foton”. Saat sinar matahari menyinari sel fotovoltaik, foton bergerak masuk ke dalam sel. Ketika foton menabrak electron maka elektron akan meninggalkan lubang “hole” kosong. Elektron leluasa bergerak menuju lapisan sel atas, ketika foton terus bergerak memasuki sel, elektron terus menerus bergerak menuju ke atas hingga terlepas. Jika jalur listrik berada di luar sel (antara lapisan atas dan bagian bawah sel), maka electron mulai mengalir. Electron yang lepas tadi bergerak keluar bagian atas sel dan masuk kerangkaian listrik eksternal (beban). Electron dari bagian bawah sirkuit bergerak ke atas untuk mengisi lubang “hole” elektorn yang kosong. Sebagian besar sel menghasilkan tegangan sekitar 0,5 V, namun semakin banyak jumlah sel, maka semakin banyak pula arus yang dihasilkannya.⁴

¹¹ <https://www.kitapunya.net/pengertian-dan-fungsi-baterai-aki/>

⁴ Ibid, Hal. 66



Gambar 2 4 Cara Kerja Sel Fotovoltaik¹²

Sebagai sebuah komponen penghasil listrik panel surya memiliki karakteristik tertentu yang berdasarkan parameter terukur sebagai berikut :

- a) *Peak power* (W_p), menyatakan daya maksimum yang terjadi pada titik lutut (*knee point*) kurva I-V.
- b) *Peak voltage* (V_{mp}) menyatakan nilai tegangan pada titik lutut kurva I-V.
- c) *Open voltage* (V_{oc}), menyatakan nilai tegangan pada saat terminal positif dan negatif tidak ada beban atau terbuka.
- d) *Peak current* (I_{mp}), menyatakan besarnya arus yang mengalir pada titik lutut kurva I-V.
- e) *Short circuit current* (I_{sc}), menyatakan arus yang mengalir pada saat terminal positif dan negatif dihubungkan singkat.
- f) *Standard test conditions* (STC), member keterangan bahwa modul surya diuji dengan kondisi test tertentu, seperti iradiasi = $1000W/m^2$, temperatur $250^\circ C$.

Setiap unit modul surya dilengkapi dengan *junction box* permanen yang di dalamnya terdapat *bypass diode*, dimana fungsi dari *bypass diode* adalah apabila terjadi kerusakan pada salah satu modul surya, pengisian dari modul lain masih dapat berjalan. PLTS dibangun dari koneksi seri dan paralel dari modul fotovoltaik individual untuk mencapai tegangan dan arus yang dikehendaki. Pembangkit terdiri dari modul fotovoltaik individual yang terhubung secara seri (*string*) untuk menaikkan tegangan. Setelah tegangan keluaran yang dikehendaki

¹² <https://www.gesainstech.com/2021/04/cara-kerja-sel-surya.html>

tercapai, sambungan secara seri dari modul fotovoltaik individual dihubungkan secara paralel di dalam kotak penggabung (*combiner box*) untuk menaikkan arus. Keluaran daya yang dikehendaki adalah linear (sebanding) dengan jumlah panel. Oleh karena modul fotovoltaik memiliki keterbatasan tegangan, jumlah panel dan tegangan rangkaian terbuka tidak boleh melebihi tingkat tegangan dari panel individual.

Kualitas sebuah modul surya, antara lain dinilai berdasarkan efisiensinya untuk mengkonversi radiasi sinar matahari menjadi listrik DC. Modul surya yang efisiensinya lebih tinggi akan menghasilkan daya listrik yang lebih besar dibandingkan modul surya yang efisiensinya lebih rendah untuk luasan modul yang sama. Efisiensi modul surya, antara lain bergantung pada material sel fotovoltaik dan proses produksinya. Secara umum, sel fotovoltaik terbuat dari material jenis *crystalline* dan *non-crystalline* (film tipis). Untuk jenis *crystalline*, terbagi atas tipe *mono-crystalline* dan tipe *poly-crystalline*, dengan efisiensi konversi sekitar 12-20%. Berikut perbandingan antara *poly-crystalline* dan *mono-crystalline*.

Ketika iradiasi matahari meningkat hingga 1000 W/m^2 , maka modul surya akan membangkitkan listrik DC hingga kapasitas yang tertera pada “*nameplate*”nya (misal: 250 Wp). Namun demikian, *output* listrik sesungguhnya dari susunan panel bergantung pada kapasitas sistem, iradiasi matahari, orientasi arah (*azimuth*) dan sudut panel, dan berbagai faktor lainnya. Modul surya, yang merupakan komponen penting dalam suatu sistem PLTS, memiliki *output* listrik DC. Namun karena banyak beban listrik yang membutuhkan suplai listrik AC, maka listrik DC yang dihasilkan oleh modul surya harus dikonversi oleh inverter menjadi listrik AC.

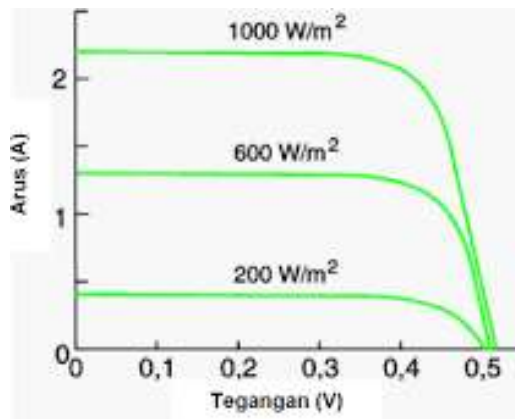
2.3.1.1 Karakteristik modul surya

Kinerja sel surya yang terbaik ditunjukkan oleh karakteristik arus tegangan. Oleh karena itu, penting untuk mengetahui tegangan *output* (V) dan arus keluaran (I) dan bagaimana mereka bervariasi untuk hubungan satu samalain. Daya (P) yang diproduksi oleh sel surya adalah produk dari tegangan (V) dan arus (I) untuk

karakteristik operasi tertentu.

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

Sebaliknya tegangan maksimum dihasilkan pada saat rangkaian tidak terhubung. Tegangan ini disebut sebagai tegangan terbuka (V_{oc}), pada kondisi tahanan R sangatlah besar dan tidak ada sama sekali arus yang mengalir karena rangkaian listrik tidak terhubung atau dengan kondisi terbuka. Besaran daya listrik dengan satuan Watt didapatkan dengan cara mengalikan tegangan dan arus listrik ($Watt = Volt \times Ampere$). Daya maksimum umumnya disebut dengan daya puncak dengan notasi mp , jadi arus listrik pada posisi maksimum dituliskan sebagai I_{mp} dan tegangan sebagai V_{mp} . Kurva arus-tegangan setiap produk modul surya haruslah dibuat pada kondisi standar intensitas cahaya matahari dan temperatur modul surya, dikarenakan keluaran daya dari modul surya ini sangatlah tergantung kepada intensitas cahaya matahari yang jatuh di permukaan modul surya akan semakin besar arus listrik yang dihasilkan, dengan kata lain intensitas cahaya matahari berbanding lurus dengan keluaran arus listrik, sedangkan temperatur modul surya akan berbanding terbalik dengan keluaran tegangan yang dihasilkan, jadi semakin besar temperatur modul surya, tegangannya akan semakin menurun. Standar kurva I-V suatu modul surya dibuat pada kondisi intensitas cahaya 1000 W/m^2 dan temperatur modul surya 25° C .



Gambar 2 5 Pengaruh tingkat radiasi pada I-V panel surya⁶

2.3.2 Solar Charger Controller



Gambar 2 6 Solar Charge Controller¹³

Controller atau sering dikenal dengan *charge controller* adalah perangkat elektronik yang digunakan dalam sistem PLTS untuk mengatur pengisian arus searah dari panel surya ke baterai dan mengatur penyaluran arus dari baterai ke peralatan listrik (beban). Alat ini juga mempunyai kemampuan untuk mendeteksi kapasitas baterai. Bila baterai sudah terisi penuh dengan cadangan energi listrik maka penyaluran energi listrik dari panel akan dapat diberhentikan secara otomatis. *Controller* mengatur *overcharging* dan kelebihan voltase dari panel surya / solar cell. Kelebihan voltase dan pengisian akan mengurangi umur baterai.

Cara alat ini mendeteksi adalah melalui monitor level tegangan baterai. *Charge Controller* menerapkan teknologi *pulse width modulation* (PWM) untuk

⁶ Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2017). "Panduan Perencanaan dan Pemanfaatan PLTS Atap di Indonesia". Jakarta.

¹³ <https://www.techtonics.in/12-24v-10a-intelligent-lcd-solar-controller>

mengatur fungsi pengisian baterai dan pembebasan arus dari baterai ke beban. Jadi tanpa *solar charge controller*, baterai akan rusak oleh *overcharging*, *overvoltage* dan *monitoring* temperatur baterai

2.3.2.1 Alat pengatur baterai PV array

Photovoltaic array adalah solar modul dihubungkan secara seri untuk mendapatkan tegangan dan paralel untuk mendapatkan arus di *Solar Charge Control*. Susunan solar modul akan membentuk suatu *array* modul, untuk meningkatkan tegangan dan keluaran arus pada baterai dengan total daya yang tersedia. Biasanya tegangan baterai bank 48 Volt atau 120 Volt DC. Maka sejumlah komponen lain yang diperlukan dengan baik akan melakukan, kontrol, mengkonversi, mendistribusikan, dan menyimpan energi yang diproduksi oleh *photovoltaic array* tersebut. Beberapa pengontrol *charge* mempunyai metering dan data *logging* kemampuan untuk menunjukkan (beban/ tugas) pengontrol adalah suatu pengatur tegangan elektronik, menggunakan di dalam parameter pengoperasian sistem *off-grid* dan sistem *grid-tie* dan status baterai *charge*. Beberapa mempunyai beban baterai rendah *disconnect* untuk mencegah *over discharge*.

2.3.3 Baterai



Gambar 2 7 Baterai¹⁴

Komponen yang berfungsi untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan dari penyerapan sinar matahari oleh panel surya adalah baterai. Energi listrik yang

¹⁴ <https://www.royalpv.com/produk/baterai-aki-kering-vrla-agm-kijo/>

disimpan di dalam baterai dapat berguna untuk menyediakan energi listrik saat cahaya matahari tidak terpancarkan secara maksimal seperti saat langit mendung atau hujan dan dimalam hari. Baterai yang digunakan untuk PLTS mengalami proses siklus pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*) tergantung pada ada atau tidak adanya sinar matahari. Selama ada sinar matahari maka panel surya akan menghasilkan energi listrik. Apabila energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya melebihi kebutuhan energi listrik maka kelebihan itu akan disimpan dalam baterai. Sebaliknya, saat kebutuhan energi listrik melebihi dari energi yang dihasilkan oleh panel surya maka cadangan energi dari baterai dapat diberikan untuk memenuhi kekurangan energi listrik.

Baterai terdiri dari 2 jenis, yaitu baterai primer dan baterai sekunder. Baterai primer merupakan baterai yang hanya dapat dipergunakan sekali pemakaian saja dan tidak dapat di isi ulang. Hal ini terjadi karena reaksi kimia material aktifnya tidak dapat dikembalikan. Sedangkan baterai sekunder dapat disii ulang, karena material aktifnya didalam dapat diputar Kembali. Kelebihan dari pada baterai sekunder adalah harganya lebih efisien untuk pengguna jangka panjang.

2.3.3.1 Konstruksi baterai (aki)

Ada 2 jenis aki yang ada di pasaran yaitu aki basah dan aki kering. Media penyimpanan aki basah untuk arus listrik merupakan jenis aki yang paling umum digunakan. Baterai jenis ini masih perlu diberi air baterai, yang dikenal sebagai baterai. Sedangkan baterai jenis kering adalah jenis baterai yang tidak menggunakan cairan, mirip seperti baterai ponsel. Baterai ini tahan terhadap getaran dan suhu rendah.

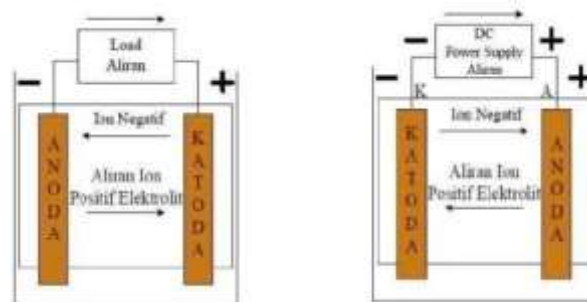
Pada baterai ini terdapat jenis elemen dan sel untuk menyimpan arus yang mengandung asam sulfat (H_2SO_4), setiap sel berisi pelat positif dan negatif. Pelat positif mengandung timbal berwarna coklat (PbO_2), sedangkan pelat negatif mengandung timbal (Pb). Pelat ditempatkan pada batang penghubung. Separator atau pemisah menjadi penyekat antar pelat, dibuat agar asam aki dapat dengan mudah bersirkulasi di sekitar pelat. Ketika ketiga unsur kimia ini berinteraksi, akan muncul arus listrik. Baterai memiliki 2 kutub / terminal, kutub positif dan

kutub negatif.

Biasanya kutub positif (+) lebih besar atau lebih tebal dari kutub negatif (-), untuk menghindari kelalaian jika baterai akan disambungkan ke kabel. Di dalam baterai terdapat level air minimum dan maksimum untuk setiap sel. Jika level baterai di bawah level minimum, akan merusak fungsi sel baterai. Jika air baterai melebihi batas maksimum, akan menyebabkan air baterai menjadi panas dan meluap melalui penutup sel.

2.3.3.2 Prinsip kerja baterai

1. Proses pengosongan sel berlangsung sesuai dengan gambar. Jika sel dihubungkan dengan suatu beban maka elektron mengalir dari anoda melalui beban melalui beban katoda, kemudian ion negatif mengalir ke anoda dan ion positif mengalir ke katoda.
2. Pada proses pengisian sesuai gambar dibawah ini, pada saat sel dihubungkan dengan catu daya maka elektroda positif menjadi anoda dan elektroda negatif menjadi katoda dan proses kimia yang terjadi adalah sebagai berikut :



Gambar 2 8 Pengisian baterai¹⁵

2.3.3.3 Cara-cara pengisian baterai

1. Pengisian awal

Pengisian awal adalah pembentukan sel baterai, cara ini hanya

¹⁵ <https://123dok.com>

dilakukan pada panel surya atau baterai *stationer* dan hanya dilakukan sekali saja.

2. Pengisian kembali

Pengisian kembali adalah pengisian otomatis setelah baterai mengalami pengosongan. Lamanya pengisian kembali akan disensor oleh relai sehingga apabila baterai sudah penuh maka dilanjutkan dengan pengisian arus konstan (*trickle*).

3. Pengisian khusus

Merupakan pengisian baterai *boost charge* dengan memulihkan baterai secara cepat setelah adanya pengosongan yang banyak, misalnya pada sistem operasi *charge* dan *discharge* yang belum mendapatkan catu PLN.

Pada beberapa kondisi kritis, seperti kondisi temperatur rendah digunakan baterai jenis *nickel-cadmium*, namun lebih mahal dari segi pembiayaannya. Pada umumnya baterai penyimpan energi listrik dibagi menjadi dua kategori utama yaitu *primary batteries* dan *secondary batteries*. *Primary batteries* dapat menyimpan dan mengirim energi listrik ke beban namun tidak dapat diisi kembali (*recharge*) seperti baterai tipe *carbon-zinc* dan *lithium*, jenis ini tidak digunakan pada PLTS. *Secondary batteries* dapat menyimpan dan mengirim energi listrik ke beban dan dapat juga diisi kembali (*recharge*) pada sistem PLTS.

2.3.4 Inverter



Gambar 2 9 Inverter¹⁶

¹⁶ <https://www.sanspower.com/inverter-pengertian-cara-kerja>

Inverter adalah komponen elektronika pendukung panel PV untuk mengubah arus searah (*direct current*, DC) menjadi arus bolak-balik (*alternating current*, AC) yang umumnya peralatan listrik butuhkan. Pemilihan inverter yang tepat untuk aplikasi tertentu tergantung pada kebutuhan beban dan juga kepada sistem itu sendiri; apakah sistem yang terhubung ke jaringan listrik (*grid connected*) atau sistem yang berdiri sendiri (*stand alone system*). Efisiensi inverter pada saat pengoperasian adalah sekitar 90%.

2.3.5 Reflektor

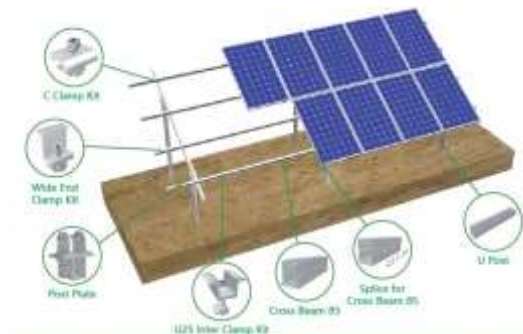


Gambar 2 10 reflektor¹⁷

Reflektor yang digunakan adalah cermin yang memiliki permukaan datar seperti garis lurus. Bayangan benda yang dibentuk dari cermin datar memiliki ukuran dimensi ukuran (panjang + lebar) yang sama dengan dimensi benda. Jarak yang dihasilkan antara benda dan cermin sama dengan jarak yang dihasilkan oleh cermin dan bayangan. Sifat bayangan cermin datar yang terbentuk tegak, maya dan sama besar.

¹⁷ <https://id.aliexpress.com/item/32802370924.html>

2.3.6 Struktur Penyangga



Gambar 2 11 Struktur Penyangga¹⁸

Penyangga modul fotovoltaik harus dipasang dengan benar serta kokoh yang akan memberikan dukungan sistem struktural dari deretan susunan modul fotovoltaik sesuai kebutuhan daya *wattpeaknya*. Pemasangan penyangga modul fotovoltaik untuk terhindar dari kerusakan hembusan angin dan diinduksi kilat serta bahaya cuaca potensial lainnya. Sebuah sistem penyangga modul fotovoltaik dapat dipergunakan untuk mengatur orientasi arah utara atau selatan dan elevasi sudut kemiringan dari sistem. Penyangga modul fotovoltaik untuk memaksimalkan kinerja energi dari modul fotovoltaik tersebut. Biasanya terbuat dari *stainless steel* atau aluminium. Sistem penyangga modul fotovoltaik dirancang untuk aplikasi pemasangan secara universal yaitu bingkai penyangga modul fotovoltaik miring yang dipasang diatas tanah atau atap bangunan gedung. Pemasangan penyangga modul fotovoltaik harus baik dan mudah dipasang. Penyangga modul fotovoltaik dibuat dari kualitas bahan bebas karat atau bahan dengan perlindungan terhadap korosi seperti baja galvanis penyangga modul fotovoltaik harus efektif melindungi kabel-kabel.

¹⁸ <https://bumienergisurya.com/tag/tiang-penyangga-panel-surya/>

2.3.7 Panel Penghubung



Gambar 2 12 Panel Penghubung¹⁹

Fungsi utama kotak penggabung atau (*combiner box*) adalah untuk menggabungkan string fotovoltaik modul agar mendapatkan arus keluaran larik fotovoltaik yang lebih tinggi. Masing-masing string modul *fotovoltaik* dihubungkan pada busbar yang sama dan dilindungi secara elektrik maupun mekanis di dalam selungkup pelindung (*enclosure*). Kotak penggabung umumnya berisi perangkat proteksi arus lebih (*overcurrent protection*), perangkat proteksi tegangan surja (*surgeprotection device*), busbar atau terminal tambahan, sakelar pemutus arus dan batang pembumian (*grounding bar*). Keluaran gabungan dari kotak penggabung tersebut kemudian dihubungkan langsung ke *solar charge controller* pada sistem *DC coupling* atau ke inverter jaringan pada sistem *AC coupling*.

Bagian-bagian yang ada di dalam panel penghubung :

1. Perangkat *proteksi string* modul fotovoltaik digunakan untuk melindungi individual string modul fotovoltaik terhadap arus berlebih. Untuk tujuan ini biasanya digunakan sekering atau MCB.
2. Busbar adalah titik sambungan untuk beberapa *string* modul fotovoltaik. Perangkat ini membawa beberapa *string* ke konduktor yang sama. Busbar DC terbuat dari konduktor tembaga padat dan berlapis timah untuk perlindungan terhadap korosi.

¹⁹ https://id.pngtree.com/freepng/cos-panel-box_6586879.html

3. Sakelar pemutus memungkinkan kotak penggabung terputus secara aman dari *solar charge controller* atau inverter jaringan saat pemeliharaan dilakukan.
4. Perangkat proteksi tegangan surya (*surge protection device*) digunakan sebagai pengaman terhadap tegangan surja akibat sambaran petir. Perangkat ini dihubungkan ke kutub positif bus DC, kutub negatif bus DC dan pembumian.
5. Selungkup pelindung (*enclosure*) merupakan rumah dari komponen listrik dengan fungsi untuk melindungi komponen dari paparan langsung terhadap lingkungan dan mencegah gangguan luar.
6. Batang pembumian (*grounding bar*) memberi sambungan pembumian untuk selungkup pelindung (jika kotak logam digunakan) dan untuk menyalurkan surja ke pembumian dengan menggunakan perangkat proteksi tegangan surja.

2.3.8 Kabel



Gambar 2 13 Kabel²⁰

Kabel merupakan komponen penghantar yang terisolasi yang berfungsi untuk menghubungkan antara komponen satu dengan yang lainnya pada sebuah rangkaian kelistrikan pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).

Kabel Listrik pada dasarnya merupakan sejumlah *wire* (kawat) terisolator yang diikat bersama dan membentuk jalur transmisi multikonduktor. Dalam pemilihan kabel listrik, sangat perlu memperhatikan beberapa faktor penting yaitu warna kabel listrik, label informasi dan aplikasinya. Informasi yang tercetak di

²⁰ <https://inet.detik.com/science/d-5948943/kabel-nyhy-pengertian-fungsi-dan-spesifikasi-yang-wajib-kamu-tahu>

kabel listrik merupakan informasi-informasi penting tentang kabel listrik yang bersangkutan sehingga konsumen dapat menyesuaikan kabel listrik tersebut dengan penggunaan konsumen.

2.3.9 Beban

Beban listrik adalah suatu komponen atau bagian listrik dari suatu rangkaian yang mengkonsumsi tenaga listrik, seperti peralatan listrik dan lampu di dalam rumah. Beberapa beban yang digunakan adalah :

2.3.9.1 Lampu

Lampu adalah sebuah benda yang berfungsi sebagai penerang, lampu memiliki bentuk seperti botol dengan rongga yang berisi kawat kecil yang akan menyala apabila disambungkan ke aliran listrik.

a. Lampu Pijar (*Incandescent lamp*)



Gambar 2 14 Lampu Pijar²¹

Jenis lampu ini menghasilkan cahaya dengan memanaskan kawat pijar tipis yang berada di pusat bagian dalam bohlam. Pemanasan dilakukan hingga mencapai temperatur yang membuatnya bercahaya. Alhasil, bohlam jenis ini menggunakan sebagian besar energinya untuk memproduksi panas, bukan cahaya. Oleh karena itu, kawat pijar lebih cepat terbakar dan rusak. Meskipun harga per satuannya terbilang murah, tapi tidak awet. Umumnya hanya

²¹ www.teknikelektronika.com

bertahan sampai delapan bulan. Bukan lampu yang tepat bila Anda ingin hemat energi dan biaya.

b. Lampu LED (*Light Emitting Diode*)



Gambar 2 15 Lampu LED²¹

Lampu jenis LED atau disebut juga sebagai Light Emitting Diode, adalah lampu listrik yang menghasilkan cahaya dari komponen yang bernama Dioda. Berbeda dari lampu bohlam yang masih menggunakan gas, jenis lampu ini memerlukan rangkaian elektronik supaya bisa menyala saat terhubung dengan aliran listrik.

2.3.9.2 Kipas Angin



Gambar 2 16 Kipas Angin²²

Kipas angin merupakan salah satu perangkat listrik yang berfungsi sebagai penggerak udara agar terciptanya pergerakan udara dalam ruangan. Prinsip kerja kipas angin sangat sederhana, yaitu mengalihkan udara disekitarnya agar

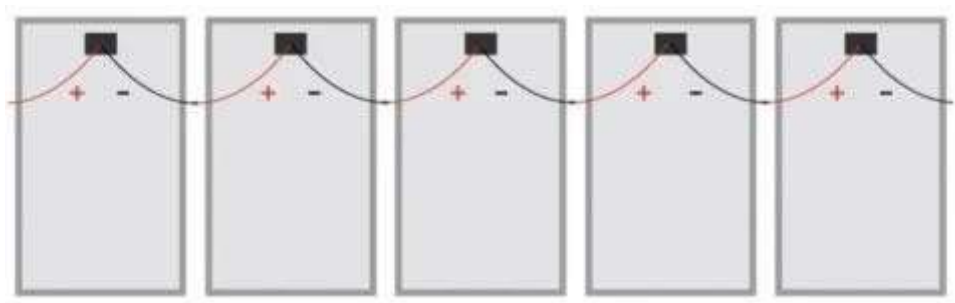
²¹ Ibid

²² <https://www.arashi.co.id/shop/kipas-angin/kipas-angin-multifungsi/>

terhembus ke suatu tempat / area. Besar daya konsumsi kipas angin tidak besar, rata – rata hanya 15 Watt – 60 Watt per jam. Nilai konsumsi daya yang tertera pada sebuah kipas diartikan untuk putaran kipas dalam kondisi maksimal.

2.4 Konfigurasi Panel Surya Seri

Suatu perhitungan tegangan dan arus operasi total bergantung pada konfigurasi modul surya yang dipasang secara seri, paralel, atau seri-paralel. Pada konfigurasi modul surya secara seri menghasilkan tegangan keluaran yang lebih besar dibandingkan konfigurasi modul surya yang dipasang secara paralel. Namun, arus listrik dari keseluruhan tegangan tetap sama.⁴



Gambar 2 17 Rangkaian Sel Surya Terhubung Seri²³

2.5 Keuntungan dan Kerugian PLTS

Keuntungan menggunakan PLTS di Indonesia adalah, sebagai berikut:

- a. Sumber energi tersedia sepanjang tahun dan gratis
- b. Bebas polusi udara
- c. Tidak bising
- d. Tidak memerlukan sistem transmisi yang rumit
- e. Tidak menyebabkan efek pemanasan global
- f. Dapat ditempatkan di daerah terpencil
- g. Umur pakainya anjang kurang lebih 20 tahun

⁴ Iskandar, Rusiana Handoko, “Praktis Belajar Pembangkit Listrik Tenaga Surya”. (Yogyakarta: Deepublish, 2020), hlm.98

²³ <https://pasangpanelsurya.com/rangkaian-seri-panel-surya/>

Kerugian menggunakan PLTS di Indonesia adalah, sebagai berikut:

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

2.6 Daya Ouput (Hukum Segitiga Daya)

Satuan dasar beda potensial adalah volt (V). karena satuan inilah beda potensial V sering disebut sebagai voltage atau tegangan. Daya listrik yang dihasilkan oleh sel surya merupakan hasil perkalian dari tegangan keluaran dengan banyaknya elektron yang mengalir atau besarnya arus, sedangkan nilai rata-rata daya yang dihasilkan selama titik pengujian.

$$V_{\text{rata-rata}} = \frac{V_1+V_2+V_3+V_n}{N} \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan :

Tegangan Ouput Rata – Rata (Volt)

V1 = Tegangan Ouput Rata – Rata Hari Ke-1

V2 = Tegangan Ouput Rata – Rata Hari Ke-2

V3 = Tegangan Ouput Rata – Rata Hari Ke-3

Vn = Tegangan Ouput Rata – Rata Ke-n

N = Jumlah Pengujian V1 – Vn

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{I_1+I_2+I_3+I_n}{N} \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan :

Arus Ouput Rata – Rata (Ampere)

I1 = Arus Ouput Rata – Rata Hari Ke-1

I2 = Arus Ouput Rata – Rata Hari Ke-2

I3 = Arus Ouput Rata – Rata Hari Ke-3

I_n = Arus Ouput Rata – Rata Ke-n

N = Jumlah Pengujian I_1 – I_n

$$\text{Prata – rata} = \frac{P_1+P_2+P_3+P_n}{N} \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan :

Daya Rata – Rata (Watt)

P_1 = Daya Pada Titik Pengujian Satu

P_2 = Daya Pada Titik Pengujian Dua

P_3 = Daya Pada Titik Pengujian Tiga

P_n = Daya Pada Titik Pengujian Ke-n

N = Jumlah Pengujian P_1 – P_n

$$P_{out} = V_{out}.I_{out} \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan :

P_{out} = Daya Keluaran (Watt)

V_{out} = Tegangan Keluaran (Volt)

I_{out} = Arus (Ampere)

$$\text{Intensitas Cahaya Rata – Rata} = \frac{L_1+L_2+L_3+L_n}{N} \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan :

Intensitas Cahaya Rata – Rata (Lux)

L_1 = Intensitas Cahaya Rata – Rata Hari Ke-1

L_2 = Intensitas Cahaya Rata – Rata Hari Ke-2

L_3 = Intensitas Cahaya Rata – Rata Hari Ke-3

L_n = Intensitas Cahaya Rata – Rata Hari Ke-n

N = Jumlah Pengujian L_1 – L_n

2.7 Pengaruh Lingkungan

Luaran energi sel surya yang dihasilkan dari PLTS dapat dipengaruhi oleh beberapa parameter lingkungan seperti suhu, iluminasi radiasi sinar matahari, dan

kelembapan baik pada pagi, siang, maupun sore hari. Luaran sel surya juga dapat dipengaruhi oleh letak posisi penempatan modul sel surya terhadap bumi. Parameter – parameter ini dapat mempengaruhi sukses tidaknya PLTS yang digunakan.

1. Temperatur dan Tegangan (*Environmental Conditions*)

Terang sama dengan banyak arus artinya kecerahan yang banyak dihasilkan menyebabkan electron terurai, yang berarti lebih banyak arus (A) pada saat cahaya terang meningkatkan *irradiance*.

Dingin sama dengan lebih banyak tegangan yang dihasilkan. Pada temperatur dingin di lingkungan sistem PLTS maka akan meningkatkan tegangan. Bahan semikonduktor silikon berfungsi lebih baik apabila berada pada temperatur udara dingin. Masalah dalam fotovoltaik akan timbul apabila temperature tinggi dari sinar matahari menyebabkan panas, sehingga produksi tegangan akan buruk dan berpengaruh pada performa produksi daya fotovoltaik yang menurun⁴

2. Angin

Peralatan pengonversi panas matahari, panel surya akan menghasilkan daya yang jauh lebih kecil apabila terkenan temperatur tinggi (panas). Misalnya sebuah panel surya dengan jenis sel surya *mono-crystalline* yang diuji temperatur tinggi, output daya turum mengalami penurunan 0,5% per °C. Dengan demikian kenaikan temperatur 5°C akan menyebabkan penurunan output daya 2,5%, Keitka dipasang di bawah sinar matahari, modul sel surya biasanya memiliki temperatur 20°C. Jika panel surya dipasang diatap rumah, temperatur dapat lebih tinggi dari 60°C, sehingga dapat mengurangi output modul hinggann 20% atau lebih dibawah nilai output kerjanya. Untuk alasan ini, sebaiknya dalam *rooftop* PLTS panel surya ditempatkan dengan aliran udara yang cukup untuk menjaga *output* tetap tinggi.

⁴ Iskandar, Rusiana Handoko. (2020). “*Praktis Belajar Pembangkit Listrik Tenaga Surya*”. Yogyakarta : Deepublish. hlm.89

2.8 Software MATLAB

MATLAB adalah kepanjangan dari *MATrix LABoratory*, merupakan bahasa pemrograman yang dikembangkan oleh *The Mathwork Inc.* yang hadir dengan fungsi dan karakteristik yang berbeda dengan bahasa pemrograman lain seperti *Delphi*, *Basic* maupun *Ct+*. MATLAB merupakan bahasa pemrograman level tinggi yang dikhususkan untuk kebutuhan komputasi teknis, visualisasi dan pemrograman, komputasi matematik, analisis data, pengembangan algoritma, simulasi dan pemodelan dan grafik-grafik perhitungan. Saat ini MATLAB memiliki ratusan fungsi yang dapat digunakan sebagai alat untuk menyelesaikan persamaan di bidang teknik mulai dari masalah yang sederhana sampai masalah-masalah yang kompleks dari berbagai disiplin ilmu. Dalam lingkungan perguruan tinggi khusus pada bidang sains dan teknik, MATLAB merupakan perangkat standar yang memperkenalkan untuk mengembangkan penyajian materi matematika, rekayasa dan keilmuan. Di industri, MATLAB merupakan perangkat pilihan untuk penelitian dengan produktivitas yang tinggi, pengembangan dan analisisnya.

Kegunaan MATLAB Secara umum adalah sebagai berikut.

1. Matematika dan komputasi,
2. Perkembangan algoritma,
3. Pemodelan, simulasi, dan pembuatan *prototype*
4. Analisis data, *eksplorasi* dan *visualisasi*
5. Pembuatan aplikasi, termasuk pembuatan antara muka secara grafis

2.8.1 Karakteristik MATLAB

Bahasa pemrogramannya didasarkan pada matriks (baris dan kolom).

1. Lambat (dibandingkan dengan *Fortran* atau *C*) karena bahasanya langsung eksekusi tanpa melalui proses kompilasi.
2. *Automatic memory management*, artinya kita tidak harus mendeklarasikan *arrays* terlebih dahulu.
3. Pemrogramannya tersusun secara sistematis.
4. Waktu pengembangannya lebih cepat dibandingkan dengan *Fortran* atau *C*.

5. Dapat diubah ke bahasa *C* lewat *MATLAB Compiler*.
 6. Tersedia banyak *toolbox* untuk aplikasi-aplikasi khusus
- Beberapa kelebihan *MATLAB* jika dibandingkan program lain adalah
1. Mudah dalam memanipulasi struktur matriks dan perhitungan berbagai operasimatriks yang meliputi penjumlahan, pengurangan, perkalian, invers dan fungsi matriks lainnya.
 2. Menyediakan fasilitas untuk memplot struktur gambar (kekuatan fasilitas grafik tiga dimensi yang sangat memadai).
 3. *Script* program yang dapat diubah sesuai dengan keinginan *user*
 4. Jumlah *routine-routine powerful* yang berlimpah yang terus berkembang
 5. Kemampuan *interface* (misal dengan bahasa *C*, word dan matematika)

Dilengkapi dengan *toolbox*, *Simulink*, *stateflow* dan sebagainya, serta mulai melimpahnya *source code* di internet yang dibuat dalam *MATLAB* (Contoh *toolbox* misalnya: *signal processing*, *control system*, *neural networks* dan sebagainya)

2.8.2 Lingkungan Kerja *MATLAB*

Secara umum lingkungan kerja *MATLAB* terdiri dari tiga bagian yang penting yaitu :

1. *Command Windows*

Windows ini muncul pertama kali ketika kita menjalankan program *MATLAB*. *Command windows* digunakan untuk menjalankan perintah-perintah *MATLAB*, memanggil *tool* *MATLAB* seperti editor, *fasilitas help*, model *Simulink*, dan lain- lain. Ciri dari *windows* ini adalah adanya *prompt* (tanda lebih besar) yang menyatakan *MATLAB* siap menerima perintah. Perintah tersebut dapat berupa fungsi-fungsi bawaan (*toolbox*) dari *MATLAB* itu sendiri.

2. *Editor Windows*

Untuk memulal sebuah perintah dari *MATLAB* anda harus masuk dalam menu seperti pada gambar di bawah ini dengan cara memilih *File* pilih dan pilih Edit pilih *Script* dan klik kiri selanjutnya tampil seperti pada gambar di bawah dan siap untuk menuliskan *script-script* yang diinginkan. *Windows* ini merupakan tool

yang disediakan oleh MATLAB yang berfungsi sebagai *editor script* MATLAB (listing perintah-perintah yang harus dilakukan oleh MATLAB). Ada dua cara untuk membuka *editor* ini, yaitu:

1. Klik : *file*, lalu *new* dan kemudian *M-file*
2. Ketik pada *command windows*; "edit" atau *Ctrl N*

Secara formal suatu *script* merupakan suatu *file eksternal* yang berisi ulisan perintah MATLAB. Tetapi *script* tersebut bukan merupakan suatu fungsi. Ketika anda menjalankan suatu *script*, perintah di dalamnya dieksekusi seperti ketika dimasukkan langsung pada MATLAB melalui *keyboard*. *M-file* selain dipakai sebagai penamaan *file* juga bisa dipakai untuk menamakan fungsi, sehingga fungsi fungsi yang kita buat di jendela *editor* bisa disimpan dengan *ekstensi.m* sama dengan file yang kita panggil di jendela *editor*. Saat kita menggunakan fungsi MATLAB seperti *inv*, *abs*, *cos*, *sin* dan *sqrt*, MATLAB menerima variabel berdasarkan variabel yang kita berikan. Saat kita menggunakan fungsi MATLAB Seperti *inv*, *abs*, *cos*, *sin* dan *sqrt*, MATLAB menerima variabel berdasarkan variabel yang kita berikan. Fungsi *M-file* mirip dengan *script file* di mana keduanya merupakan *file* teks dengan *ekstensi.m*. Sebagaimana *script M-file*, fungsi *m-file* tidak dimasukkan dalam jendela *command window* tetapi *file* tersendiri yang dibuat dengan *window editor teks*.

3. *Figure Windows*

Windows ini merupakan hasil visualisasi dari *script* MATLAB. MATLAB memberikan kemudahan bagi *programmer* untuk mengedit *windows* ini sekaligus memberikan program khusus untuk itu, sehingga selain berfungsi sebagai *visualisasi output* yang berupa grafik juga sekaligus menjadi media *input* yang interaktif.