

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Penelitian Terkait

Referensi yang terkait dengan “Analisis Teknis dan Ekonomis Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Dengan Sistem *On-Grid* menggunakan *Software* PVsyst (Studi Kasus Gedung Fakultas Sains dan Teknologi UIN Suska Riau)” adalah dapat dilihat dari beberapa penelitian berikut:

“Radiasi Surya merupakan energi terbarukan yang ramah lingkungan dan memiliki potensi untuk menjawab masalah kebutuhan energi saat ini. Namun sayangnya untuk wilayah Indonesia yang cukup luas ini masih sangat minim ketersediaan data radiasi surya. Oleh karena itu dibutuhkan metode untuk mengestimasi nilai radiasi surya. Pada penelitian ini digunakan model Reference Evaluation of Solar Transmittance, 2 Bands (REST 2). Penelitian untuk memvalidasi model REST 2 telah dilakukan di Colorado, Hawaii, Saudi Arabia, Spanyol, India, dan beberapa wilayah lain, namun belum dilakukan di wilayah Indonesia. Untuk wilayah Indonesia daerah kajian diwakili oleh wilayah Semarang, Jawa Tengah. Setelah estimasi nilai radiasi surya diperoleh selanjutnya akan diverifikasi menggunakan data hasil pengukuran langsung. Penelitian untuk wilayah Semarang menghasilkan nilai RMSE untuk model REST 2 sebesar 6.53, kondisi langit cerah di wilayah Indonesia. [6]

“Studi Pemanfaatan Energi Matahari di Pulau Panjang sebagai Pembangkit Listrik Alternatif”. Penelitian ini membandingkan kelebihan yang didapatkan pada pemangkit hibrida ketika mengalihkan pemasok suplai daya listrik dari PLTD ke PLTS, diperoleh nilai kontribusi daya optimal PLTS sebesar 6% dan PLTD 33% dalam aspek ekonomis, biaya energy/kWh yang dibutuhkan PLTH setelah lima tahun akan lebih murah dari PLTD dengan BPP sebesar \$0,64/kWh dan dari aspek lingkungan pengembangan PLTS membuat emisi karbon menurun 85,93% dari kondisi operasi diesel 24 jam. [7]

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

“Analisa Teknik dan Ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Tersambung dengan Jaringan PLN pada Perumahan Kelas Menengah di Kota Pekanbaru”. Penelitian ini melakukan analisa perancangan teknis dan ekonomi PLTS *on-grid* dengan system yang dipasang di atap rumah (*roof-top*) pada perumahan kelas menengah. Terdapat 2 variasi daya meteran yaitu 2.200 Watt dan 1.300 Watt. Pada kapasitas daya meteran 2.200 Watt dengan beban harian rata-rata sebesar 13,03 kWh menghasilkan hasil perancangan system PLTS sebesar 3 kWp yang membutuhkan 10 modul sura dengan kapasitas masing-masing modul sebesar 300 Wp dan total biaya investasi sebesar Rp. 128.720.520. Sedangkan pada daya meteran 1.300 Watt dengan beban harian rata-rata sebesar 8,167 kWh membutuhkan 6 buah modul surya dengan total kapasitas system PLTS sebesar 1.8 kWp dan total biaya investasi sebesar Rp 78.056.940. Umur pemakaian system PLTS dirancang selama 20 tahun dan didapatkan hasil kembali modal pada tahun ke-8 dengan system *net-metering*. Untuk mengetahui respon masyarakat tentang system PLTS *on-grid* dilakukan wawancara dan didapatkan pengetahuan masyarakat tentang system PLTS sebesar 36%, kemauan 65% dan kemampuan 12,5%. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, system PLTS *on-grid* layak untuk dibangun, namun perlu dilakukannya sosialisasi kepada masyarakat agar mengerti tentang system PLTS *on-grid* pada perumahan. [8]

“Analisis Keekonomian Kompleks Perumahan Berbasis Energi Sel Surya (Studi Kasus : Perumahan Cyber Orchid Houses, Depok)”. Penelitian ini melakukan teknis penggunaan panel sel surya sebagai sumber energi listrik dan tingkat kelayakan untuk di implementasikan diperumahan tipe menengah. Ada dua jenis system PLTS yang ditinjau dalam penelitian ini yaitu system PLTS menggunakan baterai dan tanpa baterai. Hasil penelitian menunjukkan untuk saat ini pengguna PLTS diperumahan untuk memenuhi kebutuhan listriknya tidak menguntungkan secara ekonomis. Hal ini karena tingginya biaya investasi system PLTS dibandingkan dengan biaya listrik yang dibeli dari sumber konvensional. Namun analisis sensitivitas yang dilakukan menunjukkan system PLTS menjadi layak pada beberapa kondisi. [9]

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

“Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terpadu menggunakan *Software* PVsyst pada kompleks perumahan di Banda Aceh”. Penelitian ini melakukan perencanaan perancangan PLTS menggunakan data rata-rata penyinaran matahari dari BMG 2009-2010 yakni lamanya penyinaran matahari dalam satu hari diperkirakan 8 jam, sehingga besarnya insolasi matahari dapat dihitung dengan mengalihkan persentase penyinaran dengan lamanya penyinaran matahari menggunakan PVsyst sebagai simulasi perancangan PLTS. [10]

Dengan adanya penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dapat menjadi penunjang dan membantu penelitian yang akan dilakukan di Gedung Fakultas Sains dan Teknologi UIN Suska Riau dengan memanfaatkan energi matahari sebagai energi alternatifnya. Dalam penelitian ini penulis lebih unggul dalam penulisan karena membuat analisis teknis menggunakan PVsyst dan menganalisa ekonomi.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan pembangkit listrik yang memperoleh sumber daya dari radiasi sinar matahari melalui sel surya (*photovoltaic*) untuk mengkonversikan radiasi sinar foton matahari menjadi energi listrik. [11]

Sumber energi yang ramah lingkungan dan sangat menjanjikan pada masa yang akan datang, karena tidak ada polusi yang dihasilkan selama proses konversi energi, dan lagi sumber energinya banyak tersedia di alam, yaitu sinar matahari, terlebih di negeri tropis semacam Indonesia yang menerima sinar matahari sepanjang tahun. [12]

Berdasarkan aplikasi dan konfigurasi, secara garis besar PLTS diklarifikasi menjadi dua, yaitu Sistem PLTS yang tidak terhubung dengan jaringan (*off-grid PV plant*) atau PLTS berdiri sendiri (*stand-alone*) dan sistem PLTS terhubung dengan jaringan (*grid-connected PV plant*) atau PLTS *On-grid*. Sedangkan PLTS yang digabung dengan jenis pembangkit listrik lain disebut sistem hybrid

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. Sistem PLTS terpusat disebut juga *Stand Alone PV System* yaitu sistem pembangkit yang hanya

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

mengandalkan energi matahari sebagai satu-satunya sumber energi utama dengan menggunakan rangkaian *photovoltaic module* untuk menghasilkan energi listrik sesuai kebutuhan..

Prinsip kerja PLTS sistem terpusat dapat diuraikan sebagai berikut:

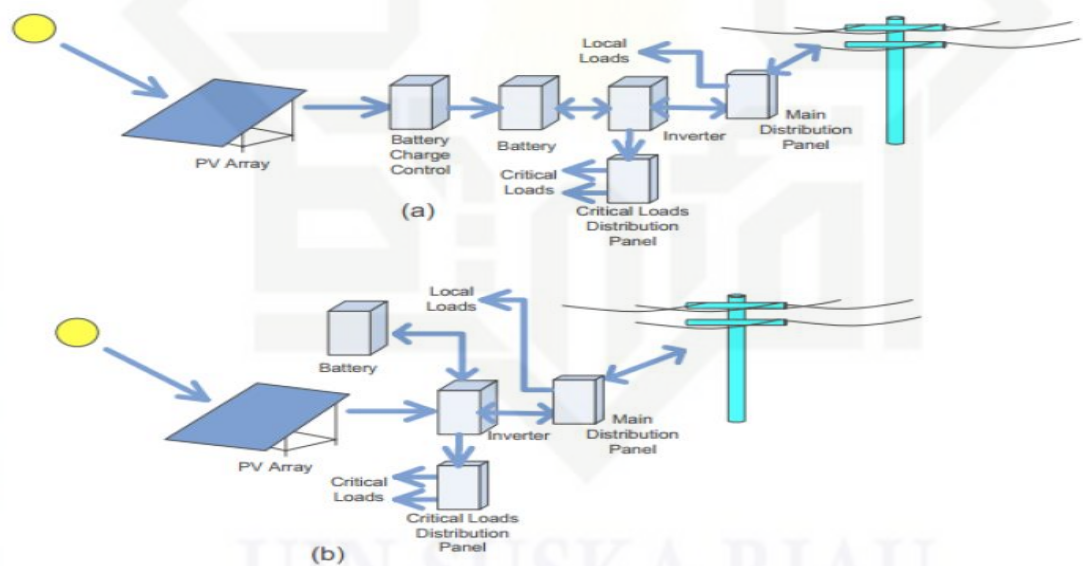
1. Sumber energi listrik yang dihasilkan oleh modul surya (PV) pada siang hari akan disimpan dalam baterai. Proses pengisian energi listrik dari PV ke baterai diatur oleh *Solar Charge Controller* agar tidak terjadi *over charge*. Besar energi yang dihasilkan oleh PV sangat tergantung kepada intensitas penyinaran matahari yang diterima oleh PV dan efisiensi cell. Intensitas matahari maksimum mencapai 1000 W/m^2 , dengan efisiensi cell 14% maka daya yang dapat dihasilkan oleh PV adalah sebesar 140 W/m^2 .
2. Selanjutnya energi yang tersimpan dalam baterai digunakan untuk menyuplai beban melalui inverter saat dibutuhkan. Inverter mengubah tegangan DC pada sisi baterai menjadi tegangan AC pada sisi beban

Grid Connected PV System atau PLTS terinterkoneksi merupakan solusi *Green Energi* bagi penduduk perkotaan baik perumahan ataupun perkantoran atau area perkampusan. Sistem ini menggunakan modul surya untuk menghasilkan listrik yang ramah lingkungan. Dengan adanya sistem ini akan mengurangi tagihan listrik pada bangunan yang menggunakan panel surya. Sistem ini akan tetap menggunakan listrik yang mana akan meminimalisirkan pemakaian listrik dari PLN.

Berdasarkan pola operasi sistem tenaga listrik ini dibagi menjadi dua yaitu, sistem dengan penyimpanan (*storage*) atau disebut *Grid-connected PV with a battery back up*, menggunakan baterai sebagai cadangan dan penyimpanan tenaga listrik dan tanpa baterai atau disebut *Grid-connected PV without a battery back up*. Baterai pada PLTS *On-grid* berfungsi sebagai suplai tenaga listrik untuk beban listrik apabila jaringan mengalami kegagalan untuk periode tertentu dan sebagai suplai tenaga listrik ke jaringan listrik negara (PLN) apabila ada kelebihan daya listrik (*exces power*) yang dibangkitkan PLTS. Berdasarkan aplikasinya sistem ini dibagi menjadi dua yaitu, *Grid-connected distributed PV* dan *Grid-connected centralized PV*.

Prinsip kerja PLTS sistem *on-grid* dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Pada siang hari, modul surya yang terpasang akan mengkonversi sinar matahari menjadi energi listrik arus searah (DC). Selanjutnya sebuah komponen yang disebut *grid inverter* merubah listrik arus DC tersebut dari PV menjadi listrik arus bolak-balik (AC) yang kemudian dapat digunakan untuk mensuplai berbagai peralatan rumah tangga. Jadi pada siang hari, kebutuhan energi listrik berbagai peralatan disuplai langsung oleh modul surya. Jika pada kondisi ini terdapat kelebihan energi dari PV maka kelebihan energi ini dapat dijual ke PLN sesuai kebijakan.
2. Pada malam hari atau jika kondisi cuaca mendung maka peralatan akan disuplai oleh jaringan PLN. Hal ini dimungkinkan karena sistem ini tetap terkoneksi dengan jaringan PLN.



Gambar 2.1 Sistem PLTS *grid-connected* Dengan Penyimpanan (*Storage*) (a) *Charge Control* dan *Inverter Charge Control* Terpisah, dan (b) *Charge Control* Terintegrasi
 (Sumber ABB 2010)

Selain itu sistem PLTS *on-grid* ini dapat menggunakan baterai sebagai cadangan atau backup energi. Sistem ini disebut sebagai *grid connected PV system with battery backup*. Sistem ini berfungsi sebagai backup energi listrik untuk menjaga

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

kontinuitas operasional peralatan-peralatan elektronik. Jika suatu saat terjadi kegagalan pada suplai listrik PLN (pemadaman listrik) maka peralatan-peralatan elektronik dapat beroperasi secara normal dalam jangka waktu tertentu tanpa adanya gangguan.

Secara umum sistem *On-Grid PV* yang diinstal di fasilitas komersial atau publik terdiri dari 2 jenis sistem yaitu :

1. *On-Grid* sistem AC tanpa cadangan baterai.
2. *On-Grid* sistem AC dengan cadangan baterai.

Dengan baterai back-up memiliki keunggulan dalam pemenuhan kebutuhan listrik. Namun, menambahkan baterai ke sistem dilengkapi dengan beberapa kelemahan yang harus di pertimbangkan terhadap keuntungannya. Kerugian ini antara lain:

1. Batrai mengkonsumsi energi selama pengisian dan pemakaian, mengurangi
2. Efisiensi dan output dari sistem PV sekitar 10 persen untuk baterai timbal-asam.
3. Baterai meningkatkan kompleksitas sistem. Kedua biaya pertama dan instalasi
4. Biaya meningkat.
5. Kebanyakan baterai biaya yang lebih rendah membutuhkan perawatan.
6. Baterai biasanya akan perlu diganti sebelum bagian lain dari sistem dan di biaya yang cukup besa

2.3 Komponen PLTS

2.3.1 Sel Surya (*Photovoltaic*)

Sel surya (*Photovoltaic*) adalah teknologi yang berfungsi untuk mengubah atau mengkonversi radiasi matahari menjadi energi listrik secara langsung. PV biasanya dikemas dalam sebuah unit yang disebut modul. Dalam sebuah modul surya terdiri dari banyak sel surya yang bisa disusun secara seri maupun paralel. Sedangkan yang dimaksud dengan surya adalah sebuah elemen semikonduktor yang

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

dapat mengkonversi energi surya menjadi energi listrik atas dasar efek *photovoltaic*. [11].

Sel surya terdiri dari sambungan bahan semikonduktor bertipe p dan n (p-n junction semiconductor) yang jika terkena sinar matahari maka akan terjadi aliran elektron, aliran elektron inilah yang disebut sebagai aliran arus listrik. [12].

Semi-konduktor jenis n merupakan semi-konduktor yang memiliki kelebihan electron sehingga kelebihan muatan negatif (n= negatif), sedangkan semi-konduktor jenis p memiliki kelebihan hole sehingga kelebihan muatan positif (p= positif). [7].

Dalam penggunaannya, sel-sel surya dihubungkan satu sama lain, sejajar dan atau dalam seri, tergantung dari apa yang diperlukan, untuk menghasilkan daya dengan kombinasi tegangan dan arus yang dikehendaki. Untuk daya yang besar, pada dasarnya berlandaskan intensitas energi yang terkandung dalam sel surya yang rendah pada saat mencapai permukaan bumi, yang berjumlah sekitar 100 watt per m². Daya guna konversi energi radiasi surya menjadi energi listrik berdasarkan efek fotovoltaik pada saat ini sudah mencapai lebih kurang 25%. Dengan demikian maka produksi daya listrik yang maksimal dapat dihasilkan oleh sel surya berjumlah 250 watt per m².

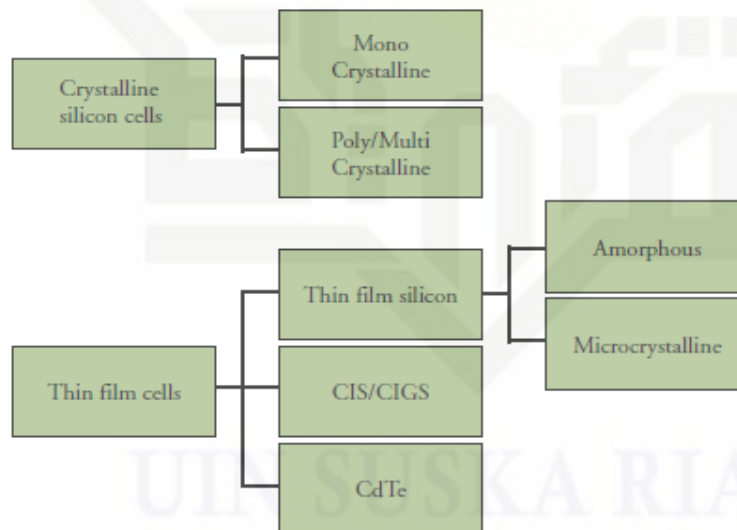
Untuk memperoleh daya sebesar 1000 watt atau 1kW, diperlukan luas sebanyak 4 m². Untuk 10000 kW, atau 1 MW, diperlukan 4000 m². Belum terhitung keperluan tanah bagi alat-alat pembantu dan lain sebagainya. Satu ha (10.000 m²) akan dapat menghasilkan 2,5 MW. Untuk mendapatkan 100MW, diperlukan 40 Ha, sedangkan 1000 MW(1GW) akan memakai tanah seluas 400 ha.

Terdapat berbagai jenis sel PV yang saat ini dapat digunakan misalnya, sel *monocrystalline*, *polycrystallin*, *multi junction*, *polimer*, dan sebagainya. Setiap jenis memiliki keuntungan dan kerugiannya masing-masing. Salah satu variabel utama dalam menentukan efektivitas dari sel surya adalah efisiensi dari sel surya dalam mengkonversi energi matahari. Semakin tinggi sfisiensinya, maka semakin tinggi energi listrik yang dihasilkan per satuan luas. Hal ini akan mengurangi luasan pembangkit listrik tenaga surya sehingga akan mengurangi biaya lahan. Nilai tertinggi

dari efisiensi sel surya adalah efisiensi sebesar 44% yang menggunakan sel tipe *multi junction*. [14].

Pada *Multi junction cell*, terdiri dari PV dengan bahan semikonduktor bertumpuk yang mana setiap bahan semikonduktor sensitif terhadap panjang gelombang tertentu, yang terbaik dapat menyerap energi dari gelombang UV hingga infra merah. Juga terdapat berbagai jenis PV baru yang sedang dalam taraf pengembangan, misalnya PV dari bahan polimer, atau PV dengan bahan *dye*.

Sel surya salah satunya terbuat dari teknologi irisan silikon (*silikon wafers*), pembuatannya dengan cara memotong/mengiris tipis silikon dari balok batang silikon. Sel surya juga bisa terbuat dari teknologi film tipis biasa disebut *thin film technologies*, dimana lapisan tipis dari bahan semikonduktor diendapkan pada *low-cost substrates*. Sel surya selanjutnya digolongkan sesuai dengan batasan struktur dari bahan semikonduktornya seperti, *mono-crystalline*, *multi-crystalline (poly-crystalline)* atau *amorphous material*



Gambar 2.2 Kelas Teknologi Sel Surya
 (Sumber Setiawan 2014)

1. Crystalline Silikon (c-Si)

Teknologi pertama yang berhasil dikembangkan oleh para peneliti adalah teknologi yang menggunakan bahan silikon kristal tunggal atau Crystalline Silikon (c-Si). Teknologi ini mampu menghasilkan sel surya dengan efisiensi yang sangat tinggi.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Teknologi *crystalline silikon* (c-Si) dibagi menjadi dua yaitu *monocrystalline* dan *multi-crystalline (poly-crystalline)* [11].

a. Monocrystalline

Sel *monocrystalline* biasanya terbuat dari batang silikon tunggal berbentuk silinder, yang kemudian diiris tipis menjadi bentuk *wafers* dengan ketebalan sekitar 200-250 μm , dan pada permukaan atasnya dibuat alur-alur mikro (*microgrooves*) yang bertujuan untuk meminimalkan rugi-rugi refleksi atau pantulan. Keunggulan utama dari jenis ini yaitu efisiensinya yang lebih baik (14-17%), serta lebih tahan lama (efektif hingga 20 tahun lebih penggunaan).



Gambar 2.3 Modul *Monocrystalline* Silikon
(Sumber ABB 2010)

b. Polycrystalline

Polycrystalline terbuat dari batang silikon yang dihasilkan dengan cara dilelehkan dan dicetak oleh pipa paralel, lalu *wafers* sel surya ini biasanya berbentuk persegi dengan ketebalan 180-300 μm . *Polycrystalline* dibuat dengan tujuan untuk menurunkan harga produksi, sehingga memperoleh sel surya dengan harga yang lebih murah, namun tingkat efisiensi sel surya ini tidak lebih baik dari *polycrystalline* yaitu sebesar 12-14%.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2.4 Modul *Polycrystalline* Silikon
(Sumber ABB 2010)

2. Lapisan tipis (*Thin Film*)

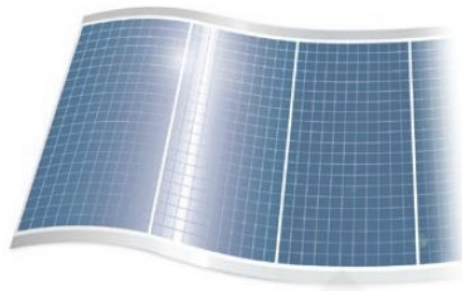
Teknologi kedua adalah sel surya yang dibuat dengan teknologi lapisan tipis (*thin film*). Teknologi pembuatan sel surya dengan lapisan tipis ini dimaksudkan untuk mengurangi biaya pembuatan solar sel mengingat teknologi ini hanya menggunakan kurang dari 1% dari bahan baku silikon jika dibandingkan dengan bahan baku untuk tipe *silikon wafer*. Metode yang paling sering dipakai dalam pembuatan silikon jenis lapisan tipis ini adalah dengan *plasma-enhanced chemical vapor deposition* (PEVCD) dari gas silane dan hidrogen. Lapisan yang dibuat dengan metode ini menghasilkan silikon yang tidak memiliki arah orientasi kristal atau yang dikenal sebagai *amorphous silikon* (non kristal).

Selain menggunakan material dari silikon, sel surya lapisan tipis juga dibuat dari bahan semikonduktor lainnya yang memiliki efisiensi solar sel tinggi seperti *Cadmium Telluride* (Cd Te) *Amorphous Silikon* (a-Si), *Cadmium Sulfide* (CdS), *Gallium Arsenide* (GaAs), *CopperIndium* 19.

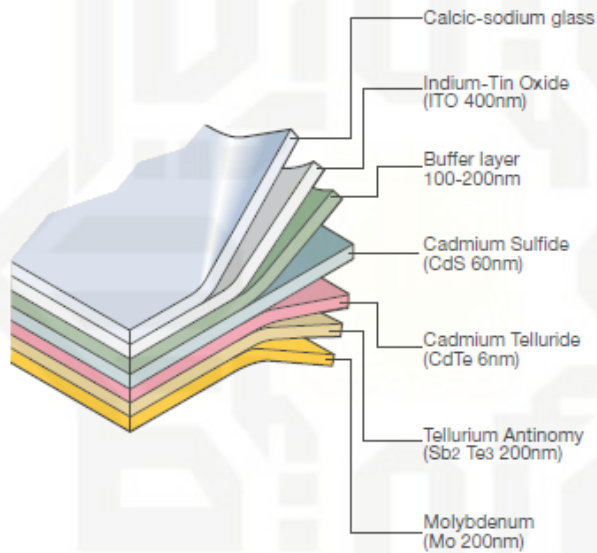
Selenide (CIS), dan *Copper Indium Gallium Selenide* (CIGS). Efisiensi tertinggi saat ini yang bisa dihasilkan oleh jenis solar sel lapisan tipis ini adalah sebesar 19,5% yang berasal dari solar sel CIGS. Keunggulan lainnya dengan menggunakan tipe lapisan tipis adalah semikonduktor sebagai lapisan solar sel bisa dideposisi pada substrat yang lentur sehingga menghasilkan device solar sel yang fleksibel (Putra, 2015).

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2.5 Modul Surya Jenis *Thin Film*
(Sumber ABB 2010)



Gambar 2.6 Struktur *Thin Film* Dengan Bahan CdTe-CdS
(Sumber ABB 2010)

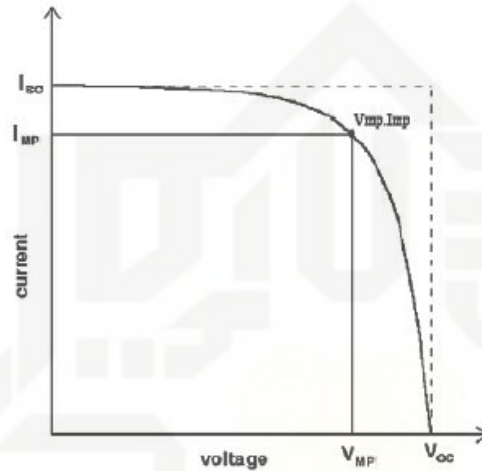
Sel surya menerima penyinaran matahari dalam satu hari sangat bervariasi. Hal ini dikarenakan sinar matahari memiliki intensitas yang besar ketika siang hari dibandingkan dengan pagi hari. Untuk mengetahui kapasitas daya yang dihasilkan, dilakukanlah pengukuran terhadap arus (I) dan tegangan (V) pada gususan sel surya yang disebut modul. [15]

Untuk mengukur arus maksimum, maka kedua terminal dari modul dibuat rangkaian hubung singkat sehingga tegangannya menjadi nol dan arusnya maksimum. Dengan menggunakan amper meter akan didapatkan sebuah arus maksimum yang dinamakan *short circuit current* (I_{sc}). Pengukuran terhadap

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

tegangan (V) dilakukan pada terminal positif dan negatif dari modul sel surya dengan tidak menghubungkan sel surya dengan komponen lainnya. Pengukuran ini dinamakan *open circuit voltage* (V_{oc}). Hasil pengukuran arus (I) dan tegangan (V) ini dapat digambarkan dalam sebuah grafik yang disebut kurva I-V seperti yang ditunjukkan pada grafik 2.1.

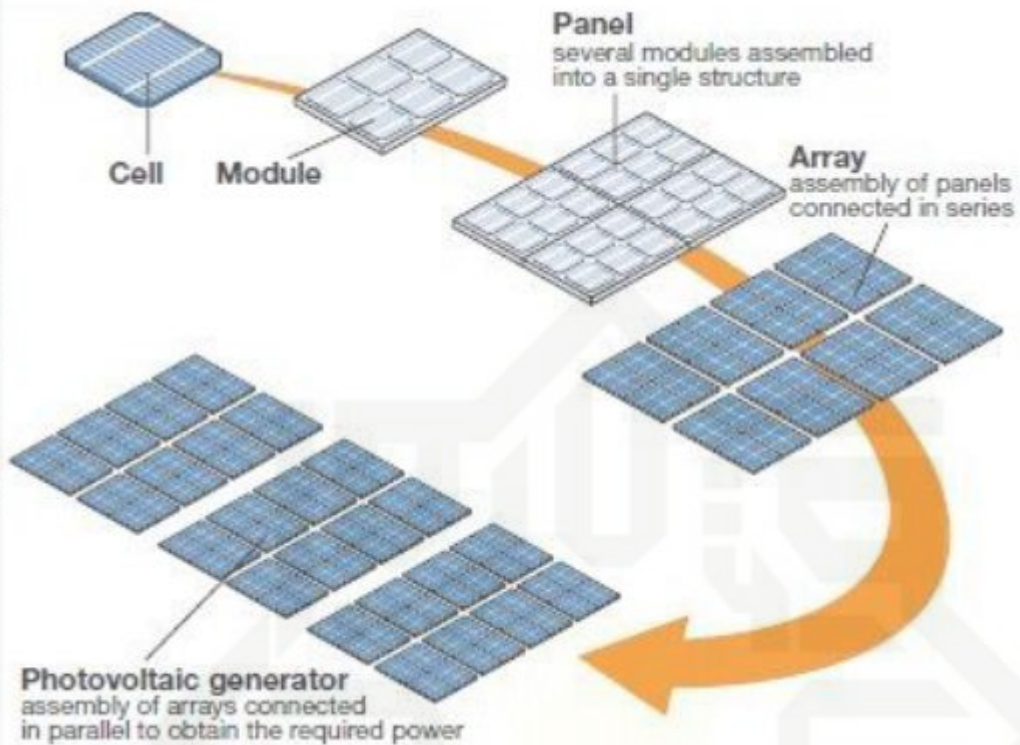


Gambar 2.7 Grafik Kurva I-V Pada Modul Sel Surya

Pada kurva I-V terdapat hal-hal yang sangat penting yaitu *Maximum Power Point* (V_{mp} dan I_{mp}), *Open Circuit Voltage* (V_{oc}) dan *Short Circuit Current* (I_{sc}). Pada kurva I-V, adalah titik operasi yang menunjukkan daya maksimum yang dihasilkan oleh panel sel surya. *Open Circuit Voltage* (V_{oc}) yaitu kapasitas tegangan maksimum yang dapat dicapai pada saat tidak adanya arus. [16]

2.3.2 Modul Surya

Modul surya atau *Photovoltaic Module* merupakan komponen PLTS yang tersusun dari beberapa sel surya yang dirangkai sedemikian rupa, baik dirangkai seri maupun paralel dengan maksud dapat menghasilkan daya listrik tertentu dan disusun pada satu bingkai (*frame*) dan dilaminasi atau diberikan lapisan pelindung. Kemudian susunan dari beberapa modul surya yang terpasang sedemikian rupa pada penyangga disebut *array*. PV modul yang terangkai seri dari sel-sel surya ditujukan untuk meningkatkan, atau dalam hal ini dapat dikatakan menggabungkan tegangan (VDC) yang dihasilkan setiap selnya. Sedangkan untuk arusnya dapat didesain sesuai kebutuhan dengan memperhatikan luas permukaan sel. [11]



Gambar 2.8 Diagram Hubungan Antara *Solar Cell*, *Modul*, *Panel* dan *Array* (Sumber ABB 2010)

Faktor utama yang mempengaruhi modul surya pada suatu PLTS dalam proses produksi energi listrik, adalah sebagai berikut:

a. Iradiasi (Besarnya Intensitas Sinar Matahari) Pada Modul Surya

Pengaruh iradiasi terhadap produksi energi listrik pada panel surya dapat dilihat pada gambar di bawah, yang memperlihatkan fungsi peristiwa iradiasi terhadap kurva karakteristik tegangan (V) dan arus (I) [11].

Ketika iradiasi menurun, arus yang dihasilkan oleh modul surya akan menurun dengan proporsional, sedangkan variasi dari tegangan tanpa beban sangatlah kecil. Sebagai suatu kenyataan, efisiensi dari konversi pada modul surya tidak terpengaruh oleh iradiasi yang bervariasi asalkan masih dalam batas standar operasi dari modul surya, yang berarti bahwa efisiensi konversi adalah sama untuk keduanya, dalam kondisi cerah begitu juga kondisi mendung, oleh karena itu kecilnya energi listrik yang dihasilkan modul surya saat langit dalam kondisi mendung dapat

dijadikan acuan bukannya penurunan efisiensi melainkan penurunan produksi arus listrik karena iradiasi matahari yang rendah. Dalam buku *GSES* untuk perhitungan perancangan sesuai dengan rumus berikut :

$$\text{Kebutuhan Daya} = \frac{\text{Beban}}{\text{Efisiensi Inverter}} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\text{Output PV} = \text{Kapasitas Modul} \times \text{Efisiensi Modul} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\text{Total Daya} = \text{Efisiensi PV} \times \text{Radiasi Matahari} \dots\dots\dots (2.3)$$

b. Jumlah Array (n)

Perancangan sistem PLTS ini berdasarkan beban penggunaan listrik rumah tangga. Dengan mengetahui beban rumah maka dapat ditentukan kapasitas inverter yang akan digunakan. Tegangan input (V_{in}) inverter diperlukan untuk menentukan perancangan jumlah panel surya dan kapasitas yang akan digunakan. Perancangan kapasitas PLTS harus sedikit lebih besar atau sama dengan beban yang digunakan untuk rumah. Dalam buku *GSES* untuk perhitungan perancangan sesuai dengan rumus 2.4 :

$$\text{Jumlah Modul} = \frac{\text{Kebutuhan Daya}}{\text{Total Daya}} \dots\dots\dots (2.4)$$

c. Jenis Silikon Yang Digunakan

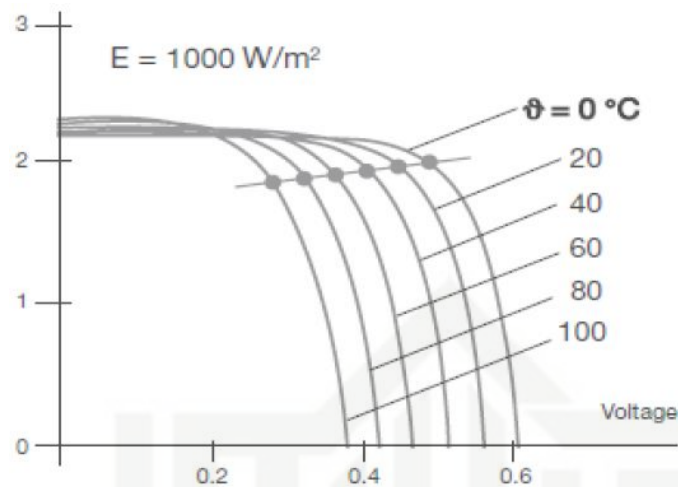
Untuk melihat perbedaan efisiensi dari tipe-tipe modul surya berdasarkan silikonnya, maka perlu diperhatikan bahwa perbedaan ini dibandingkan dengan kondisi luas permukaan modul yang sama besarnya. Jika dilihat dari efisiensinya, modul surya yang paling efisien adalah jenis *monocrystalline silicon*. [11].

d. Temperatur Modul Surya (*Temperature Of The Module*)

Kebalikan dari masalah iradiasi, ketika temperatur dari modul surya meningkat, arus yang diproduksi dari modul surya pada kenyataannya tetap tidak mengalami perubahan, sebaliknya tegangan mengalami penurunan dan bersamaan dengan itu performa dari panel surya juga mengalami penurunan dalam produksi energi listrik.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2.9 Grafik Pengaruh temperatur modul pada produksi energi modul surya (Sumber Permadi 2008)

e. **Insolasi Matahari**

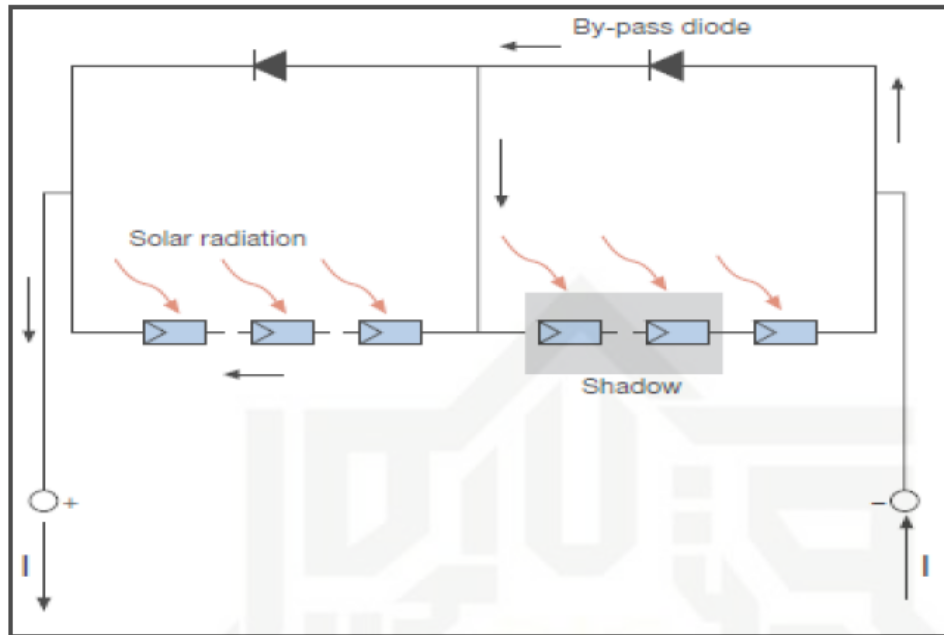
Intensitas radiasi sinar matahari (*irradiance*) yaitu daya yang dihasilkan oleh sinar matahari per satuan luas (W/m²). Jumlah energi yang dihasilkan oleh sinar matahari disebut dengan *irradiation* dengan satuan kWh/m². *Irradiation* juga bisa disebut dengan PSH (*peak sun hour*) [11].

f. **Bayangan (*Shading*)**

Area yang digunakan oleh modul surya pada suatu PLTS, sebagian darinya (satu atau lebih sel) mungkin dibayangi atau terhalangi oleh pepohonan, daun yang jatuh, asap, kabut, awan, atau panel surya yang terpasang di dekatnya. Pada shading, sel surya yang tertutupi akan berhenti memproduksi energi listrik dan berubah menjadi beban pasif. Sel ini akan berlaku seperti diode dalam kondisi memblok arus yang diproduksi oleh sel lain dalam hubungan seri dan akan membahayakan keseluruhan produksi dari modul surya tersebut, terlebih dapat merusak modul akibat adanya panas yang berlebih. Menghindari permasalahan yang lebih besar akibat shading pada suatu string, maka diantisipasi dengan penggunaan diode *by-pass* yang terpasang paralel pada masing-masing modul. [11]

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2.10 Pengaruh *Shading* Terhadap Modul Surya
(Sumber ABB 2010)

Dalam memilih *PV Modules* yang benar untuk instalasi, hal penting yang dipertimbangan dalam dalam pada tempat instalasi dalam standar GSES adalah :

1. Kisaran suhu lokal.
2. Efek dari suhu di *power output*.
3. Kesesuaian dari struktur untuk penginstalan.
4. Jika tipe *ground-mounted*, juga memperhitungkan kesesuaian dari tipe *ground* untuk penginstalan.
5. Paparan dari *salt spray* - berdampak pada garansi dari modul.
6. *Snow loading* – mempengaruhi kesesuaian struktur pemasangan.

Berikut juga hal penting yang mesti di perhitungkan untuk pemilih array untuk melihat ukuran array yang cocok untuk inverter :

1. Nomor minimum dari *PV Modules* per *string*
2. Nomor maksimum dari *PV Modules* per *string*
3. Nomor maksimum dari *string*

4. Pemeriksaan *power rating*
5. Pemeriksaan array atau inverter yang cocok

2.3.3 Penyangga Modul

1. Sistem penyangga tetap (*fixed mounting systems*)

Sistem pemasangan tetap (*fixed*) menjaga barisan dari modul surya pada sudut kemiringan yang tetap, menghadap pada suatu sudut tetap dari arah matahari yang telah ditentukan. Sudut kemiringan dan arah/orientasi pada umumnya disesuaikan berdasarkan lokasi PLTS terpasang. Sistem ini lebih sederhana, murah, dan lebih sedikit perawatan daripada sistem *tracking*.

2. Sistem pelacak (*tracking systems*)

Sistem pelacak adalah suatu peralatan atau sistem yang digunakan untuk mengarahkan panel surya atau pemantul cahaya terpusat terhadap matahari, sehingga dengan mengarahkan panel surya secara tepat pada posisi matahari, panel surya tersebut dapat memaksimalkan tegangan yang akan dihasilkannya. [11]

Dalam hal pemasangan penyangga modul dalam standar GSES ada beberapa hal yang mesti diperhitungkan, antara lain:

1. Bahannya cukup kuat untuk menahan array.
2. Luas area yang cukup, baik untuk pemasangan maupun perawatan.
3. Resiko pemasangan array pada penyangga.
4. Sudut kemiringan pemasangan.

2.3.4 Inverter

Inverter adalah peralatan elektronik yang berfungsi mengubah energi DC menjadi energi AC. Energi yang dihasilkan panel surya adalah arus DC, oleh karena itu pada sistem PLTS dibutuhkan inverter untuk mengubah energi dari panel dan baterai tersebut agar dapat menyuplai kebutuhan energi AC. Pemilihan inverter yang tepat untuk aplikasi tertentu, tergantung pada kebutuhan beban dan juga apakah inverter akan menjadi bagian dari sistem yang menuju jaringan listrik atau sistem yang berdiri sendiri. [7]

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber;

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

2. Dilarang mengumumkannya dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Menurut buku GSES untuk perhitungan inverter yaitu sesuai dengan kebutuhan beban yaitu untuk menentukan jumlah *string* pada sistem maka, susunan pada panel berdasarkan tegangan input inverter dan tegangan output panel. Berdasarkan spesifikasi yang ditampilkan sebelumnya maka, rancangan dilakukan dengan cara berikut:

$$\text{Jumlah string} = \frac{\text{Tegangan input inverter}}{\text{Tegangan PV}} \dots\dots\dots (2.5)$$

$$\text{Jumlah paralel} = \frac{\text{Jumlah panel}}{\text{Jumlah string}} \dots\dots\dots (2.6)$$

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

a. Inverter pada PLTS *Stand-Alone*

Inverter harus mampu mensuplai tegangan AC yang konstan pada variasi produksi dari modul surya dan tuntutan beban (*load demand*) yang dipikul.

b. Inverter pada PLTS *Grid-Connected*

Inverter dapat menghasilkan kembali tegangan yang sama persis dengan tegangan jaringan pada waktu yang sama, untuk mengoptimalkan dan memaksimalkan keluaran energi yang dihasilkan oleh modul surya.

Konsep hubungan inverter menjelaskan tentang bentuk rangkaian inverter pada suatu sistem PLTS terhadap pembangkitan daya listrik oleh panel surya, dan hubungan antara inverter dengan beban atau jaringan. Secara umum ada dua kelas inverter yaitu, inverter sentral atau disebut *central inverters* dan *string inverters*.

a. Inverter Sentral (*Central Inverters*)

Inverter sentral (*central inverters*) biasanya digunakan pada berbagai sistem PLTS skala menengah dan skala besar. Central inverters menyajikan instalasi yang lebih handal dan sederhana. Central inverters biasanya merupakan sistem tiga fasa dan dilengkapi transformator frekuensi jaringan (*grid frequency transformer*). Selain itu central inverters menggunakan konfigurasi master slave yaitu beberapa inverter tidak akan bekerja atau padam ketika iradiasi dalam keadaan rendah, sedangkan

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

inverter lainnya tetap bekerja sesuai atau mendekati pembebanan yang optimal. Ketika iradiasi tinggi, semua beban dibagikan dan ditanggung oleh semua inverter. [11]

b. Inverter *String*

Inverter *string* menggunakan inverter yang berlipat ganda untuk string array yang berlipat ganda juga. Penggunaan inverter string sangat banyak dan meningkat karena inverter string dapat mengatasi batasan daya yang luas dan lebih murah dalam proses pabrikasinya daripada jenis central inverters. Sistem ini sangat cocok untuk kondisi modul surya yang tidak bisa dipasang pada orientasi yang sama, berbeda spesifikasi, atau perbedaan iradiasi yang diterima. Sistem ini memiliki kelebihan yaitu lebih mudah dalam perbaikan dan penggantian, karena tidak diperlukan personil dan spesialis, dan waktu yang dibutuhkan tidak selama sistem sentral, jadi tidak banyak hasil produksi energi yang terbuang saat perbaikan.

2.3.5 *Moulded Case Circuit Breaker (MCCB)*

Moulded Case Circuit Breaker (MCCB) adalah suatu alat yang digunakan untuk membatasi arus sekaligus pengaman pada suatu instalasi listrik apabila terjadi kelebihan muatan listrik atau terjadi hubungan arus pendek. MCCB dapat menanggulangi *reverse current* dan *earth fault* dan biasa digunakan pada jalur yang memiliki arus cukup besar. Pemasangan MCCB ini sangat berguna untuk keadaan *maintenance* dimana dengan keberadaan komponen ini dapat mematikan satu jalur apabila ada kerusakan komponen sehingga harus diganti atau hanya sekedar perawatan. [17].

Pada sistem PLTS, panel surya biasanya dipasang diantara PLTS dan inverter. Alat tersebut digunakan sebagai saklar penghubung dan memutus yang harus dipasang pada arus DC. MCCB harus berupa Single Pole (SP), Double Pole (DP) atau Triple Pole (TP) atau four pole (4P) seperti ditentukan dalam gamabar spesifikasi. Kontruksi dan pengoperasian circuit breaker harus sedemikian rupa sehingga jika fault muncul, semua pole-pole circuit breaker harus beroperasi serentak

untuk mengisolasi dan menghilangkan fault tersebut secara efisien dan aman tanpa resiko terhadap operator atau instalasi tersebut.

2.3.6 Metering Device (Meteran)

Meteran listrik adalah alat yang berfungsi mencatat jumlah konsumsi energi listrik dalam kWh yang digunakan dalam suatu gedung. Selain dapat mencatat jumlah energi listrik yang digunakan, meteran dapat mengirimkan energi listrik yang dihasilkan dari sistem PLTS ke sistem jaringan utama pada saat energi yang dihasilkan dari PLTS berlebih pada saat siang hari. Namun, pada saat energi dari PLTS tidak mencukupi untuk memenuhi beban maka untuk mencukupi beban dapat menggunakan energi listrik dari jaringan utama melalui meteran. Terdapat dua jenis meteran untuk PV, yakni meteran *Net* dan meteran *Gross*.

Pada sistem *on-grid* tipe meteran yang digunakan hanya *Net metering*. Cara kerja *net metering* adalah daya yang dihasilkan oleh sistem PLTS terlebih dahulu digunakan untuk memenuhi beban secara keseluruhan dan apabila terjadi kelebihan listrik dari sistem PLTS maka akan di *import* ke jaringan utama.

Gross metering digunakan untuk mengirim semua energi listrik dari sistem PLTS ke jaringan utama melalui meteran independen. Sistem ini akan menggunakan dua buah meteran untuk mencatat energi yang di *export* dan energi yang di *import*. Cara ini sangat efektif apabila diterapkan pada sistem rumah tangga yang sekaligus berinvestasi karena jumlah energi yang diterima sangat jelas tertulis didalam kWh meter.

2.3.7 Kabel

Kabel terbuat dari bahan konduktor agar mudah menghantarkan listrik karena fungsi kabel adalah untuk mengalirkan listrik dari satu piranti ke piranti. Semakin besar ukuran diameter kabel, semakin mudah elektron mengalir. Dengan demikian, penggunaan kabel tidak lepas dengan perhitungan ukuran diameter kabel yang akan digunakan.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

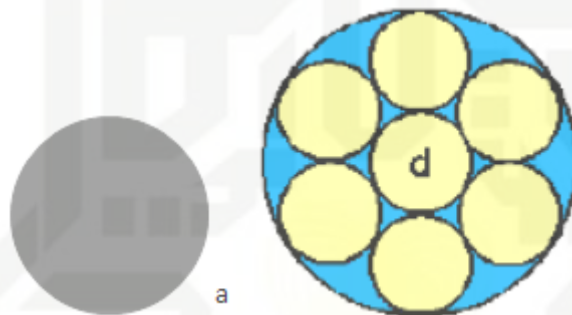
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber;

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Pada umumnya, kabel berbentuk lingkaran di penampang melintangnya. Kabel dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu kabel *solid* dan kabel *stranded*. Kabel *solid* adalah kabel yang terbuat dari konduktor *solid* sepanjang kabel tersebut, sementara kabel *stranded* adalah kabel yang terbuat dari kabel-kabel *solid* yang lebih kecil (*strand*) dan digulung hingga membentuk satu kabel yang lebih besar. Kabel *stranded* memiliki keunggulan dalam hal fleksibilitas, karena kabel jenis ini lebih mudah untuk ditekuk dan digulung daripada kabel *solid*.



Gambar 2.11 (a) Kabel *Solid* dan (b) Kabel *Stranded* dengan 7 *Strand*
 (Sumber Saputra 2015)

Ukuran diameter pada sebuah kabel dapat dikur dengan satuan panjang pada umumnya (misalnya pada Gambar 2.15 (a) menggunakan satuan inch) atau menggunakan satuan mils. Satuan mils menunjukkan 1.000 kali 1 inch, sehingga diameter kabel *solid* pada Gambar 2.15 (b) menjadi 101,9 mils. Diameter penampang melintang kabel *stranded* adalah diameter masing-masing *strand* dikali dengan banyaknya *strand* sepanjang diameter kabel. Pada Gambar 2.15 banyaknya *strand* sepanjang diameter kabel adalah 3. Selain ukuran diameter, ukuran luas penampang melintang kabel juga dapat dihitung dengan satuan mils. Bentuk ukuran luas penampang kabel adalah lingkaran, sehingga satuannya disebut circular mils. Satu circular mils adalah luas penampang lingkaran yang diameternya 1/1.000 inch. [17]

Dalam penentuan perhitungan panjang kabel pada buku GSES dalam satu lokasi semua peralatan telah diperhitungkan untuk menentukan rute kabel. Rute kabel mencakup :

1. Dari *PV array* ke *junction box* dan *junction box* ke *inverter*, atau
2. Dari *PV array* langsung ke *inverter*, dan

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

3. Inverter untuk *switch board* atau *distribution board*

Jarak kabel ini perlu diukur karena jarak akan digunakan untuk memilih ukuran kabel dan untuk menentukan perhitungan kerugian system. untuk menentukan ukuran kabel, menggunakan rumus:

$$q = \frac{L \cdot N}{y \cdot ev \cdot E} \dots\dots\dots(2.5)$$

q = Ukuran kabel (mm)

L = Panjang Kabel (m)

y = Masa jenis penghantar tembaga

ev = Drop tegangan (Perkiraan Losses kabel & terminal)

E = Tegangan yang melewati penghantar (V)

2.4 Acuan Standar Pemilihan Komponen

Pemilihan jenis-jenis komponen yang akan digunakan dalam perancangan dan pembuatan suatu perangkat adalah hal yang sangat mutlak untuk dilakukan, karena hal tersebut akan berdampak terhadap kualitas perangkat, efisiensi, dan efektifitas perangkat yang akan dibuatnya. Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pemilihan komponen adalah kualitas masing-masing komponen, kehandalan komponen, bentuk serta dimensi komponen, dan juga dana yang sedapat mungkin ditekan agar lebih efisien dalam hal ekonomisnya.

Pemilihan komponen yang akan dirancang pada PLTS Gedung Terpadu pada ini mengacu pada standar buku *Global Sustainable Energy Solution (GSES)* dengan judulnya “*Grid-Connected PV Systems Design and Instalations*”. Edisi Pertama yang telah memiliki standar yang tersertifikasi dari pemerintah (*Ministry of New and Renewable Energy*) yang bertempat di negara India. Berdasarkan panduan ini informasi yang diperlukan untuk sebuah instalasi sistem terhubung pembangkit listrik sel surya antara lain :

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

2.4.1 Modul

Menurut standar dari *Ministry of New and Renewable Energy*, modul harus sesuai dengan standar internasional. Modul yang berkualitas dipasang dan yang memiliki standar international yang paling umum diterapkan untuk *PV modules* adalah

1. *IEC61215 – Crystalline Silicon Terrestrial photovoltaic (PV) modules. Design qualification and type approval*
2. *IEC61646 – Crystalline Thin-Film Terrestrial photovoltaic (PV) modules, Design qualification and type approval*
3. *IEC61730 – Photovoltaic (PV) module safety qualification. Requirements for construction & Requirements for testing.*

Menurut dari acuan pemerintah India yang berujuk ke buku GSES, minimal persyaratan teknis standar untuk PV sistem atau penggunaan, produksi harus menyediakan minimal informasi berikut pada lembar spesifikasi mereka:

1. Nama produksi *PV Module*
2. Nama produksi Sel Surya
3. Bulan dan tahun produksi (secara terpisah untuk *PV Module* dan Sel Surya)
4. Negara asal (secara terpisah untuk *PV Module* dan Sel Surya)
5. Kurva I-V modul
6. Watt tertinggi, IM, Vm, dan FF modul
7. No seri *PV Module* dan Sel Surya (secara terpisah untuk *PV Module* dan Sel Surya)
8. Bulan dan tahun diperolehnya sertifikasi IEC pada kualifikasi *PV Module*
9. Nama penerbitan tes lab dari sertifikasi IEC
10. Informasi yang berhubungan antara *Module* dan Sel Surya berdasar seri ISO 9000.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber;

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Jika tidak tersedia pada standar brosur atau spesifikasi lembar, pembuatan berkualitas harus mampu menyediakan informasi berikut :

1. Temperature co-efficient of P_{max} - NOCT
2. Temperature co-efficient of V_{max} -Temperature co-efficient of I_{sc}

Kementerian energi baru dan terbarukan ini menyediakan pembaruan ke daftar tanggal produsen modul terakreditasi di India.

2.4.2 Inverter

Dalam melakukan pemilihan inverter, ada beberapa hal yang perlu dipertimbangkan ketika memilih inverter menurut standar GSES antara lain:

1. Nilai tertinggi dari PV array.
2. Posisi semua solar modul yang sama pada bidang yang sama, yaitu sudut kemiringan dan arah yang sama
3. Jenis *shading* yang pada *array*.
4. Biaya modal dari jenis inverter yang berbeda.
5. Rata-rata *yield* energi pertahun.

Perancang sistem harus memeriksa inverter yang memenuhi persyaratan otoritas dari *Central Electricity authority (Technical Standards for Connectivity of the Distributed Generation Resources) Draft Regulations 2012 and IEC62109-2*.

Jika sistem adalah sistem yang lebih besar ($> 20kW$), maka ada kemungkinan bahwa inverter sentral akan dipilih. Hal ini tergantung pada letak poin 2 dan 3 diatas. *Array* bisa dipecah menjadi segmen masing-masing 5 kW, kemudian dihubungkan ke inverter yang lebih kecil.

Jika modul akan diinstal pada tempat yang berbeda atau akan ada *shading* dari *array*, untuk hasil energi maksimum selama setahun, mungkin lebih baik memecah sistem menjadi nomer string yang berbeda dan menggunakan inverter *multi-string* atau tunggal string pada setiap string.

Untuk menggunakan desain sistem yang dipecah menjadi nomer *string*, ketika salah satu *string* berbayang dan nilai MPP *voltage* berkurang pada string. Demikian pula jika modul berada ditempat yang berbeda dan semua terhubung dengan satu

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

inverter baik sebagai satu string atau beberapa *string*, inverter akan mengikuti MPP terendah.

Kerugian dari desain sistem dipecah menjadi string adalah dapat meningkatkan biaya, sejumlah string inverter (lebih kecil dari rating kW) mungkin akan lebih mahal dari kW yang lebih besar dinilai dari inverter. Keuntungan dari energi yield tinggi dan redundansi dari beberapa inverter, bisa lebih menguntungkan daripada biaya peningkatan modal.

Untuk desainer perlu menentukan keuntungan dari setiap solusi yang mungkin sehubungan dengan *capital costs* dan kinerja sistem. Hal ini harus didiskusikan dengan klien dan keputusan akhir yang dibuat dalam konsultasi dengan mereka. Tidak semua modul atau semua pengaturan modul cocok dengan semua inverter. Ketika memilih inverter berikut informasi yang perlu ditentukan :

1. Sistem masuk kedalam batas daya maksimum masukan inverter.
2. *Feed-in-tariff*.
3. Ukuran kapasitas array.

Jika kapasitas satu inverter lebih besar dari sistem, jumlah PV array dapat di dikemudian hari, PV modul menjadi lebih cocok ketika sistem ditingkatkan. Setiap kinerja antara system PV modul harus dipertimbangkan sebelum sistem diupgrade.

Grid inverter memiliki *Maximum Power Point Tracking range (MPPT range)*. Informasi yang mayoritas diikuti dari produksi inverter *grid connected* yakni dari pasaran MPPT juga memiliki spesifikasi seperti :

1. *MPPT voltage range*
2. *MPP range*
3. *Inverter operating window*
4. *Operasi voltage window or similiar terms.*

Produksi inverter juga memiliki input maksimum, yakni sebagai berikut :

1. *Maksimum PV open circuit voltage*
2. *Maksimum input voltage*

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

3. *Maksimum DC input voltage*
4. *Maksimum DC voltage or similiar*

Inverter akan melacak titik daya maksimum dari array dalam untuk memberikan kinerja yang terbaik. Jika tegangan MPP (atau VMP) dari array diluar jangkauan, kinerja array akan terpengaruh.

Input voltage maksimum adalah tegangan inverter DC maksimum yang dirancang untuk menangani keamanan. Ini tegangan rangkaian terbuka array melebihi tegangan input maksimum inverter, mungkin damage elektronik inverter.

Tegangan input maksimum menjadi nilai yang sama sebagai batas tertinggi dari kisaran MPPT atau dapat ditetapkan sebagai higher voltage (inverter dapat menangani tegangan yang lebih tinggi dari tegangan kisaran MPPT maksimal tetapi tidak dapat melacak MPPT dari array untuk lebih tinggi dari batas tegangan).

Oleh karena itu hal penting dari tegangan output string adalah spesifikasi dan spesifikasi dari berbagai MPPT inverter dan tidak dapat mencapai tegangan maximum input dari inverter.

2.4.3 *Moulded Case Circuit Breaker (MCCB)*

Menurut dari buku GSES, rangkaian pemutus yang biasa digunakan pada MCCB yang terdapat pada:

1. PV array tanpa pembumian dengan inverter terisolasi.
2. PV array menggunakan pembumian dengan inverter berisolasi.
3. PV array tanpa pembumian dengan menggunakan inverter tanpa isolasi.

Peletakan isolasi saklar manual harus dipasang diantara inverter dan jaringan listrik. Sisi pemasangan isolator terdapat pada perangkat metering PV di papan hubung dan haruslah mematuhi peraturan berikut:

1. Akan terkunci pada saat posisi terbuka.
2. Berada diketinggian 2.44m dari permukaan tanah.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

3. Saat beban mati, tidak ada aliran listrik atau lebih baik mempunyai peralatan perlindungan.
4. Mematuhi semua spesifikasi lainnya sesuai kewenangan Central Electricity regulasi 2012.

Pemilihan MCCB yang menjadi variabel yang menjadi acuan yang akan digunakan menjadi acuan tersebut menurut standar GSES yaitu:

1. Nilai untuk tegangan operasi pada sistem sesuai dengan perhitungan desain sistem tegangan.
2. Nilai untuk arus operasi sesuai dengan perhitungan tegangan desain system arus.

2.4.4 Kabel

Jenis kebanyakan kabel yang tersedia di pasaran dapat digunakan untuk sistem panel surya. Dalam melakukan pemilihan kabel yang menjadi variabel yang menjadi acuan yang akan digunakan menjadi acuan tersebut menurut standar GSES yaitu:

1. Memiliki banyak inti
2. Memliki lapisan yang uang tahan sinar UV dan tahan air.
3. Pemilihan kapasitas tegangan dan arus maksimum kabel bergantung dari nilai dan jumlah string dari rangkaian.

2.5 STC dan NOCT

2.5.1 STC (*Standard Test Condition*)

STC adalah data standar spesifikasi produk yang menentukan performa penggunaan PLTS. Performa modul surya bervariasi sesuai dengan kondisi radiasi dan temperatur. Sesuai Standar Internasional, pengetesan sebuah modul harus dilakukan beberapa tes kondisi, yaitu:

1. Temperatur sel 25°
2. Radiasi pada 1000 W/m²
3. Kondisi udara 1.5

4. Kecepatan angin 1m/s

Pengujian STC berguna untuk membandingkan rasio keluaran daya modul antara saat mereka di ukur dengan performa saat penggunaan.

2.5.2 NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)

Nominal Operating Cell Temperature adalah sebuah standar temperatur modul surya, yaitu sebesar 25°C. Ketika sebuah PLTS beroperasi dalam kondisi suhu normal dan modul berada saat matahari terik, temperatur dari sel surya bekerja standar pada 25°. Dalam temperatur inilah sebuah modul dapat bekerja maksimal [8].

2.6 Inklinasi dan Orientasi PV Module

Efisiensi maksimum dari panel surya akan meningkat jika sudutnya saat terjadi sinar matahari selalu berada pada 90°. Namun kenyataannya peristiwa dari radiasi matahari bervariasi berdasarkan pada keduanya yaitu garis lintang (*latitude*), dan seperti halnya deklinasi matahari selama setahun. Faktanya poros rotasi bumi adalah dengan kemiringan sekitar 23,45° terhadap bidang dari orbit bumi oleh matahari, pada garis lintang tertentu tinggi dari matahari pada langit bervariasi setiap harinya. Untuk mengetahui nilai ketinggian maksimum matahari ketika matahari mencapai langit (α), Menurut [12] secara mudah dengan menggunakan rumus 2.6 :

$$\alpha = 90^\circ - lat + \delta N hemisphere ; 90^\circ + lat - \delta S hemisphere \dots \dots \dots (2.6)$$

Keterangan:

Lat = garis lintang (*latitude*) lokasi instalasi panel surya terpasang (dalam satuan derajat)

Δ = sudut dari deklinasi matahari (23,45°)

Apabila sudut sudut dari ketinggian maksimum matahari (α) diketahui, maka sudut kemiringan *PV module* (β) juga dapat diketahui. Namun tidak cukup hanya mengetahui α saja untuk menentukan orientasi yang optimal dari *PV module*, sedangkan sudut yang harus dibentuk oleh *PV module* terhadap permukaan bumi (β), [12] dapat diperoleh dengan menggunakan rumus 2.7:

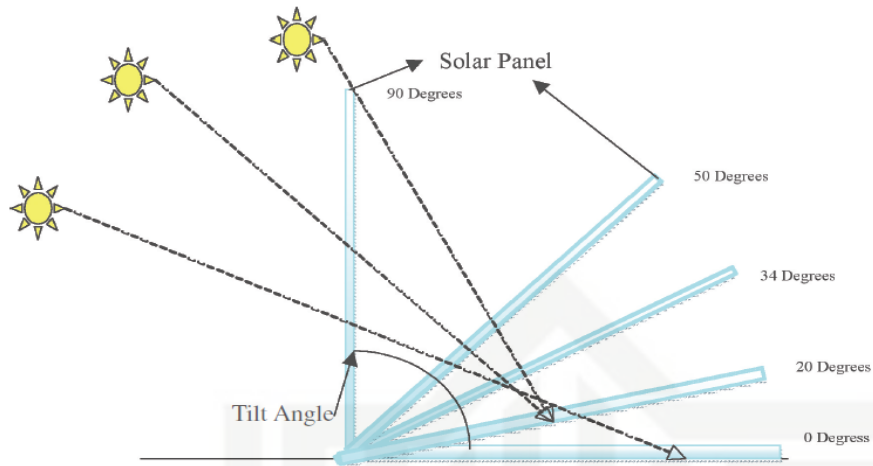
$$\beta = 90^\circ - \alpha \dots \dots \dots (2.7)$$

Penempatan *PV module* untuk mendapatkan energi maksimum, sebaiknya *PV module* ditempatkan menghadap arah selatan, meskipun arah timur atau barat juga memungkinkan tetapi jumlah listrik yang akan dihasilkan akan lebih rendah. Selain itu sudut peletakan *PV module* tidak boleh kurang dari 10° atau melebihi 45° . Orientasi dari rangkaian *PV module (array)* kearah matahari adalah penting, agar *PV module (array)* dapat menghasilkan energi yang maksimum. Misalnya, untuk lokasi yang terletak di belahan bumi utara maka *PV module* sebaiknya 37 diorientasikan ke selatan. Begitu pula untuk lokasi yang terletak di belahan bumi selatan maka *PV module* diorientasikan ke utara. [11]

2.7 Sudut Kemiringan *PV Module*

Sudut kemiringan memiliki dampak yang besar terhadap radiasi matahari dipermukaan *PV module*. Untuk sudut kemiringan tetap, daya maksimum selama satu tahun akan diperoleh ketika sudut kemiringan *PV module* sama dengan lintang lokasi. Sistem pengaturan berfungsi memberikan pengaturan dan pengamanan dalam suatu PLTS yang sedemikian rupa sehingga sistem pembangkit tersebut dapat bekerja secara efisien dan handal. Peralatan pengaturan di dalam sistem PLTS ini dibuat secara manual, yaitu dengan cara selalu menempatkan ke arah matahari, atau dapat dibuat secara otomatis, mengingat sistem ini banyak dipergunakan untuk daerah terpencil. Otomatis hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan rangkaian elektronik. Namun dilihat dari segi kepraktisan dan perawatan yang mudah serta murah, pemasangan *PV module* dengan cara memasang *PV module* dengan posisi tetap dengan sudut kemiringan tertentu adalah pilihan yang tepat.

Menentukan arah sudut kemiringan *PV module* harus disesuaikan dengan letak geografis lokasi pemasangan *PV module* tersebut. Penentuan sudut pemasangan *PV module* ini berguna untuk membenarkan cara pemasangan *PV module* ke arah garis khatulistiwa. Pemasangan *PV module* ke arah khatulistiwa dimaksudkan agar *PV module* mendapatkan penyinaran yang optimal. *PV module* yang terpasang di khatulistiwa (lintang = 0°) yang diletakkan mendatar (*tilt angle* = 0°), akan menghasilkan energi maksimum. [10]



Gambar 2.12 Pemasangan *PV Module* dengan sudut kemiringan [18]
(Sumber Alhamda 2015)

2.8 Perencanaan Biaya PLTS

Pada perancangan PLTS perlu dilakukannya perencanaan biaya, agar dapat diketahui biaya yang dikeluarkan dan pendapatan yang diperoleh pada perancangan PLTS. Perencanaan biaya yang dilakukan meliputi perhitungan biaya investasi awal perancangan seperti pembelian komponen – komponen, instalasi (pemasangan) setiap komponen agar menjadi sebuah sistem yang sesuai kebutuhan serta pemeliharaan setiap komponen hingga biaya awal dapat kembali setelah pemasangan PLTS selesai. Berikut parameter yang diperhitungkan dalam perencanaan biaya yang dilakukan menurut Novania :

2.8.1 *Power Worth Factor (PWF) Analysis*

PWF adalah metode perhitungan yang digunakan untuk menghitung nilai dari seluruh biaya pemeliharaan tahunan selama sistem digunakan pada tahun yang ke-sekian. Pada buku GSES menghitung nilai PWF dapat menggunakan rumus berikut:

$$PWF (g,d,n) = \frac{1}{(1+r)^n} \dots\dots\dots(2.8)$$

Keterangan:

r = suku bunga

n = jumlah tahun

2.8.2 Cash Flow (CF) Analysis

Pemilikan dan pengoperasian sebuah peralatan akan menimbulkan penerimaan-penerimaan *cash* (pendapatan-pendapatan) dan/atau pengeluaran-pengeluaran *cash* (pengeluaran-pengeluaran). Pendapatan-pendapatan dan penerimaan-penerimaan *cash* disebut dengan *cash flow benefit* dan biaya-biaya atau pengeluaran *cash* disebut dengan *cash flow cost*. [18]

1. Cash Flow benefit (CFB) / PV Pendapatan

CFC didapatkan dari pelayanan-pelayanan yang disumbangkan peralatan selama umur pelayanannya dan dari penjualannya pada akhir umur pelayanannya. Pada buku GSES menghitung nilai CFB dengan rumus berikut:

$$CFB = \sum_{t=0}^n Cost(1 + 0,08)^n \dots\dots\dots (2.9)$$

2. Cash flow cost (CSC) / PV pengeluaran

CFC yaitu biaya-biaya yang timbul, ada yang terjadi hanya sekali atau tidak berulang (*nonrecurring*) selama umur perlatan dan ada yang berulang selama umurnya untuk mengoperasikan dan memeliharanya. Pada buku GSES menghitung nilai CFC dapat menggunakan rumus berikut:

$$CFC = \sum_{t=0}^n \frac{cf}{(1+r)^n} \dots\dots\dots (2.10)$$

2.8.3 Net Present Value (NPV) Analysis

Metode ini didasarkan atas nilai sekarang bersih dari hasil perhitungan nilai sekarang aliran dana masuk (penerimaan) dengan nilai sekarang aliran dana keluar (pengeluaran) selama jangka waktu analisis dan suku bunga tertentu. Kriteria kelayakannya adalah apabila nilai sekarang bersih atau NPV > 0, yang dirumuskan :

$$NPV = (\sum PV \text{ Pendapatan}) - (\sum PV \text{ Pengeluaran}) \dots\dots\dots (2.11)$$

2.8.4 Benefit Cost Ratio (BCR) Analysis

Metode BC Ratio pada dasarnya menggunakan data ekivalensi nilai sekarang dari penerimaan dan pengeluaran, yang dalam hal ini BC Ratio adalah merupakan

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
 1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

perbandingan antara nilai sekarang dari penerimaan atau pendapatan yang diperoleh dari kegiatan investasi dengan nilai sekarang dari pengeluaran (biaya) selama investasi tersebut berlangsung dalam kurun waktu tertentu. Kriteria kelayakannya adalah bila nilai BC Ratio > 1 dan dirumuskan dengan:

$$BCR = (\sum \text{Nilai Pendapatan}) : (\sum \text{Nilai Pengeluaran}) \dots\dots\dots(2.12)$$

2.9 Software PVsyst

PVsyst merupakan paket *software*/perangkat lunak yang digunakan untuk proses pembelajaran, pengukuran (*sizing*), dan analisa data dari sistem PLTS secara lengkap. *PVSyst* dikembangkan oleh Universitas Genewa, yang terbagi ke dalam sistem terinterkoneksi jaringan (*grid-connected*), sistem berdiri sendiri (*stand-alone*), sistem pompa (*pumping*), dan jaringan arus searah untuk transportasi publik (*DC-grid*). *PVSyst* juga dilengkapi *database* dari sumber data meteorologi yang luas dan beragam, serta data komponen-komponen PLTS. Beberapa contoh sumber data meteorologi yang dapat digunakan pada *PVSyst* yaitu bersumber dari *MeteoNorm V 6.1* (interpolasi 1960-1990 atau 1981-2000), *NASA-SSE* (1983-2005), *PVGIS* (untuk Eropa dan Afrika), *Satel-Light* (untuk Eropa), *TMY2/3* dan *SolarAnywhere* (untuk USA), *EPW* (untuk Kanada), *RetScreen*, *Helioclim*, dan *SolarGIS* (berbayar).

Untuk dapat memprediksi dan menganalisa distribusi energi listrik dan spesifikasi komponen perancangan PLTS di Gedung Fakultas Sains dan Teknologi UIN Suska Riau, digunakan fitur desain proyek (*project design*) pada *PVSyst*. Pada fitur ini simulasi akan dijalankan dengan cara membuat terlebih dahulu desain dari sistem perencanaan rancangan PLTS. Berikut langkah pembuatan desain proyek menggunakan *software* *PVsyst*:

1. Menetapkan Proyek

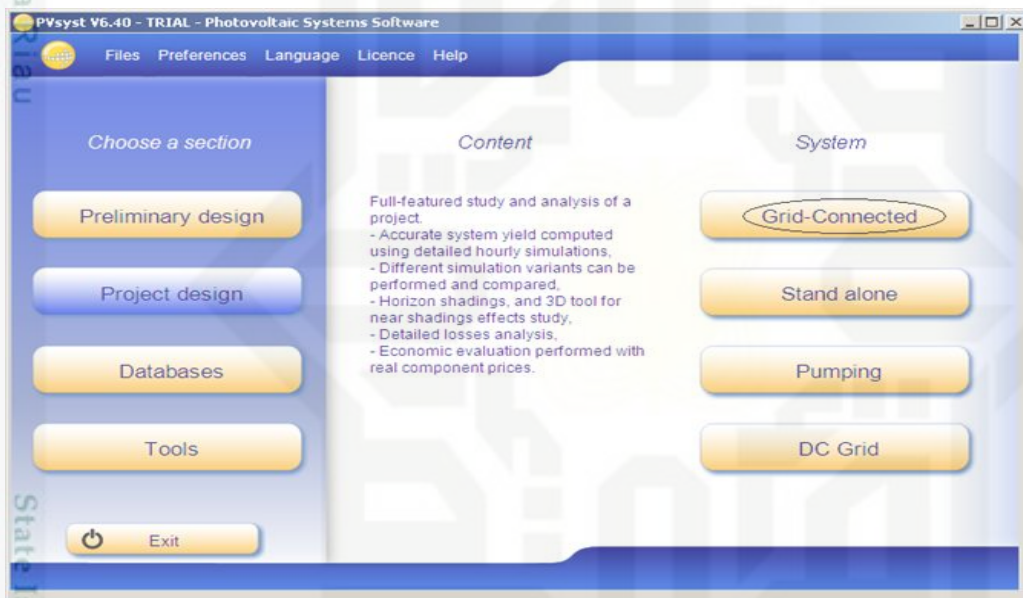
Dengan cara menentukan jenis proyek atau jenis PLTS. Dilanjutkan dengan membuat proyek baru dan mendefinisikan proyek seperti nama proyek, lokasi dan data meteorologi.

2. Menetapkan Perbedaan Sistem (*System Variant*)

Dengan cara menentukan orientasi terlebih dahulu seperti jenis penyangga panel surya, kemiringan panel, dan *azimuth*, lalu menentukan sistem PLTS, dengan memilih jenis dan jumlah inverter dan modul surya. Selain itu terdapat parameter opsional, seperti pemilihan profil horizon sesuai lokasi, yang dapat ditambahkan dengan impor data dari *software* lain.

3. Menjalankan Simulasi Untuk Mendapatkan Hasil Simulasi

Run *software* PVsyst maka muncul tampilan awal dari *software* pada gambar 2.11



Gambar 2.13 Tampilan Awal PVsyst

Setelah memilih *Grid-Connected* maka keluarlah lembar baru dimana kita akan membuat proyek PLTS.