

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Dalam penelitian tugas akhir ini akan dilakukan studi literatur yang merupakan pencarian referensi relevan dengan penelitian yang telah terselesaikan sebelumnya dari buku dan jurnal yang terkait.

Referensi yang terkait dengan penelitian ini salah satunya adalah dari jonathan dkk (2012) yang berjudul analisa teknik dan ekonomi desain sistem PLTS pada gedung komersial di Irlandia. Pemasangan dilakukan di gedung komersil dengan kapasitas panel suya sebesar 1,1 kWp menghasilkan listrik sebesar 900 kWh listrik di tahun tertentu, tergantung dari sumber daya matahari yang didapatkan pada tahun itu. Metode perhitungan yang dipakai menggunakan software RET-Screen dengan hasi biaya yang dibutuhkan dalam pembangunan sebesar € 48.000 dan modal akan kembali setelah 15 tahun pembangunan PLTS.

Kiki dan Nazir (2013) pada penelitian Konsep Pengaturan Daya Untuk PLTS Tersambung ke Sistem Grid pada Rumah Tinggal, penelitian ini bertujuan untuk menyediakan listrik dari energi solar dikarenakan merupakan salah satu energi terbarukan sebagai alternatif yang mudah digunakan untuk rumah tinggal di Indonesia. Jadi dari hasil penelitian ini teknologi PLTS tersambung ke grid (jaringan PLN), penggunaan baterai pun dapat dikurangi. Paper ini mengajukan suatu konsep pengaturan aliran daya antara PLTS, grid PLN dan beban. Beban yang tersambung dengan sistem PLTS dan grid menggunakan energi yang sama dengan yang disalurkan oleh PLTS dalam jangka waktu tertentu. Dalam hal ini, grid menjadi penyimpan atau pemberi pinjaman sementara untuk pemenuhan permintaan beban. Sehingga dengan penerapan konsep ini kita hanya mengeluarkan biaya investasi dari sistem PLTS tanpa baterai.

Thyra, dkk, (2014) dalam Analisis Ekonomi Penggunaan Inverter Sel Surya Pelanggan Rumah Tangga Terhubung Dengan Jaringan Pada Perumahan Syailendra Residence Banyumanik Semarang dengan tujuan membahas perencanaan sistem PLTS terhubung dengan PLN dengan harapan PLTS dapat meringankan beban PLN dalam menyediakan kebutuhan energi listrik. Pada penelitian mereka secara analisis ekonomi (NPV, B—CR dan PP) sistem PLTS ini tidak layak, karena dengan harga jual energi yang ditetapkan Pemerintah sebesar Rp1.004/kWh tidak mampu mengimbangi biaya investasi awal yang sangat tinggi. Sistem PLTS menggunakan 70 unit panel dengan biaya investasi awalnya sebesar

Rp189.074.520 dengan harga jual energinya sebesar Rp1.600/kWh menghasilkan pendapatan sebesar Rp193.839.272 adalah bentuk investasi yang paling layak.

Penelitian Liky Saputra, dkk, (2011) menjelaskan Analisis Teknik Dan Ekonomi Power Hibrida (Photovoltaic-PLN) Di Jurusan Elektro Fakultas Teknik Brawijaya Malang, tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan layanan penerangan secara maksimal dengan memanfaatkan energi matahari yang sangat berlimpah dan tidak akan habis jika digunakan terus menerus. Dari sistem hibrida dari alternator energi surya dengan jaringan listrik PLN diharapkan dapat menyuplai daya sekitar 30% dari beban keseluruhan peralatan listrik di rumah tangga, dan beban sisanya sekitar 70% disuplai oleh PLN. Hibrida PLTS ini menggunakan jaringan listrik yang dikendalikan oleh switch pengontrol yang kerjanya satu cara arah, ketika PLTS bekerja (on), maka suplai listrik dari PLN akan terputus dan begitu sebaliknya.

Penelitian sebelumnya yang menjadikan PLTS on grid ini menjadi tidak layak adalah dikarenakan peneliti menggunakan baterai didalam sistemnya, seperti yang kita ketahui untuk harga baterai itu sendiri dapat seimbang dengan harga PV dan pemasangan PLTS dengan kapasitas kecil sehingga biaya investasi akan lebih besar di banding dengan kapasitas lebih besar. Pada penelitian ini akan menghasilkan rancangan PLTS *grid-connected* skala residensial pada rumah kategori mewah, dikarenakan daya yang terpasang lebih besar dan penggunaan listrik akan besar, dan untuk bangunan yang memiliki pemakaian berlebih seperti perumahan mewah solusinya dapat menggunakan PV yang terhubung dengan jaringan PLN tanpa menggunakan batrai. Perancangan sistem PLTS *grid-connected* ini sesuai dengan standar SPLN D5.005-1 :2015, yang mengatur sistem PLTS yang terkoneksi ke jaringan tegangan rendah PLN.

2.2 Regulasi dan Standar Terkait Pemasangan Sistem PLTS

Skala Residensial ini berdasarkan SPLN kapasitas terpasang sebesar 30 kWp atau terhubung ke jaringan distribusi tegangan rendah, sedangkan kapasitas dia atas 30 kWp atau terhubung ke distribusi jaringan tegangan tinggi yaitu skala komersil.

Pemasangan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) skala residensial telah di atur di dalam Peraturan Direksi PT. PLN (Persero) Nomor 0733.K/DIR/2013 tentang Pemanfaatan Energi Listrik dari Fotovoltaik oleh Pelanggan PT. PLN, sedangkan standar pemasangan di atur dalam SPLN D5.005-1 :2015 tentang Persyaratan Teknis Interkoneksi Sistem Fotovoltaik (PV) pada Jaringan Distribusi Tegangan Rendah.

2.2.1 Jual Beli Listrik Pelanggan *Photovoltaic*

Dalam upaya mendorong percepatan pencapaian pemanfaatan energi baru dan terbarukan, maka perlu mendorong pemanfaatan energi surya untuk pembangkit listrik tenaga surya. Berdasarkan Peraturan Direksi 0773.K.DIR-2013:

- a. fotovoltaik milik pelanggan di pasang dan diletakkan diatas bangunan milik pelanggan.
- b. Fotovoltaik dioperasikan secara paralel dengan sistem ketenagalistrikan PLN
- c. Pelanggan dapat mengirim kelebihan energi kWh dari fotovoltaik ke sistem ketenagalistrikan PLN
- d. PLN dapat menyediakan informasi energi listrik yang diterima PLN dari fotovoltaik jika diperlukan.
- e. PLN memasang jenis kWh meter Export import (Exim) untuk pelanggan PLN yang memanfaatkan energi listrik dari fotovoltaik.
- f. Energi listrik yang diterima PLN dari fotovoltaik akan offset dengan energi listrik yang dikirim PLN ke Pelanggan, maka selisihnya menjadi deposit kWh untuk diperhitungkan pada bulan-bulan berikutnya.
- g. Pelanggan tetap dikenakan Rekening Minimum sesuai daya tersambung PLN.

2.2.2 Standar Pemasangan *Photovoltaic*

Persyaratan teknis pemasangan sistem *Photovoltaic* skala residensial atau terhubung ke jaringan distribusi tegangan rendah PLN di atur dalam SPLN D5.005-1 tahun 2015, standar ini mengacu kepada *International Electrotechnical Commision* (IEC) dan Standar nasional Indonesia (SNI).

Syarat teknis sistem fotovoltaik pada SPLN D5.005-1 tahun 2015 yaitu:

- a. Besarnya kapasitas PV dalam satuan VA (ekivalen) yang diparalel ke jaringan tegangan rendah (JTR) PLN maksimum 90 % dari besarnya daya kontrak.
- b. Inverter dari PV pelanggan disesuaikan dengan jumlah fase kontrak PLN (Pelanggan fase tunggal paralel dengan JTR PLN dengan menggunakan inverter fase tunggal, sedangkan untuk pelanggan fase tiga dengan menggunakan inverter fase tiga).
- c. Bila pelanggan fase tiga menggunakan 3 buah inverter fase tunggal maka apabila salah satu atau lebih mengalami gangguan, maka sistem proteksi harus bekerja untuk melepas ketiga fasenya.
- d. Penempatan meter ekspor-impor harus dapat diakses dengan mudah oleh petugas PLN.

2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah suatu teknologi pembangkit yang mengkonversikan energi foton dari surya menjadi energi listrik. Konversi ini terjadi pada modul surya yang terdiri dari sel-sel photovoltaik. Sel-sel ini merupakan lapisan-lapisan tipis dari silicon (Si) murni dan bahan semi konduktor lainnya. Apabila bahan tersebut mendapat energi foton, akan mengeksitasi elektron dari ikatan atomnya menjadi elektron yang bergerak bebas dan akhirnya akan mengeluarkan tegangan listrik arus searah. Dengan hubungan seri-paralel, sel fotovoltaik dapat digabungkan menjadi modul dengan jumlah sekitar 40 sel, selanjutnya gabungan beberapa modul akan membentuk suatu PV array .

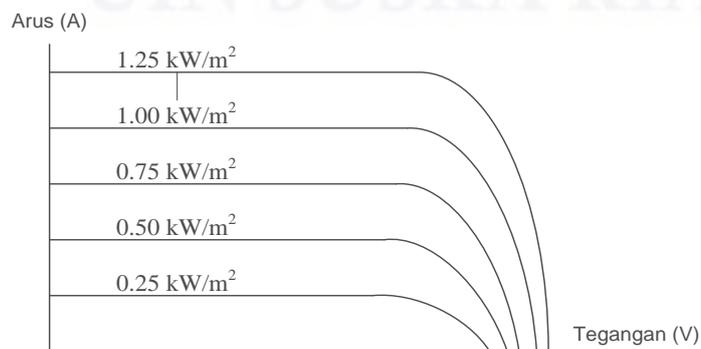
PLTS memanfaatkan cahaya matahari untuk menghasilkan listrik DC (direct current), yang dapat diubah menjadi listrik AC (Alternating current). PLTS pada dasarnya adalah pecatu daya dan dapat dirancang untuk mencatu kebutuhan listrik yang kecil sampai dengan besar, baik secara mandiri maupun secara hibrid.

2.4 Faktor – Faktor Mempengaruhi Kinerja PLTS

Faktor yang mempengaruhi kinerja PLTS mempunyai banyak sumber dari cuaca, komponen peralatan yang digunakan dan pemasangan PLTS.

2.4.1 Radiasi

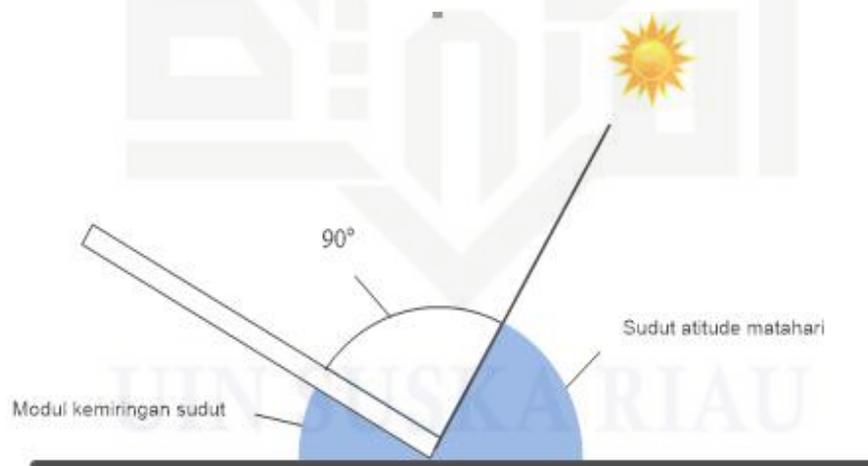
Radiasi mempengaruhi variasi arus dan tegangan. Terdapat hubungan antara variasi pada radiasi dan variasi pada hubungan arus. Tegangan pada rangkaian terbuka tidak berubah secara drastis terhadap radiasi. Namun, bagaimanapun tetap terjadi sedikit peningkatan pada saat kenaikan radiasi. Semakin tinggi radiasi maka, semakin besar pula arus dan tegangan yang dihasilkan. Salah satu faktor yang mempengaruhi jumlah radiasi yang sampai pada modul adalah terjadinya bayangan-bayangan yang dapat menghalangi radiasi sampai kepada modul surya seperti bayangan pohon, bayangan awan, bayangan bangunan dan lain-lain.



Gambar 2.1 Karakteristik Variasi Tegangan Terhadap Radiasi (Sumber: GSES, 2013)

2.4.2 Sudut Kemiringan Modul Surya

Sudut kemiringan memiliki dampak yang besar terhadap radiasi matahari dipermukaan modul surya. Untuk sudut kemiringan tetap, daya maksimum selama satu tahun akan diperoleh ketika sudut kemiringan modul surya sama dengan lintang lokasi. Sistem pengaturan berfungsi memberikan pengaturan dan pengamanan dalam suatu PLTS sedemikian rupa sehingga sistem pembangkit tersebut dapat bekerja secara efisien dan handal. Peralatan pengaturan di dalam sistem PLTS ini dapat dibuat secara manual, yaitu dengan cara selalu menempatkan kearah matahari, atau dapat juga dibuat secara otomatis, mengingat sistem ini banyak dipergunakan untuk daerah terpencil. Otomatis ini dapat dilakukan dengan menggunakan rangkaian elektronik. Namun dalam segi kepraktisan dan memudahkan perawatan pemasangan modul surya yang mudah dan murah adalah dengan memasang modul surya dengan posisi tetap dengan sudut kemiringan tertentu. Untuk menentukan arah sudut kemiringan modul surya harus disesuaikan dengan letak geografis lokasi pemasangan modul surya tersebut. Penentuan sudut pemasangan modul surya ini berguna untuk membenarkan penghadapan modul surya ke arah garis khatulistiwa. Pemasangan modul surya ke arah khatulistiwa dimaksudkan agar modul surya mendapatkan penyinaran yang optimal. Modul surya yang terpasang di khatulistiwa (lintang = 0°) yang diletakan mendatar (tilt angle = 0°), akan menghasilkan energi maksimum (Hanif, 2012).



Gambar 2.2 Penempatan Modul Surya
(Sumber: GSES, 2013)

Jika kita ingin mengarahkan modul surya ke matahari sepanjang waktu maka akan memerlukan *solar tracker*. Akan tetapi, *solar tracker* harganya mahal dan tidak biasa digunakan untuk PLTS *on grid*. Dan yang paling umum adalah memasang PLTS pada sudut tertentu yang dapat menghasilkan produksi energi paling tinggi. Sudut yang dimaksud adalah

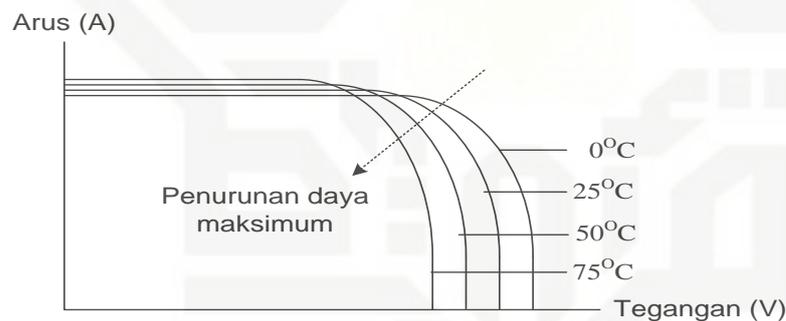
sudut yang sama dengan sudut latitude pada lokasi itu. Jika Indonesia berada pada sudut latitude 0,1 maka panel juga harus dipasang 0,1. Namun, hal ini tidak mempertimbangkan jika ada bayang-bayang baik dari pohon atau bangunan lain.

2.4.3 Orientasi Modul Surya

Orientasi dari rangkaian panel ke arah matahari secara optimum adalah sangat penting untuk menghasilkan energi yang maksimum. Selain arah orientasi sudut orientasi (*tilt angle*) dari panel juga sangat mempengaruhi hasil energi yang maksimum. Misalnya, untuk lokasi yang terletak di belahan bumi utara maka panel surya (*array*) sebaiknya diorientasikan ke selatan. Begitu pula untuk lokasi yang terletak di belahan bumi selatan maka panel surya (*array*) diorientasikan ke utara (Foster.2010).

2.4.4 Temperatur

Semakin tinggi temperatur pada solar sel diatas NOCT maka, akan semakin menurun tegangan yang akan dihasilkan oleh solar sel. Tetapi untuk arus akan semakin meningkat seiring tingginya temperatur.



Gambar 2.3 Variasi Karakteristik Temperatur
(Sumber: GSES, 2013)

Spesifikasi standar STC pada temperatur 25° C. Dan keperluan penggunaan untuk mendisain sistem adalah :

$$\text{Temperatur sel} = \text{Suhu lingkungan} + 25^{\circ}$$

Sebuah sel surya dapat tetap beroperasi pada saat temperaturnya lebih besar dari NOCT dan biasanya bisa diatas suhu temperatur lingkungan.

2.4.5 Daya dan Efisiensi Solar Cell

Sebelum mengetahui berapa nilai daya sesaat yang dihasilkan kita harus mengetahui daya yang dihasilkan (*daya output*), daya tersebut adalah perkalian antara intensitas radiasi

matahari yang diterima dengan luas area *PV module* dengan persamaan sebagai berikut (Mulyatno,2000):

Daya yang dapat diperoleh dari konversi sinar matahari secara umum dirumuskan sebagai berikut:

$$P_{input} = I \times A \text{ (watt)}$$

dengan:

$$I = \text{intensitas radiasi matahari (w/m}^2\text{)} \quad A = \text{luas permukaan PV module(m}^2\text{)}$$

Daya keluaran yang dikeluarkan *sel fotovoltaik* dengan rumus :

$$P_{out} = I \times A \times \eta \text{ (watt)}$$

dengan :

$$\eta = \text{efisiensi sel fotovoltaik (\%)}$$

Besarnya energi radiasi matahari yang dapat diserap oleh sel fotovoltaik :

$$E_{sel} = P_{out} \times t \text{ (watt/hour)}$$

dengan :

$$P_{out} = \text{daya keluaran sel fotovoltaik (watt)}$$

$$t = \text{lamanya penyinaran efektif rata-rata matahari yang mengenai permukaan}$$

Efisiensi yang terjadi pada sel fotovoltaik adalah merupakan perbandingan dari daya output yang dapat dibandingkan oleh sel surya dengan daya yang diperoleh dari konversi sinar matahari sebagai daya input, dapat ditentukan dengan :

$$\eta = \frac{P_{output}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}}$$

dengan :

$$P_{output} = \text{daya output sel fotovoltaik (watt)}$$

$$P_{input} = \text{daya yang diperoleh dari konversi radiasi sinar matahari (watt)}$$

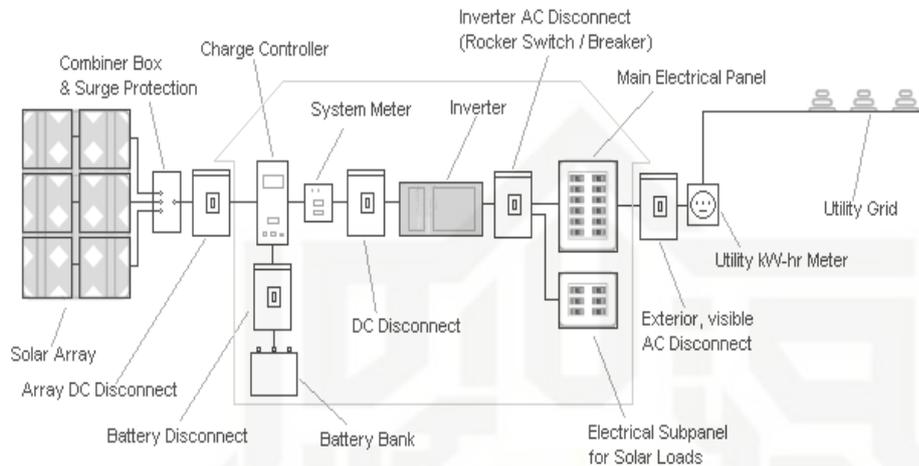
2.5 PLTS *Grid- Connected*

Sistem PLTS *Grid-Connected* atau dapat disebut PLTS *on-grid* pada dasarnya adalah menggabungkan PLTS dengan jaringan listrik (PLN). Sistem PLTS *Grid-Connected* bertujuan untuk menyediakan listrik yang langsung terhubung dengan jaringan listrik grid (PLN). Berdasarkan pola operasi sistem tenaga listrik ini dibagi menjadi dua yaitu:

2.5.1 Sistem dengan Penyimpanan (*Grid-Connected PV With A Battery Back Up*)

Sistem PLTS *Grid-Connected* ini dapat menggunakan baterai sebagai cadangan atau backup energi. Sistem ini disebut sebagai *grid connected PV system with battery backup*

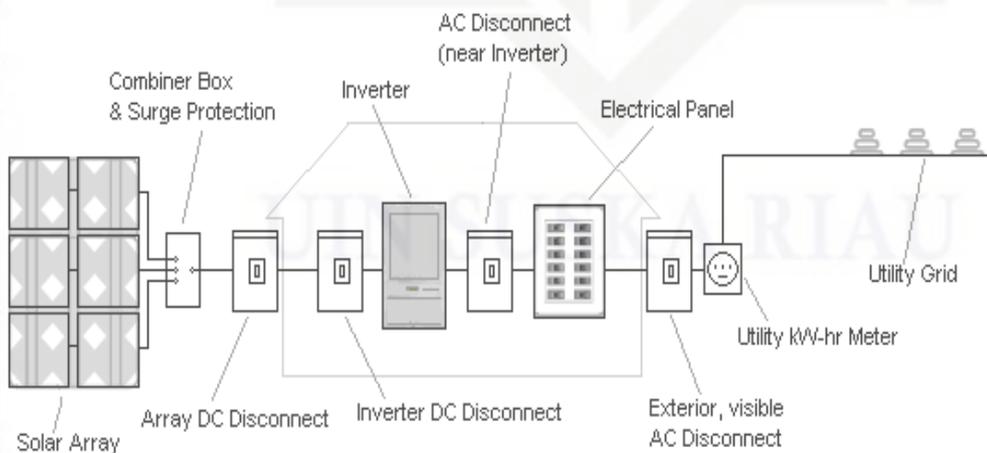
Sistem ini berfungsi sebagai *backup* energi listrik untuk menjaga kontinuitas operasional peralatan-peralatan elektronik. Jika suatu saat terjadi kegagalan pada suplai listrik PLN (pemadaman listrik) maka peralatan-peralatan elektronik dapat beroperasi secara normal dalam jangka waktu tertentu tanpa adanya gangguan.



Gambar 2.4 *Grid-Connected PV With A Battery Back Up*
 (Sumber: www.energy.wsu.edu)

2.5.2 Sistem Tanpa Baterai (*Grid-Connected PV Without A Battery Back Up*)

Sistem PLTS ini tidak menggunakan *battery* sebagai backupnya. Berdasarkan aplikasinya sistem ini dibagi menjadi dua yaitu, *Grid-connected distributed PV* dan *Grid-connected centralized PV* (Setiawan, 2014).



Gambar 2.5 *Grid-Connected PV Without A Battery Back Up*
 (Sumber: www.energy.wsu.edu)

2.6 Komponen- Komponen PLTS *Grid-Connected*

PLTS *grid-connected* umumnya terdiri dari komponen- komponen sebagai berikut :

2.6.1 Modul Surya

Modul surya 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*.

Sebagai sebuah komponen penghasil listrik, modul surya memiliki karakteristik tertentu berdasarkan parameter terukur sebagai berikut (ABB, 2010):

- Peak Power* (W_p), menyatakan daya maksimum yang terjadi pada titik lutut (*knee point*) kurva I-V.
- Peak voltage* (V_{mp}), menyatakan nilai tegangan pada titik lutut kurva I-V.
- Open voltage* (V_{oc}), menyatakan nilai tegangan pada saat terminal positif dan negatif tidak ada beban atau terbuka.
- Peak current* (I_{mp}), menyatakan besarnya arus yang mengalir pada titik lutut kurva I-V.
- Short circuit current* (I_{sc}), menyatakan arus yang mengalir pada saat terminal positif dan negatif dihubungkan singkat.
- Standard Test Conditions* (STC), memberi keterangan bahwa modul surya diuji dengan kondisi test tertentu, seperti: iradiasi = 1000 W/m^2 ; temperatur = 25°C .

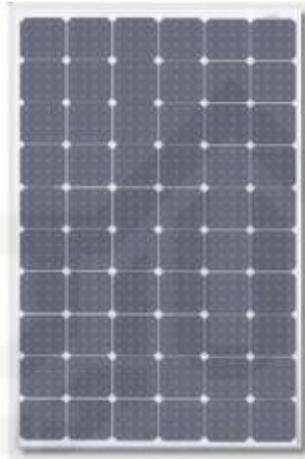
2.6.1.1 Jenis Modul Surya

a. *Monocrystalline*

Jenis ini terbuat dari batangan kristal yang diiris tipis – tipis. Karena sel surya berasal dari satu induk batangan kristal, maka setiap potongan memiliki karakteristik yang identik dengan yang lainnya. Sehingga efisiensi *monocrystalline* mampu mencapai 15 – 20 %, oleh karena itu harga *monocrystalline* lebih mahal daripada *Polycrystalline*.

Monocrystalline menyerap panas lebih banyak dari *polycrystalline*, itu artinya suhu permukaan *monocrystalline* akan lebih tinggi dibandingkan dengan *polycrystalline* pada lingkungan yang sama. Semakin tinggi suhu *crystal silicon*, semakin menurun kemampuannya. Pada suhu tinggi performa *monocrystalline* tidak sebaik *polycrystalline*, artinya akan terjadi penurunan performa yang lebih banyak pada modul *monocrystalline*.

Kelemahan dari sel surya tipe *monocrystalline* adalah potongan dari setiap sel suryanya berupa segi empat atau bulat. Sehingga apabila disusun bersama sel surya yang lainnya akan membentuk ruang kosong. Tentu saja hal ini akan mengurangi kerapatan sel surya yang apabila disusun pada skala besar menimbulkan ruang sisa tidak berguna yang cukup banyak.



Gambar 2.6 *Monocrystalline*
(Sumber: <http://www.renugen.co.uk>)

b. Polycrystalline

Jenis ini terbuat dari beberapa batang kristal silikon yang dilebur kemudian dituang dalam cetakan yang umumnya berbentuk persegi. Kemurnian kristal silikon *polycrystalline* tidak setinggi *monocrystalline* sehingga efisiensinya sekitar 13 – 16 %.

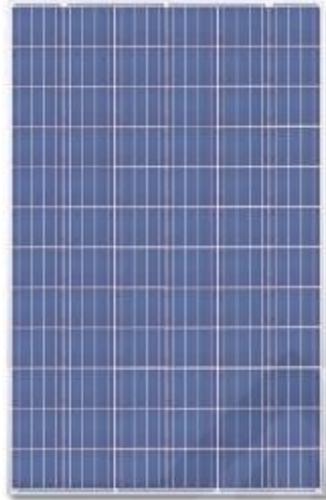
Tipe ini memerlukan luas permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan jenis *monocrystalline* untuk menghasilkan daya listrik yang sama. Akan tetapi dengan potongan yang berbentuk persegi, *polycrystalline* dapat disusun lebih rapat dari pada *monocrystalline*, sehingga mengurangi ruang – ruang kosong antar sel surya. Selain itu, *Polycrystalline* mempunyai toleransi terhadap suhu yang rendah. Sehingga, dalam performanya, *polycrystalline* tidak menyerap panas dan suhu permukaan *polycrystalline* tidak panas dan dapat tetap bekerja secara maksimal.

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.



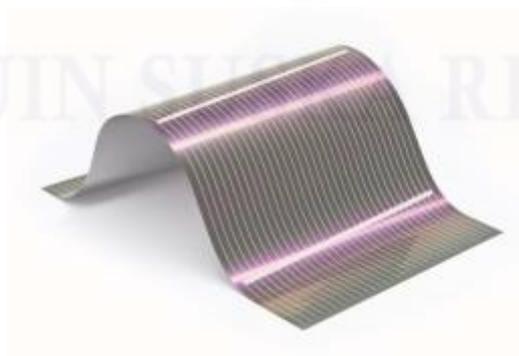
Gambar 2.7 *Polycrystalline*
(Sumber: <http://webportal-solfex.co.uk/>)

c. ***Thin Layer (FILM) Cells***

Merupakan modul surya (dua lapisan) dengan struktur lapisan tipis mikrokrystal-silicon dan amorphous dengan efisiensi modul hingga 8.5% sehingga untuk luas permukaan yang diperlukan daya yang dihasilkan lebih besar daripada *monocrystalline & polycrystalline*.

Jenis sel surya ini mempunyai kerapatan atom yang rendah, sehingga mudah dibentuk dan dikembangkan ke berbagai macam ukuran dan potongan dan secara umum dapat diproduksi dengan biaya yang lebih murah. Sel surya ini dibuat dengan menambahkan satu atau beberapa lapisan tipis ke dalam lapisan dasar. Sel surya jenis ini sangat tipis sehingga ringan dan fleksibel. Oleh sebab itu sering disebut juga sebagai TFPV (*thin film photovoltaic*).

Inovasi terbaru adalah *Thin Film Triple Junction PV* (dengan tiga lapisan) dapat berfungsi sangat efisien dalam udara yang sangat berawan dan dapat menghasilkan daya listrik sampai 45% lebih tinggi dari modul jenis lain dengan daya yang setara.



Gambar 2.8 *Thin Layer (FILM) Cells*
(Sumber: <http://materia.nl>)

2.6.2 Inverter

Inverter adalah komponen elektronika pendukung PLTS untuk mengubah arus searah DC (*direct current*) menjadi arus bolak-balik AC (*alternating current*) 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 sekitar 90% (Hanna, 2012).

2.6.2.1 Jenis-Jenis Inverter

Terdapat banyak jenis inverter yang beredar dipasaran. Jenis-jenis ini mempunyai beberapa perbedaan mulai dari yang digunakan untuk *single module* hingga *arrays* dan yang digunakan untuk distribusi dalam kW atau mW. Ada tiga jenis inverter yang sering digunakan yaitu *string*, *central* dan *micro inverter*. Jenis ini dibedakan pada penggunaan jenis kabel yang digunakan:

a. Inverter Mikro (*Micro Inverter*)

Inverter mikro atau juga yang biasa disebut inverter modul dipasang dibagian belakang setiap modul surya. Inverter ini diproduksi di kisaran 100-300 W. Keuntungan inverter mikro adalah menggunakan kabel DC yang sedikit karena keluaran dari modular merupakan daya AC yang langsung diparalelkan pada setiap modul dan kemudian disambungkan ke jaringan. Keuntungan lainnya ialah, apabila untuk penambahan daya, hanya dengan menambahkan modul surya dan inverternya saja dan tidak perlu membongkar.



Gambar 2.9 Inverter Mikro
(Sumber: //tandem-solar-systems.com)

b. Inverter string (*String Inverter*)

String inverter biasanya digunakan untuk pemasangan jaringan tersambung skala kecil (10kW atau kurang). Biasanya kapasitas *string inverter* ialah 1 kW sampai kira-kira 12 kW, ketika PLTS berkapasitas di atas 5 kW maka inverter *multi string* atau inverter terpusat dapat

digunakan sebagai inverter alternatif. Setiap inverter *on-grid* memiliki fungsi sebagai MPPT dan tegangan DC inputnya bisa mencapai 1000V DC.



Gambar 2.10 *String Inverter*
(Sumber: <http://solarprofessional.com>)

c. Inverter Terpusat (*Central Inverter*)

Inverter terpusat ini biasanya digunakan untuk daya PLTS yang besar, sebagai contoh inverter ini digunakan pada daya dari 30 kWp (fronius) dan dari 100kWp (SMA). Inverter terpusat ini sama halnya dengan inverter string dan multi-string namun yang membedakan dengan inverter terpusat ialah array pada PLTS dapat dibagi menjadi beberapa *Sub-array*.



Gambar 2.11 *Central Inverter*
(Sumber: <http://solarprofessional.com>)

2.6.2.2 Konfigurasi Inverter

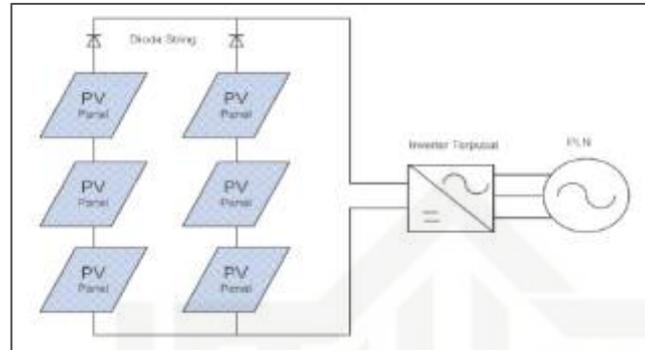
a. Konfigurasi Inverter Terpusat

Konfigurasi Inverter Terpusat yang relatif sederhana dari pembangkit listrik tenaga surya fotovoltaik. Topologi penyambungan pembangkit tipe ini paling murah, karena hanya memiliki satu inverter DC ke AC terpusat untuk string modul fotovoltaik yang dihubungkan secara seri dan paralel untuk menghasilkan tegangan dan arus DC tertentu. Kelemahan lain

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.

Hak cipta milik UIN Suska Riau
 State Islamic University of Sunan Kalijaga Semarang

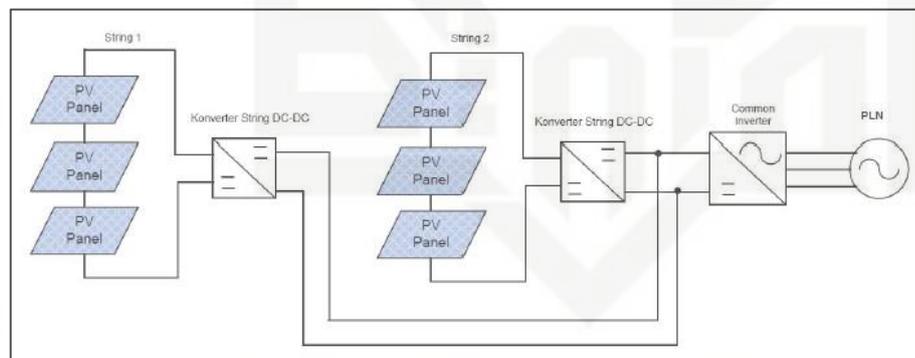
adalah permasalahan keandalan sistem, dengan adanya gangguan atau kerusakan pada inverter maka akan menyebabkan seluruh pembangkit berhenti beroperasi.



Gambar 2.12 Konfigurasi Fotovoltaik Inverter Terpusat
(Sumber: PLN, 2014)

b. Konfigurasi Multi - String Inverter

Multi string inverter menggunakan beberapa string dengan sistem pelacak MPP yang terpisah (menggunakan DC/DC konverter) terhubung ke inverter DC/AC umum untuk menghasilkan AC yang disalurkan ke sistem distribusi. Konfigurasi ini memungkinkan untuk mengoptimalkan efisiensi pengoperasian setiap string secara terpisah, dan integrasi berbagai orientasi surya untuk memaksimalkan produksi energi.



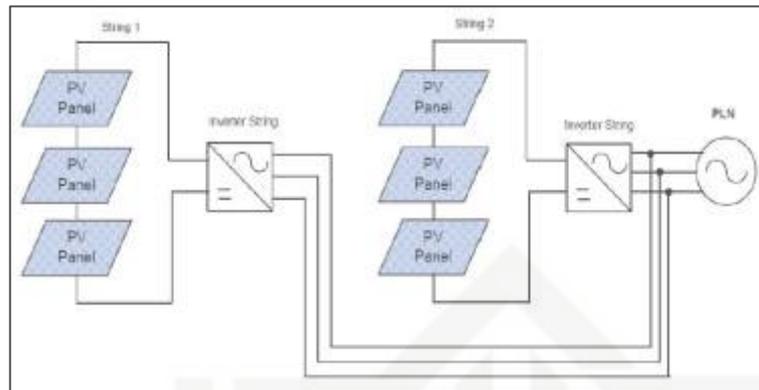
Gambar 2.13 Konfigurasi *Multi-String* Inverter
(Sumber: PLN, 2014)

c. Konfigurasi Inverter Multi String

Inverter String Array mengilustrasikan yang mana rangkaian seri tunggal modul fotovoltaik dihubungkan secara seri dan string terhubung ke inverter tunggal dan ada satu inverter untuk setiap string. Keuntungan dari konfigurasi ini adalah bahwa string inverter memiliki kemampuan pelacakan titik daya maksimum *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) secara terpisah dari setiap string Fotovoltaik untuk mengurangi kerugian dari

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.

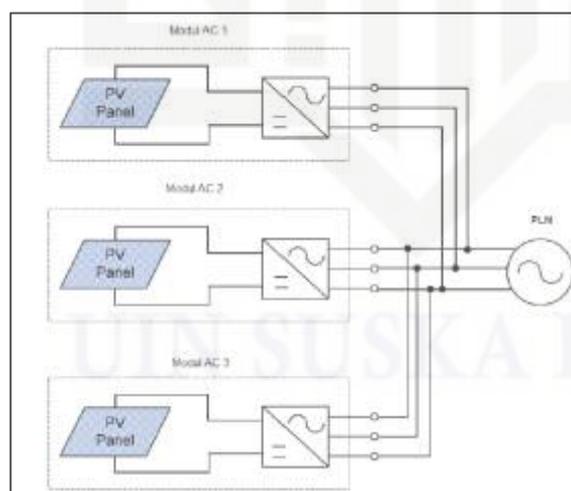
ketidakcocokan dan bayangan parsial sehingga dapat meningkatkan produksi energi. Kelemahan konfigurasi ini adalah diperlukan jumlah inverter yang lebih banyak.



Gambar 2.14 Konfigurasi *Inverter-String* Inverter
(Sumber: PLN, 2014)

d. Konfigurasi Inverter Modul

Konfigurasi inverter modul dimana setiap modul fotovoltaik memiliki inverter DC/AC dan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Keuntungan dari konfigurasi ini adalah desain yang sangat fleksibel sehingga mudah untuk menambahkan inverter guna meningkatkan kapasitas pembangkit listrik. Selain itu konfigurasi ini meningkatkan produksi energi dengan cara mengurangi kerugian energi dari ketidaksesuaian inverter dan meningkatkan keandalan. Kelemahan dalam konfigurasi ini adalah diperlukan biaya tambahan untuk inverter dan pemeliharaan yang relatif lebih kompleks.



Gambar 2.15 Konfigurasi *Inverter Modul AC*
(Sumber: PLN, 2014)

2.7 Keseimbangan Sistem (*Balance of System*)

Dalam sistem PLTS, terdapat komponen utama yaitu modul surya dan inverter. Selain dari pada itu, juga terdapat komponen penunjang. Komponen penunjang ini bertujuan untuk mmerberikan kinerja yang maksimal pada PLTS. Keseimbangan peralatan dan komponen

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.

pendukung yang lainnya haruslah terpasang dengan baik. Jika tidak, kinerja dan kehandalan sistem akan bermasalah. Kunci keseimbangan sistem pada komponen termasuk:

2.7.1 Kabel

Dalam sistem *grid connected* membutuhkan kabel terhubung, yaitu:

a. Kabel DC

Kabel DC adalah kabel yang berada pada sistem DC pada PLTS. Kabel DC terdiri dari kabel *string*, kaber *Array* dan kabel inverter DC .

b. Kabel AC

Kabel AC yang menyuplai inverter ke kWh meter menuju isolator AC inverter . Tegangan yang keluar dari inverter adalah 220V – 240V satu fasa. Sedangkan untuk sistem yang besar inverter yan digunakan adalah 380V AC tiga fasa.

c. Kabel Pembumian

Kabel yang digunakan untuk pembumian adalah sama halnya dengan kabel yang digunakan untuk pembumian instalasi bangunan.

d. Kotak Persimpangan *Array*

Array terdiri dari sejumlah *string* paralel, maka kabel pada *array* akan saling berhubungan di sebuah kotak persimpangan (*junction box*). Terkadang disebut dengan *DC combiner box*. Sebuah kotak persimpangan umumnya juga terdapat di rumah untuk instalasi skring pada PLTS.

2.7.2 Perangkat Pemutus

a. Isolator DC pada PLTS

Isolator DC pada PLTS ialah sebuah alat yang sama jenisnya dengan *DC circuit breaker*. Alat ini digunakan sebagai saklar penghubung dan memutus. Namun, harus dipasang pada arus DC. Alat ini biasanya dipasang diantara PLTS dan inverter. Alat ini terbagi dua yaitu isolator yang memiliki polaritas dan isolator yang tidak memiliki polaritas.

b. Isolator AC pada PLTS

Peletakan isolasi saklar manual harus dipasang diantara inverter dan jaringan listrik. Ini di anjurkan untuk menempatkan bahwa sisi inverter yang terdapat perangkat metering PLTS.

2.7.3 Proteksi Petir

Ketika proteksi petir terpasang, maka peralatan proteksi dipasang pada kedua sisi dari DC inverter ke AC inverter. Posisi yang tepat untuk pemasangan peralatan proteksi harus sesuai dengan rekomendasi pabrik. Perangkat dapat dihubungkan sebagai berikut:

1. Pada sisi DC
 - a. Antara negatif dan pembumian
 - b. Antara positif dan pembumian
 - c. Antaranegatif dan positif
2. Pada sisi AC
 - a. Antara fasa dan pembumian
 - b. Antara netral dan pembumian
 - c. Antara aktif dan netral

2.7.4 Meteran

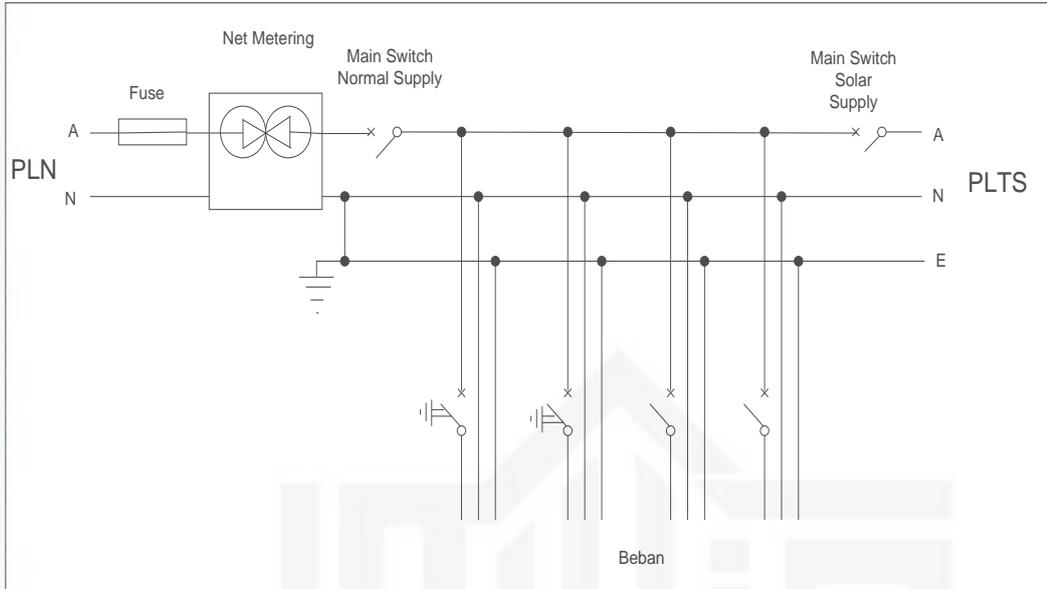
Meter listrik mencatat energi listrik dalam kWh yang dikonsumsi oleh beban di dalam suatu gedung. Meteran ini mencatat jumlah energi yang dikonsumsi dalam satuan kWh. Listrik yang digunakan oleh konsumen kemudian ditagih dan untuk penagihan listrik ini berdasarkan tarif yang ditetapkan.

Ada banyak jenis meter yang tersedia. Meteran sederhana adalah perangkat mekanis dengan disk yang berputar dikalibrasi yang berputar Ketika listrik sedang dikonsumsi. Sebuah meter digital yang lebih maju dapat 'dia waktu hari bahwa energi adalah Dikonsumsi. Jenis meteran digunakan ketika tarif listrik bervariasi pada waktu hari yang berbeda.

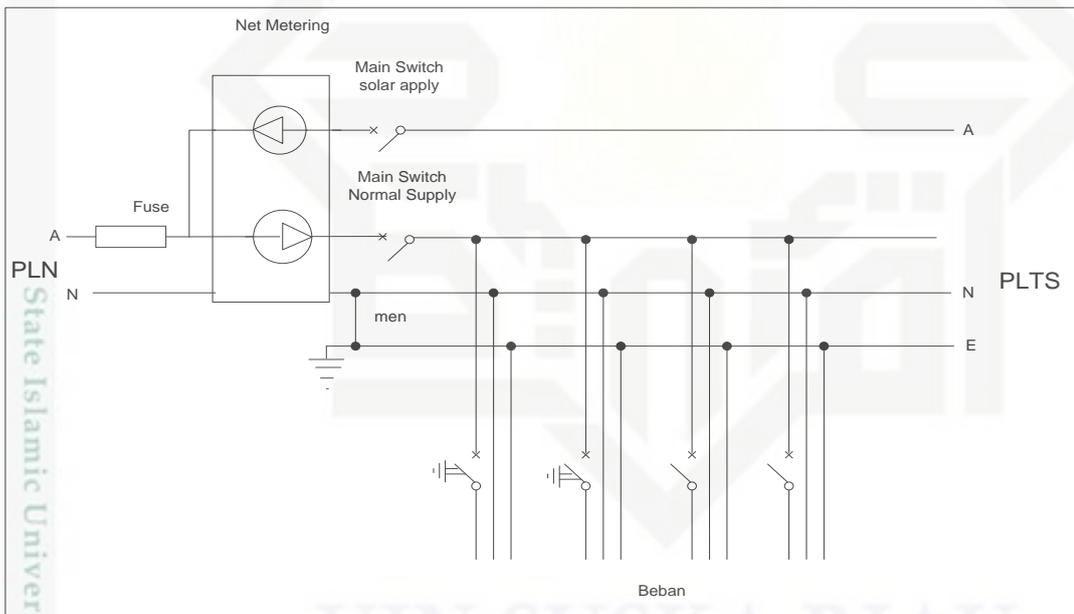
Jenis meter yang akan dipasang Dengan sistem PV *grid-connected* tergantung pada persetujuan pembelian dengan distributor listrik.

Untuk memungkinkan konsumen untuk secara efektif menggunakan sistem PV pada seluruh produk dan hanya akan dikenakan tarif saat mereka mengkonsumsi energi listrik dari jaringan listrik, mengharuskan pelaksanaan perjanjian metering bersih. dalam sistem perumahan, di mana puncak profil beban yang sering terjadi di malam hari, listrik tenaga surya yang dihasilkan oleh sistem akan diekspor ke grid dan pada sore hari konsumen akan menggunakan listrik dari jaringan. Pengaturan metering bersih memungkinkan konsumen hanya akan dikenakan biaya untuk setiap kelebihan listrik yang dikonsumsi hari itu dari jaringan. Secara efektif berarti bahwa distributor listrik dan pembelian listrik dengan tarif unit yang sama atau tingkat yang mereka jual ke konsumen.

- 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 2.16 Sitem Instalasi Sistem PLTS *On Grid* Yang Menggunakan Instalasi *Net Metering*



Gambar 2.17 Sitem Instalasi Sistem PLTS *On Grid* Yang Menggunakan Instalasi *Gross Metering*
(Sumber: GSES, 2013)

2.8 Rugi-rugi pada PLTS *Grid-Connected*

Semua energi matahari yang terdapat pada PLTS tidak sepenuhnya dikirim ke jaringan (*grid*). Hal ini disebabkan oleh faktor pengurangan (*losses*) yang mempengaruhi konversi listrik yang dihasilkan oleh PLTS ke jaringan PLN (*grid*). Setiap faktor-faktor tersebut dapat mengurangi efisiensi dari keseluruhan sistem PLTS. Faktor tersebut yaitu:

2.8.1 Temperatur Modul Surya

Pada saat terjadi temperatur yang tinggi, sel-sel surya kurang efisien. Energi keluaran dari modul dipengaruhi oleh temperatur pada sel-sel surya yang beroperasi. Saat panas sel-sel surya meningkat, tegangan yang melintasi setiap sel akan menurun sehingga daya pada sel juga akan menurun. Besarnya efek turunnya tegangan tersebut tergantung pada tipe dari sel surya, rata-rata koefisien suhu pada modul *crystaline* dapat mencapai $0.5 \% V/^{\circ} C$ sedangkan rata-rata pengurangan modul *thin film* mencapai $0.1-0.4\% V/^{\circ} C$.

2.8.2 Kotoran (*Soilage*)

Kotoran dapat menumpuk di atas dipermukaan modul surya, tidak semua cahaya matahari sampai ke sel pada modul dan berakibat pada energi keluaran yang menurun. Seberapa banyak kotoran mempengaruhi energi keluaran akan bergantung pada sumber dan faktor-faktor yang mempengaruhi efek kotoran.

Kotoran (*soilage*) adalah bentuk lain dari *shading* terjadi ketika sebuah kotoran terendapkan pada modul. Kotoran tidak membuat sistem berhenti berfungsi sepenuhnya. Sistem masih bekerja namun dengan output keluaran PLTS sedikit berkurang. Biasanya curah hujan akan mencuci modul untuk mencegah akumulasi kotoran yang berada pada modul, namun di daerah-daerah yang sangat berdebu dan kering mungkin perlu untuk membersihkan modul menggunakan selang air.

Kotoran modul surya dapat mengurangi efisiensi keluaran PLTS. Kotoran yang terdapat pada modul tidak dapat diukur secara pasti namun, hal ini dapat diasumsikan jika lokasi sangat kotor atau berdebu dengan sedikit hujan, kerugian efisiensi 10%, yang berarti efisiensi yang dihasilkan dari 90% atau mungkin kurang dan jika ada hujan biasa maka faktor 0,95 atau di atas diharapkan. (GSES, 2013)

2.8.3 Toleransi Pabrik (*Manufacture Tolerance*)

Modul diproduksi dengan rating daya yang ditentukan dan spesifikasi pabrikan. Sebuah modul memiliki toleransi pabrikan yang biasanya terdapat pada data sheet produk toleransi pabrikan pada modul menunjukkan potensi 'negatif' kehilangan daya. Misalnya spesifikasi pabrikan $160W \pm 4\%$ output solar modul / *array* harus didasarkan pada jumlah minimum daya dikutip untuk PV, yaitu contoh di atas: $160 \text{ Watt} - 4\%$. dikutip 4% loss contoh yang sama efisiensi 96%. maka sebuah modul hanya bisa memproduksi 96% dari kinerja maksimal modul tersebut. Simbol f_{mm} digunakan pada faktor toleransi pabrikan dan mewakili presentasi kehilangan.

2.8.4 Bayangan (*Shading*)

Bayangan pada *array* yang terjadi disiang hari akan mempengaruhi daya keluaran. Analisa rinci pada setiap terjadinya bayangan pada *array* diharapkan dapat dilakukan untuk menghindari terjadinya bayangan pada *array*. Efek bayangan dapat mengurangi radiasi matahari dan berakibat pada penurunan energi yang dihasilkan oleh sistem. Namun, ketika bayangan hanya terjadi di sebagian *array*, maka akan ada pengurangan tegangan maksimum. Sehingga, pengurangan pada energi maksimum akan terjadi pada *array*. Efek bayangan dapat menimbulkan permasalahan apabila:

1. Jika terjadi bayangan pada *array*, tegangan maksimum yang akan masuk ke inverter mungkin akan menurun dan juga akan sangat mengurangi *output* inverter.
2. Jika menggunakan *string* inverter dan terdapat beberapa *string* modul surya, *shading* pada satu *string* dapat mempengaruhi *output* *string* lainnya. Inverter dapat melacak tegangan yang rendah untuk mendapatkan arus yang lebih tinggi.

Dalam kedua situasi diatas, sulit untuk memprediksi *output* keluaran pada *array*, dan sebagian inverter memiliki respon yang berbeda. Cara lain untuk menghindari masalah tersebut adalah menemukan dan memasang *array* pada daerah yang sedikit bahkan tidak ada bayangan pada siang hari.

2.8.5 Efisiensi Inverter

Setiap inverter mempunyai efisiensi yang ditunjukkan pada spesifikasi dan data sheet produk. Efisiensi inverter tergantung pada input sebenarnya dari *array*. Untuk menghindari kurang efisiensinya maka kita harus memperhatikan input yang masuk dari *array*, karena jika input berlebih maka efisiensi berkurang. Selain itu, karena efisiensi inverter secara langsung berkaitan pada suhu operasi maka, saat pemasangan inverter penting dilakukan untuk tidak memasang inverter dibawah matahari langsung. Selain itu, pada saat pemasangan inverter haruslah memiliki ventilasi yang tepat agar inverter dapat beroperasi dengan efisiensi maksimum

2.8.6 Pengurangan Sistem

Output daya dari PLTS akan mengurangi perlahan-lahan dari waktu ke waktu, biasanya sebesar 0,5% per tahun. Ini berarti bahwa sistem akan kehilangan efisiensi 12% setelah 25 tahun beroperasi. Garansi pada output daya dari modul menjamin degradasi kurang dari 0,9% per tahun, sehingga menghasilkan efisiensi minimal 80% setelah 25 tahun.

Tabel 2.1 Pengurangan sistem dari waktu ke waktu.

Degradation	Year of Operation					
	0	5	10	15	20	25
0.5% pa	100%	98%	95%	93%	90%	88%
0.9% pa	100%	96%	91%	87%	83%	80%

Sumber : Regen Power (2011)

2.9 Perancangan Sistem PLTS *Grid-Connected*

Dalam perancangan ada beberapa kriteria penentuan desain pada penelitian PLTS sistem PLTS ada beberapa tahap yang digunakan :

2.9.1 Penilaian Lokasi PLTS

Karakterisasi situs dan Penilaian Sebuah karakterisasi situs rinci memberikan informasi yang diperlukan untuk desain sistem PLTS . Bagian pertama dari penilaian situs adalah untuk mengkarakterisasi kondisi fisik lokasi PLTS: Menentukan lintang, bujur, ketinggian, orientasi atap gedung , denah atap, menunjukkan atap yang digunakan untuk instalasi PLTS, menghitung total luas, kemiringan dan metode pemasangan.

2.9.2 Penilaian Radiasi Matahari

Ada dua sumber utama data untuk radiasi matahari di permukaan bumi yaitu pengukuran secara langsung dan perhitungan berdasarkan data satelit. Radiasi matahari adalah jumlah keseluruhan dari energi matahari yang diterima pada lokasi tertentu, biasanya dalam satuan kWh/m²/hari. Data insolasi matahari lebih digunakan untuk merancang sistem PLTS. Perhitungan radiasi matahari berdasarkan perhitungan secara global atau langsung yang diambil selama siang hari. Perhitungan biasanya menggunakan *pyranometer* atau *pyrheliometer*. Dibeberapa lokasi, data ini dikumpulkan lebih dari 20 tahun.

Dalam perhitungan berdasarkan data satelit yang terdapat pada *meteorological database*, termasuk *database online* yang memiliki informasi tentang radiasi matahari ini. Diantaranya adalah *Photovoltaic Geographical System (PVGIS)* dan *database* dari *Surface Meteorological and Solar Energy (SMSE)* dari NASA.

2.9.3 Analisa *Shading*

Sangat penting untuk memahami bayangan (*shading*) pada atap, terutama di daerah perkotaan di mana bangunan sekitarnya dan struktur dapat menghasilkan bayangan di atas atap. Bahkan sebagian kecil dari bayangan (*shading*) pada PLTS dapat secara signifikan mengurangi *output* energi yang dihasilkan. Idealnya, semua bagian atap harus tidak terdapat bayangan selama minimal 6 jam sehari antara itu 09:00-03:00. Analisis *shading* harus

dilakukan untuk semua jam sinar matahari sepanjang tahun. Hal ini membantu dalam pemilihan lokasi terbaik untuk memasang modul surya dan memberikan estimasi yang lebih akurat dari output tahunan dari sistem PLTS.

2.9.4 Pemilihan Modul Surya

Ada tiga jenis utama dari modul surya PV yang tersedia di pasar komersial yaitu *monocrystalline*, *polycrystalline* dan *Thin film*. Pemilihan modul surya sangat penting dalam menentukan *design* sistem, pemilihan modul surya ditentukan berdasarkan efisiensi modul, area modul dan biaya.

2.9.5 Sistem Pemasangan (*Mounting System*)

Dua jenis utama dari sistem pemasangan PLTS yang digunakan yaitu sistem pemasangan di atap dan di tanah. Pada penelitian ini pemasangan yang digunakan di atap gedung (*rooftop*).

2.9.6 Pemilihan Inverter

Pemilihan inverter berkaitan dengan kapasitas modul yang terpasang. inverter mengubah listrik DC dari PV array surya untuk listrik AC dengan memaksimalkan output PLTS. Ada tiga jenis inverter surya umum digunakan: inverter string, inverter central dan inverter mikro.

2.9.7 *Array sizing*

Ketika merancang sebuah sistem PLTS *grid-connected* jenis modul PV yang dipilih dan jenis inverter yang dipilih harus diperhitungkan. Untuk menghasilkan daya output yang optimal pada PV *array* harus disesuaikan dengan inverter. Langkah-langkah berikut ini digunakan untuk menentukan ukuran *array* (GSES, 2013).

1. Menyesuaikan *array* dengan spesifikasi tegangan inverter,
2. Menyesuaikan *array* dengan *current rating* inverter.
3. Menyesuaikan *array* dengan *power rating* inverter.

2.9.7.1 Menyesuaikan *Array* dengan Spesifikasi Tegangan Inverter

- a. Minimum tegangan Inverter

Modul surya memiliki tegangan terendah di cuaca hangat. *array* harus dirancang sehingga tegangan V_{MP} *array* pada suhu operasi tertinggi tidak jatuh di bawah tegangan MPPT minimum pada inverter (GSES,2013). Langkah pertama adalah untuk

menemukan tegangan modul pada suhu modul maksimum dengan menggunakan persamaan (2.1) :

$$V_{MP} = V_{MP-STC} - [\gamma_V \times (T - T_{STC})] \quad (2.1)$$

Dimana :

V_{MP-STC} = Tegangan MPP pada kondisi pengujian standar (STC),

γ_V = Koefisien suhu V_{MP} ,

T = Suhu modul pada suhu udara ambien maksimum

T_{STC} = Suhu di STC

b. Maksimum Tegangan Inverter

Jumlah maksimum modul dihitung dengan suhu terendah ketika tegangan V_{OC} modul berada pada titik tertinggi. Tegangan V_{OC} digunakan sebagai pengganti tegangan V_{MP} karena tegangan V_{OC} lebih tinggi dan sebagai tegangan maksimum yang disediakan untuk inverter ketika *array* terhubung. Tegangan V_{OC} Modul adalah nilai pertama yang dihitung dengan persamaan (5.9):

$$V_{OC} = V_{OC-STC} - [\gamma_{VOC} \times (T - T_{STC})] \quad (2.2)$$

Dimana :

V_{OC-STC} = Tegangan rangkaian terbuka di STC,

γ_{VOC} = koefisien suhu untuk V_{OC} dan

γ_V = Koefisien suhu V_{OC} ,

T = Suhu modul diharapkan terendah di suhu yang ditentukan.

T_{STC} = Suhu modul STC

Perhitungan untuk V_{OC} tidak diukur untuk modul PV selama musim dingin atau musim panas, nilai STC karena itu digunakan bersama dengan faktor keamanan 5% untuk menghitung tegangan yang lebih tinggi.

$$V_{inverter} = V_{max\ input} \cdot 0.95 \quad (2.3)$$

Jumlah maksimum modul dihitung persamaan (2.4) dengan membagi tegangan inverter dengan V_{oc} modul.:

$$Jumlah\ modul = \frac{V_{inverter}}{V_{OC\ Mod}} \quad (2.4)$$

2.9.7.2 Menyesuaikan *Array* dengan *Current Rating Inverter*

Hal ini penting untuk memastikan bahwa arus maksimum yang dihasilkan oleh *array* lebih rendah dari arus maksimum *input* inverter. Jumlah *string* paralel *array* dari dihitung dengan menggunakan arus hubungan singkat (I_{SC}).

$$I_{SC\ MOD} = I_{SC\ STC} - [\gamma_{VOC} \times (T - T_{STC})] \quad (2.5)$$

Dimana:

- $I_{SC\ STC}$ = Tegangan rangkaian terbuka di STC,
- γ_{VOC} = Koefisien suhu untuk V_{OC}
- T = Suhu modul diharapkan terendah di suhu yang ditentukan.
- T_{STC} = Suhu modul STC

2.9.7.3 Menyesuaikan *Array* dengan *Power Rating Inverter*.

Ketika mencocokkan *array* ke inverter, perhitungan untuk arus, tegangan dan daya perlu dilakukan untuk memastikan ukuran yang benar dari sistem PV. Perhitungan arus dan tegangan dilakukan untuk menghitung jumlah string dan jumlah modul dalam sebuah string. Perhitungan daya dilakukan untuk menemukan jumlah maksimum modul diperbolehkan dalam sistem (GSES, 2013). Dengan inverter dan modul yang dipilih, jumlah maksimum modul dalam *array* adalah:

$$\text{Ukuran array} = \frac{\text{Maksimum daya inverter}}{\text{Daya modul}} \quad (2.6)$$

2.9.8 Sistem Proteksi

Menurut draft IEC 62548: *Design requirements for Photovoltaic (PV) arrays*, *fuse* (*DC isolator*) pada PLTS dihitung pada rating :

$$1.5 \times I_{SC} < I_{TRIP} < 2.4 \times I_{SC}$$

Perangkat proteksi *Sub- Array* ditentukan pada nilai :

$$1.25 \times I_{SC\ SUB\ ARRAY} < I_{TRIP} < 2.4 \times I_{SC\ SUB\ ARRAY}$$

Misalkan I_{sc} dari modul adalah 5.73A maka *fuse* string yang harus diperoleh antara 8.59A dan 13.75A maka pada kondisi ini dipilih sekering (*fuse*) 10 A

Untuk *sub-array* dengan 10 string terhubung paralel sirkuit pemutus (*circuit breaker*) *sub-array* diperoleh antara 71.62A dan 137.52A oleh karena tu dapat dipilih *circuit breaker* 72A.

Untuk *sub-array* dengan 9 string terhubung paralel, *circuit breaker* untuk perlindungan *sub-array* harus berada antara 64.46A dan 123.76A. Pada kondisi ini, dipilih *circuit breaker* 65A. Catatan: juga bisa memilih untuk memiliki perangkat 72A.

PV Array DC isolator akan terletak pada kotak persimpangan array sebelum masuk ke inverter. maka arus minimal DC isolator ditentukan pada *rating* nilai :

$$1.25 \times I_{SC\ ARRAY} < I_{TRIP}$$

Ini akan memperoleh peroleh *circuit breaker* setidaknya 208A.

Menurut Draft IEC 62.548: *Design requirements for Photovoltaic (PV) arrays*, tegangan semua perlindungan dan perangkat pemutusan, serta kabel, tegangan maksimum $V_{DC\ ARRAY}$ ditentukan pada suhu minimum.

$$V_{OC\ ARRAY} = No. Mod \times Max V_{oc} modul \tag{2.7}$$

2.9.9 Cable Sizing

Kabel adalah bagian penting dari desain sistem PLTS, baik untuk alasan keselamatan dan efisiensi. Ukuran kabel harus benar sesuai konduktor dan isolasi apabila kabel berukuran dibawah kemampuannya maka kabel dapat menyebabkan bahaya kebakaran. ukuran kabel yang benar adalah akan minimal drop tegangan dan ukuran kabel tidak lebih besar saat ini dalam kabel tidak akan lebih besar dari kemampuan kabel. Ada arus dan tegangan di berbagai bagian dari sistem PV yang berbeda. Oleh karena itu kabel sistem PV dibagi menjadi string, array dan kabel AC (GSES,2013)

$$A = \frac{\rho l \times I \times 2}{V_d} \tag{2.8}$$

Dimana:

- ρ = Resistivitas kawat tembaga 0,0183 $\Omega\ mm^2/m$
- l = Panjang kabel (meter)
- I = Arus melalui kabel (ampere)
- A = Luas penampang (mm^2)

2.10 Hasil Produksi Energi Sistem PLTS

Energi listrik yang dihasilkan dari sistem PLTS ditentukan oleh beberapa faktor utama yaitu ukuran PV array, radiasi matahari dan efisiensi sistem pada PLTS

2.10.1 Menentukan Output dari PLTS ke *Grid-connected*

Dalam merancang sistem PLTS penting untuk dapat memperkirakan hasil energi dari sistem itu. Energi yang dihasilkan oleh sistem PLTS tergantung pada sejumlah faktor, yaitu Ukuran PLTS, Jumlah iradiasi yang diterima dan total efisiensi sistem. Output energi rata-rata dari array PV dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$E_{array} = P_{stc} \times f_{man} \times f_{temp} \times f_{dirt} \times H_{tilt} \times N \quad (2.9)$$

Dimana:

- E_{array} = Rata-rata keluaran energi harian dari array PV (Wh)
- P_{STC} = Output daya dinilai modul STC (W)
- f_{temp} = Faktor Pengurangan Suhu, berdimensi
- F_{Man} = *De-rating* faktor untuk pembuatan toleransi,
- f_{dirt} = *De-rating* faktor untuk kotoran
- H_{tilt} = Iradiasi, di jam matahari puncak untuk orientasi tertentu dan sudut kemiringan. (1 PSH = 1 kWh / m²)
- N = Jumlah modul dalam array

2.11 Analisa Ekonomi pada Sistem PLTS *Grid-Connected*

Energi yang dihasilkan oleh matahari merupakan energi yang gratis dan memang telah disediakan oleh alam. Ini berarti tidak ada dana yang digunakan untuk membayar produksi energi matahari. Namun, harga sebuah sistem yang digunakan untuk memanfaatkan energi matahari menjadi sebuah energi listrik inilah yang membuat sistem PLTS mahal. Dimana didalamnya terdapat modul, inverter, pemasangan dan peralatan pendukung agar PLTS dapat beroperasi dengan sempurna.

2.11.1 Periode Pengembalian Sederhana

Metode pengembalian sederhana merupakan sebuah metode yang digunakan untuk menghitung ekonomi dari PLTS *on grid*. Rumus yang digunakan adalah:

$$T = \frac{C}{S} \quad (2.10)$$

Dimana:

T = periode dana kembali, selama 1 tahun

C = biaya modal awal bersih PLTS (biaya sistem dan kredit telah dikurangi)

S = biaya energi listrik yang terjual

2.11.2 Menentukan Biaya Sistem PLTS

Terdapat dua metode untuk menentukan biaya PLTS. Yang pertama mengacu pada sistem untuk biaya yang terpasang dan yang kedua menggunakan *life cycle cost* yang dibahas di atas. Masing-masing metode dapat digunakan untuk menjelaskan biaya sistem, atau alternatif untuk membandingkan biaya sistem yang berbeda.

a. Kalkulasi Biaya Per Watt

Biaya dalam rupiah per watt (Rp/Watt) yaitu menggunakan metode perhitungan dengan biaya awal dari PLTS. Metode ini hanya melihat dari biaya awal PLTS. Untuk menghitung biaya per watt menggunakan rumus:

$$Rp/W = \frac{\text{biaya awal PLTS (Rp)}}{\text{rata-rata daya puncak PLTS}} \quad (2.11)$$

b. Kalkulasi Biaya Per Kilowatt-Jam

Untuk menghitung biaya perunit daya yang dihasilkan dalam rupiah per kilo watt hour (Rp/kWh) maka dapat digunakan metode teknik *life cycle cost*. Untuk menentukan biaya Rp/kWh, kita harus mengetahui biaya yang dikeluarkan selama 20 tahun. Dan dibagi dengan total energi yang dapat dihasilkan selama 20 tahun.

$$Rp/kWh = \frac{\text{total biaya yang dikeluarkan selama 20 tahun}}{\text{total energi yang dihasilkan selama 20 tahun}} \quad (2.12)$$