



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Penelitian Tugas akhir ini didapat dari studi literatur yang didapat bersumber dari penelitian terdahulu tentang pemanfaatan tenaga surya sebagai sumber listrik yang telah dilakukan oleh beberapa pihak.

Akhir, dkk (2016) yang berjudul *Design and Performance Analysis of 100 KWp Rooftop Grid Connected Solar PV Plant in Surat Municipal Corporation*. Penelitian ini menghasilkan perancangan, dan spesifikasi teknis dari 100kW PLTS atap (*Rooftop*) terhubung *on-grid*. Sistem PLTS menggunakan modul surya *Policristaline* 100 KWp tersambung *on-grid*. Hasil perancangan PLTS 100 kWp menghasilkan 20 *string*, 250W x 400 modul dan 4 inverter string PLTS atap (*Rooftop*) di SMC, Tanpa efek *shading* energi dikirim ke *grid* 173.824KWh / tahun, performa ratio adalah 78,8%.

Tarigan, dkk (2015). *Techno-Economic Simulation of a Grid-Connected PV System Design as Specifically Applied to Residential in Surabaya, Indonesia*. Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi aspek teknis, ekonomi dan Lingkungan dari sistem PV untuk memasok dari kebutuhan energi listrik rumah tangga. 1 kWp *grid-connected* disimulasi dengan *software* PVsyt dan RETScreen. Rata-rata radiasi global harian tersedia di Surabaya adalah $5.17 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, atau sekitar $1\ 887 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$. Tingkat insolation tertinggi tercatat pada nilai $1005 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Berdasarkan potensi energi surya ini, 1 kWp *grid-connected* sistem PV bisa mengirim listrik ke *grid* sekitar sekitar $1,3 \text{ mWh} \cdot \text{yr}^{-1}$ rata-rata. Keuntungan investasi ini didapatkan setelah 17,6 tahun. Sistem PV *grid-connected* tidak layak secara finansial untuk memenuhi kebutuhan listrik perumahan di Surabaya. Sementara, dengan menerapkan *feed-in tarif* di USD 0,25 (kWh) -1 jangka waktu pengembalian modal akan sekitar 6,5 tahun. Tingkat pengurangan gas rumah kaca (GRK) dengan menerapkan sistem 1 kWp PLTS diperkirakan sekitar 1,66 kg SO₂; 3.46 kg NO_x; 1 295 kg CO₂; dan 91 kg abu per tahun.

Syah, (2014) berjudul Studi Kelayakan Penggunaan Atap Sel Surya sebagai Sumber Energi Listrik di Stasiun Kereta Api Jember. Penelitian yang telah dilakukan diketahui bahwa sistem PLTS tanpa baterai dengan pola menjual didominasi oleh sel surya yang terpasang pada atap Stasiun Kereta Api Jember. Produksi dari sel surya dikeluarkan



sebesar 96.963 kwh/yr atau sebesar 60 % dan pembelian energi dari PLN sebesar 65.595 kwh/yr atau sebesar 40 %. Sistem dengan komponen *photovoltaic*, *grid*, dan *converter* dengan sistem *grid sales* BEP bisa terjadi dalam jangka waktu proyek. BEP atau *Break Even Point* terjadi pada tahun ke-15. Sehingga pengembalian biaya investasi dan lainnya bisa tercapai sebelum jangka waktu proyek habis.

Albadi, dkk (2014) berjudul *Design of 50 KW Solar Rooftop System*. Penelitian ini bertujuan untuk merancang pembangkit listrik tenaga surya di atap gedung (*Rooftop*) perusahaan MJEC yang memiliki luas total 600 m². Perancangan PLTS kapasitas 50 kW menggunakan modul sebesar 250 W dan diperlukan sebanyak 200 panel. Perancangan PLTS di atap gedung MJEC akan cocok pada area 600 m² hal ini mempertimbangkan daerah yang potensi, jarak antar modul dan jarak aman pada batas atap. Perancangan sistem tenaga surya 50 kW dengan umur 25 tahun disimulasikan dengan RETScreen . Hasil simulasi menunjukkan biaya investasi sistem ini sebesar OMR 48.382. Arus kas kumulatif sistem ini sebesar 0.065 OMR/kWh. Berdasarkan pengurangan gas rumah kaca bersih tahunan yang sekitar 74 tCO₂ / tahun dan mengakibatkan pendapatan pengurangan gas rumah kaca tahunan sekitar 567 OMR. Sementara, pengurangan GHG lebih dari 25 tahun dihasilkan 1.842 tCO₂.

Kumi, dkk (2013) yang berjudul *Design and Analysis of a 1 MW Grid-Connected Solar PV System in Ghana*. PLTS terinterkoneksi jaringan skala besar yang akan diaplikasikan pada atap bangunan dan sentral parkir. Standar prosedur yang dikembangkan ini telah divalidasi untuk PLTS Kwame Nkrumah University of Science and Technology 11 (KNUST), Gana. Unjuk kerja dan ketahanan dari PLTS ini juga sudah disimulasikan menggunakan program *RETScreen Clean Energy Project Analysis Software*. Analisa awal dari hasil simulasi menunjukkan bahwa proyek ini bermanfaat bagi universitas dengan estimasi produksi tahunannya sekitar 1.159 mWh, yaitu sekitar 12 % dari konsumsi listrik tahunan. Penelitian ini nantinya juga akan mengurangi pencemaran 792 ton CO₂. Hasil simulasi juga menyatakan PLTS ini menghasilkan *Performance Ratio* yang lumayan tinggi, yaitu sebesar 74,3 % dengan *Capacity Factor* 13,2 %.

Berdasarkan penelitian terdahulu perancangan PLTS ditentukan pada kapasitas PLTS saja namun pada penelitian ini peneliti melakukan perancangan PLTS ini dilakukan dengan cara identifikasi layout atap gedung Kantor Dinas Gabungan Provinsi Riau,



kemudian dibuat perancangan sistem yang ideal dengan mengkonfigurasi spesifikasi peralatan dan melakukan analisa teknis daya output listrik yang dihasilkan

Setelah itu dilakukan analisa biaya yaitu perhitungan biaya yang dibutuhkan selanjutnya analisa finansial disimulasikan dengan *software* RETScreen untuk mengetahui aspek finansial seperti *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), dan *Simple Payback* (SP) dan analisa emisi membahas dampak pengurangan emisi karbon dioksida dalam mensubstitusikan pembangkit konvensional .

2.2 Sel Surya (*Photovoltaic*)

Untuk mengubah energi matahari menjadi energi listrik dapat dilakukan dengan sel surya atau *solar cell*. Apabila permukaan sel surya dikenai cahaya maka dihasilkan pasangan elektron dan *hole*. Elektron akan meninggalkan sel surya dan akan mengalir pada rangkaian luar sehingga timbul arus listrik. Arus listrik yang dihasilkan oleh sel surya dapat dimanfaatkan langsung atau disimpan dulu dalam baterai untuk digunakan kemudian.

Besarnya pasangan elektron dan *hole* yang dihasilkan, atau besarnya arus yang dihasilkan tergantung pada intensitas cahaya maupun panjang gelombang cahaya yang jatuh pada sel surya. Intensitas cahaya menentukan jumlah foton, makin besar intensitas cahaya yang mengenai permukaan sel surya makin besar pula foton yang dimiliki sehingga makin banyak pasangan elektron dan *hole* yang dihasilkan yang akan mengakibatkan besarnya arus yang mengalir. Semakin pendek panjang gelombang cahaya maka semakin tinggi energi fotonnya sehingga makin besar energi elektron yang dihasilkan, dan juga berimplikasi pada makin besarnya arus yang mengalir. Prinsip kerja sel surya adalah sebagai berikut: Cahaya yang jatuh pada sel surya menghasilkan elektron yang bermuatan positif dan *hole* yang bermuatan negatif kemudian elektron dan *hole* mengalir membentuk arus listrik. Prinsip ini dikenal sebagai prinsip *photoelectric*. Sel surya dapat tereksitasi karena terbuat dari semikonduktor yang mengandung unsur silikon. Silikon ini terdiri atas dua jenis lapisan sensitif: lapisan negatif (tipe-n) dan lapisan positif (tipe-p). Karena sel surya ini mudah pecah dan berkarat sehingga sel ini dibuat dalam bentuk modul-modul dengan ukuran tertentu yang dilapisi plastik atau kaca bening yang kedap air yang dikenal dengan modul surya (Setiawan, 2014).



2.2.1 Karakteristik *Photovoltaic*

Penyinaran cahaya matahari yang diterima sel surya sangat bervariasi setiap harinya. Untuk mengetahui kapasitas daya yang dihasilkan, dilakukanlah pengukuran terhadap arus (I) dan tegangan (V) pada susunan sel surya. Untuk mengukur arus maksimum, kedua terminal dari modul dibuat rangkaian hubung singkat sehingga tegangannya menjadi nol dan arusnya maksimum. Dengan menggunakan *ampermeter* akan didapatkan sebuah arus maksimum yang dinamakan *short circuit current* atau I_{sc} . Pengukuran terhadap tegangan (V) dilakukan pada terminal positif dan negatif dari modul dengan tidak menghubungkan sel surya dengan komponen lainnya. Pengukuran ini dinamakan *open circuit voltage* atau V_{oc} . Hal ini bertujuan untuk mengetahui besarnya daya puncak *Maximum Power Point* (MPP) yang dapat dicapai. Secara sederhana, karakteristik dari sel surya ini diterangkan lewat kurva arus terhadap tegangan (Kurva I-V). Pada kurva I-V terdapat hal-hal yang sangat penting yaitu:

2.2.1.1 Arus *Short Circuit* (I_{sc})

Arus hubung singkat sel surya adalah arus yang mengalir pada saat tegangan sel surya sama dengan nol atau arus keluaran maksimum modul surya yang dikeluarkan di bawah kondisi tidak ada resistansi.

2.2.1.2 Tegangan Rangkaian Terbuka (V_{oc})

V_{oc} adalah tegangan maksimum dari sel surya dan terjadi pada saat arus sel sama dengan nol. Tegangan rangkaian terbuka sesuai dengan jumlah bias maju pada sel surya, karena bias *junction* sel surya sama dengan arus cahaya yang dihasilkan.

2.2.1.3 Faktor Pengisian (*Fill Factor*)

Fill factor adalah salah satu besaran yang menjadi parameter unjuk kerja sel surya. *Fill factor* (FF) merupakan besaran tak berdimensi yang menyatakan perbandingan daya maksimum yang dihasilkan sel surya terhadap perkalian antara V_{oc} dan I_{sc} .

2.2.1.4 Efisiensi Sel Surya

Efisiensi adalah parameter yang paling umum digunakan untuk membandingkan unjuk kerja dari sel surya satu dengan yang lainnya. Efisiensi didefinisikan sebagai rasio output energi dari sel surya untuk energi masukan dari matahari. Selain mencerminkan unjuk kerja sel surya sendiri, efisiensi tergantung pada spektrum, intensitas sinar matahari, dan suhu sel surya. Oleh karena itu, kondisi dimana efisiensi diukur harus dikontrol untuk



membandingkan kinerja satu perangkat ke perangkat lainnya. Sel surya terestrial diukur dalam kondisi *Air Mass* (AM) 1.5 spektrum dan pada suhu 25°C.

2.2.1.5 Maximum Power Point (MPP)

Maximum power point (MPP) pada kurva I-V adalah titik operasi yang menunjukkan daya maksimum yang dihasilkan oleh sel surya. Hasil perkalian arus dan tegangan maksimum menyatakan

Radiasi matahari yang diterima bumi terdistribusi pada beberapa panjang gelombang, mulai dari 300 nm sampai dengan 4 micron(*m*). Sebagian radiasi mengalami refleksi di atmosfer (*diffuse radiation*) dan sisanya dapat sampai ke permukaan bumi (*direct radiation*).

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* .

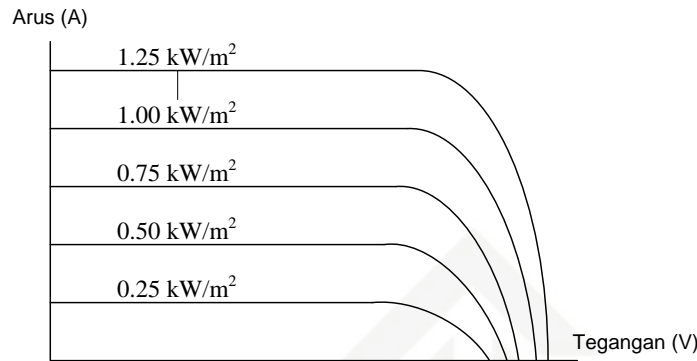
PLTS memanfaatkan cahaya matahari untuk menghasilkan listrik DC (*direct current*), yang dapat diubah menjadi listrik AC (*Alternating current*). PLTS pada dasarnya adalah pecatu daya dan dapat dirancang untuk mencatu kebutuhan listrik yang kecil sampai dengan besar, baik secara mandiri maupun secara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

2.4 Faktor yang mempengaruhi kinerja 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.



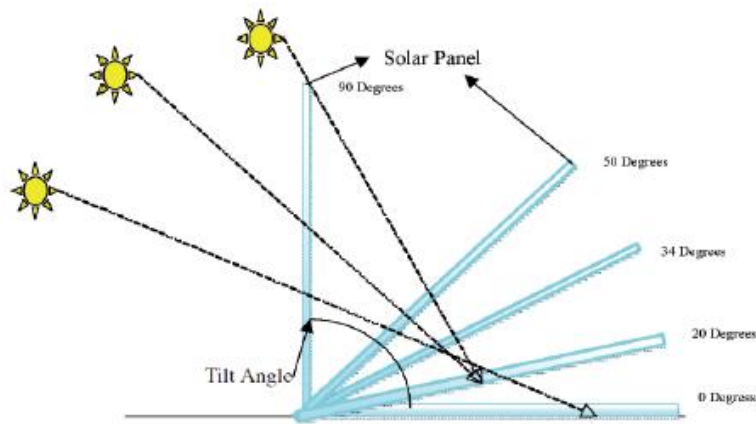
Gambar 2.1 Karakteristik Variasi Tegangan Terhadap Radiasi
(Sumber: GSES, 2013)

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)

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

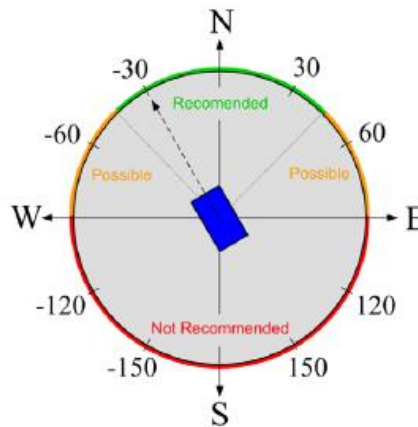
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan 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 2.2 Sudut Kemiringan Modul Surya.
Sumber: (Hanif M, 2012)

2.4.3 Orientasi Modul Surya

Penempatan modul surya untuk mendapatkan energi maksimum, sebaiknya modul surya ditempatkan menghadap arah selatan, meskipun arah timur atau barat juga memungkinkan tetapi jumlah listrik yang dihasilkan akan lebih rendah. Selain itu sudut peletakan modul surya tidak boleh kurang dari 10 derajat atau melebihi 45 derajat. Orientasi dari rangkaian modul surya (*array*) ke arah matahari adalah penting, agar modul surya (*array*) dapat menghasilkan energi yang maksimum. Misalnya, untuk lokasi yang terletak di belahan bumi utara maka modul surya sebaiknya diorientasikan ke selatan. Begitu pula untuk lokasi yang terletak di belahan bumi selatan maka modul surya diorientasikan ke utara (Hanif, 2012).

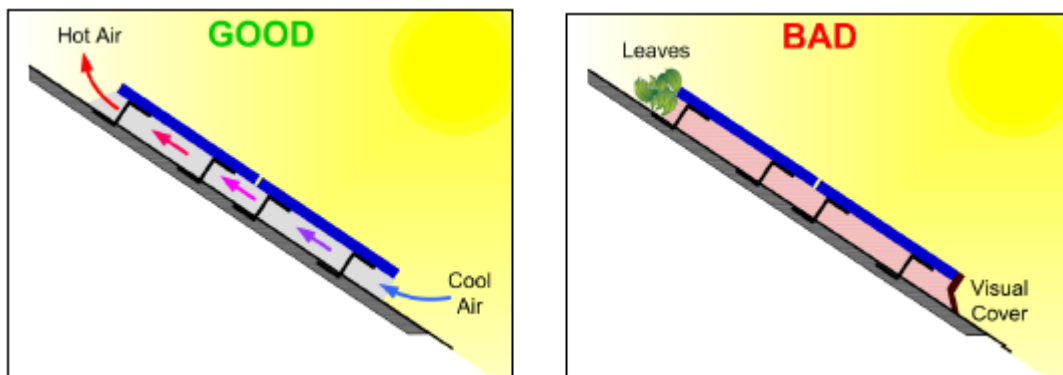


Gambar 2.3 Orientasi Modul Surya
Sumber : (Regen Power, 2011)

2.4.4 Temperatur

Kinerja sel PLTS dipengaruhi oleh suhu tersebut bahwa semakin tinggi suhu sel, semakin rendah produksi energi. Sel bisa mencapai suhu tinggi, misalnya, ketika radiasi matahari berada pada titik terkuat di musim panas sekitar tengah hari, sel dapat panas hingga sekitar 70 ° C. Panas yang hilang melalui bagian belakang modul dengan konveksi alami, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. Untuk alasan ini, penting untuk menghindari pemanasan sel dengan membatasi aliran udara di bawah modul.

Sebagai aturan sederhana, kenaikan suhu sebesar 10 ° C menurunkan output daya yang efektif dari sistem PV sekitar 4% - 5%. Pada saat terjadi temperatur yang tinggi, sel-sel surya kurang efisien. Energi output dari modul dipengaruhi oleh temperatur pada sel-sel surya yang beroperasi. Saat panas sel-sel surya meningkat, tegangan yang melintasi setiap sel akan jatuh dan ketika tegangan menurun maka, daya juga akan menurun.



Gambar 2.4 Temperatur pada Modul Surya.
Sumber : (Regen Power, 2011)

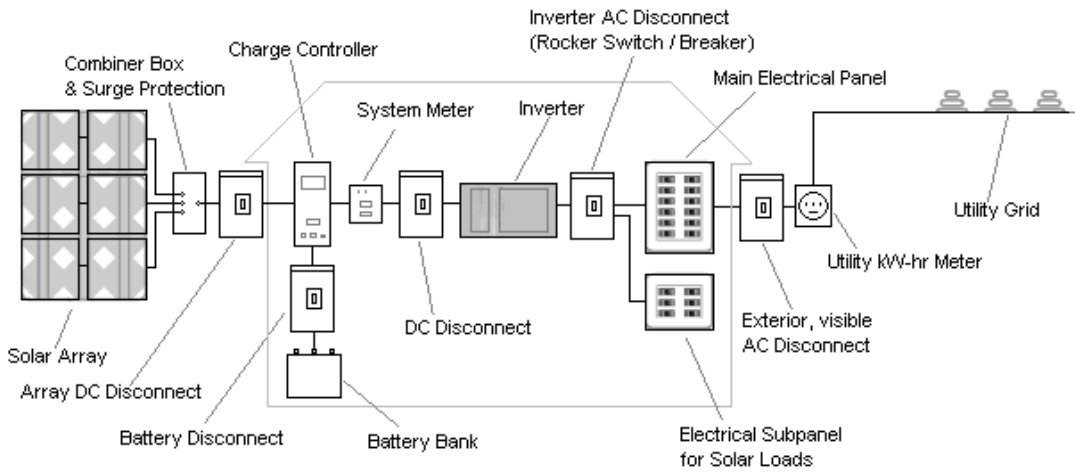
2.5 PLTS *Grid- Connected*

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*

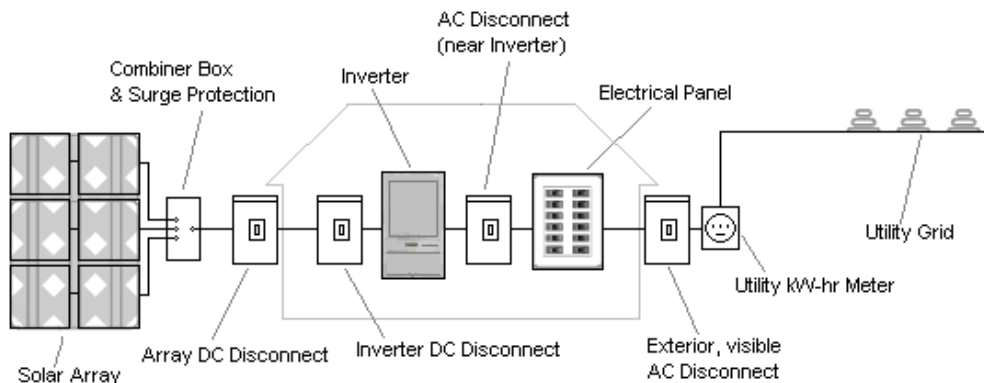
backup Sistem ini berfungsi sebagai *backup* energi listrik untuk menjaga kontinuitas operasional peralatan-peralatan elektronik. Jika suatu saat terjadi kegagalan pada suplai listrik PLN (pemadaman listrik) maka peralatan-peralatan elektronik dapat beroperasi secara normal dalam jangka waktu tertentu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



Gambar 2.5 *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 2.6 *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):

- a. *Peak Power* (W_p), menyatakan daya maksimum yang terjadi pada titik lutut (*knee point*) kurva I-V.
- b. *Peak voltage* (V_{mp}), menyatakan nilai tegangan pada titik lutut kurva I-V.
- c. *Open voltage* (V_{oc}), menyatakan nilai tegangan pada saat terminal positif dan negatif tidak ada beban atau terbuka.
- d. *Peak current* (I_{mp}), menyatakan besarnya arus yang mengalir pada titik lutut kurva I-V.
- e. *Short circuit current* (I_{sc}), menyatakan arus yang mengalir pada saat terminal positif dan negatif dihubung singkat.
- f. *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*

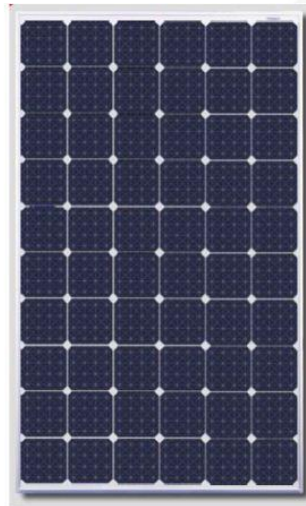
Jenis ini terbuat dari batangan kristal yang diiris tipis – tipis. Karena sel surya berasal dari satu induk batangan kristal, maka setiap potongan memiliki karakteristik yang identik dengan yang lainnya. Sehingga efisiensi *monocrystalline* mampu mencapai 15 – 20 %, oleh karena itu harga *monocrystalline* 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 2.7 *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 Diindungi 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.



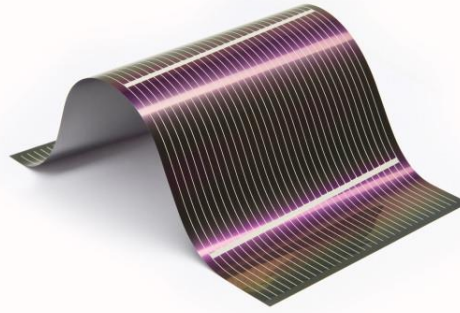
Gambar 2.8 *Polycrystalline*
(Sumber: <http://webportal-solfex.co.uk/>)

c. *Thin Layer (FILM) Cells*

Merupakan modul surya (dua lapisan) dengan struktur lapisan tipis *microcrystalline 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 2.9 *Thin Layer (FILM) Cells*
(Sumber: <http://materia.nl>)

Hak Cipta Diindungi 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.

2.6.2 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.

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 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 2.11 *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*.

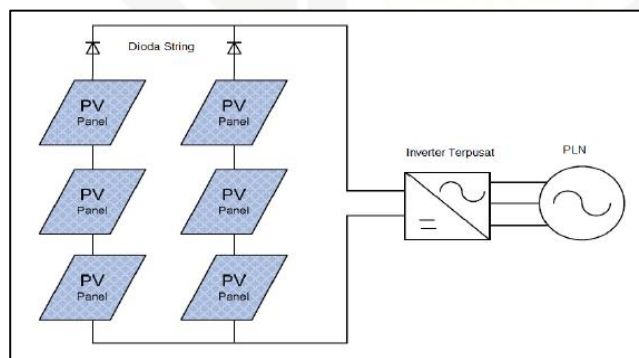


Gambar 2.12 *Central Inverter*
 (Sumber: <http://solarprofessional.com>)

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

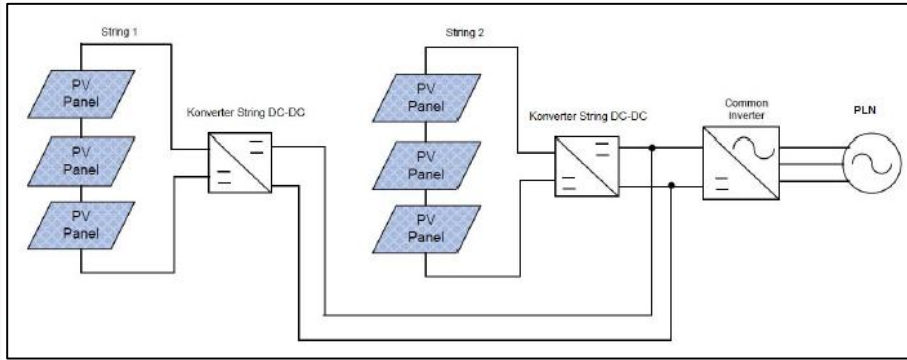


Gambar 2.13 Konfigurasi Fotovoltaik Inverter Terpusat
 (Sumber: PLN, 2014)

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.

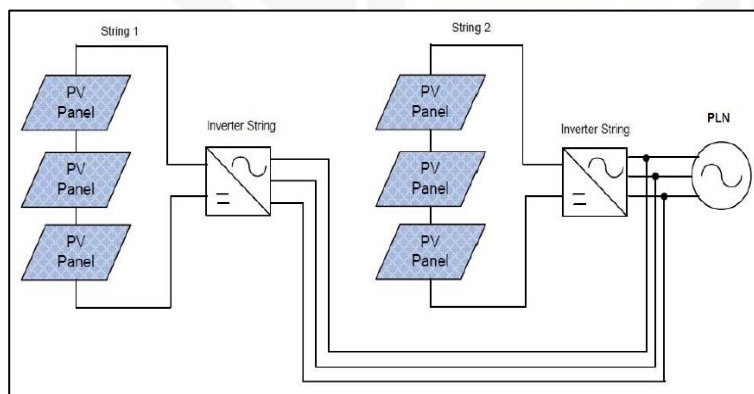
Hak Cipta Diindungi Undang-Undang
 1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruhnya karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 b. Pengutipan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



Gambar 2.14 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 ketidakcocokan dan bayangan parsial sehingga dapat meningkatkan produksi energi. Kelemahan konfigurasi ini adalah diperlukan jumlah inverter yang lebih banyak.



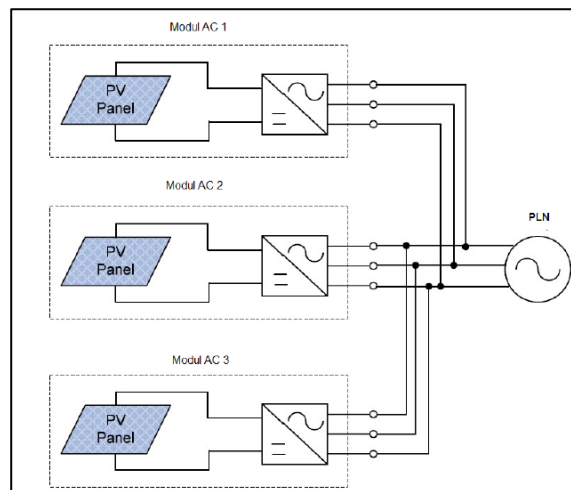
Gambar 2.15 Konfigurasi *Inverter-String* Inverter
(Sumber: PLN, 2014)

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

- Hak Cipta Diindungi 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.

meningkatkan keandalan. Kelemahan dalam konfigurasi ini adalah diperlukan biaya tambahan untuk inverter dan pemeliharaan yang relatif lebih kompleks.



Gambar 2.16 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 memberikan kinerja yang maksimal pada PLTS. Keseimbangan peralatan dan komponen 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:

2.7.1.1 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 .

2.7.1.2 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.



2.7.1.3 Kabel Penumaian

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

2.7.1.4 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 pemutus. 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 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.ada beberapa jenis meter yang akan dipasang dengan sistem PLTS *grid-connected* tergantung pada persetujuan pembelian dengan distributor listrik yaitu :

Hak Cipta Diduduki Undang-Undang

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

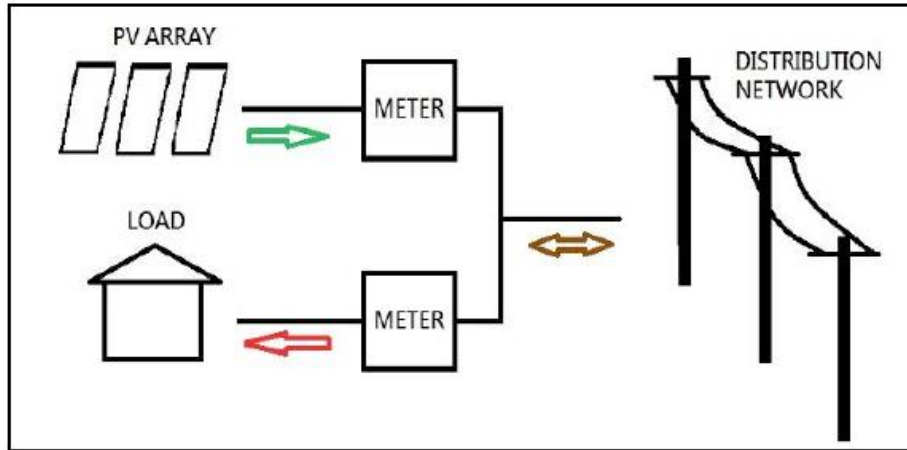
a. Penguipaan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Penguipaan 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.

Meteran Bruto

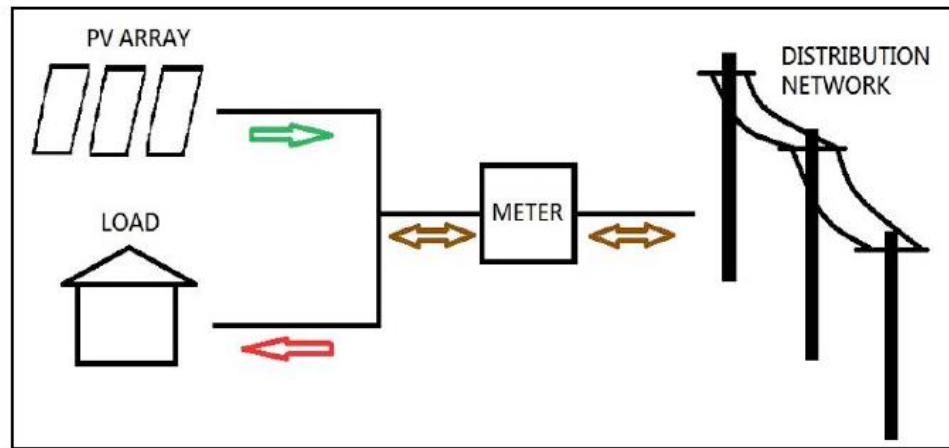
Meteran bruto adalah pengaturan meteran di mana pengukuran jumlah tenaga listrik yang diekspor dan yang diimpor dilakukan secara terpisah. Seluruh tenaga listrik yang dihasilkan oleh sistem PLTS secara efektif diekspor ke jaringan dan dapat diperlakukan secara terpisah dari tenaga listrik yang dikonsumsi oleh pengguna.



Gambar 2.17 Konfigurasi Meteran Bruto.
(Sumber : ESDM, 2015)

Meteran Neto

Meteran neto adalah pengaturan meteran di mana tenaga listrik yang dihasilkan oleh sistem PLTS pertama-tama dikonsumsi dulu di tempat dan yang diekspor ke jaringan hanya kelebihan daya dari PLTS setelah dikonsumsi di tempat ini. Nilai meteran “Neto” adalah jumlah tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit listrik PLTS dikurangi total konsumsi listrik. Apabila daya yang dihasilkan oleh pembangkit listrik PLTS melebihi konsumsinya, ada ekspor bersih/neto ke jaringan dan apabila konsumsi melebihi daya yang dihasilkan oleh pembangkit listrik PLTS ada impor bersih tenaga listrik.



Gambar 2.18 Konfigurasi Meteran Neto
(Sumber : ESDM, 2015)

2.8 Losses 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 *crystalline* 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 permukaan 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 Pabrikasi (*Manufacture Tolerance*)

Modul diproduksi dengan rating daya yang ditentukan dan spesifikasi pabrikasi. Sebuah modul memiliki toleransi pabrikasi yang biasanya terdapat pada data sheet produk toleransi pabrikasi pada modul menunjukkan potensi 'negatif' kehilangan daya. Misalnya spesifikasi pabrikasi $160W \pm 4\%$ output solar modul / *array* harus didasarkan pada jumlah minimum daya dikutip untuk PV, yaitu contoh di atas: 160 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 pabrikasi 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 efisisensi 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

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.
 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.
 1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
 Hal ini Diundang



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 *Matching PV Array dengan Inverter*

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) :

Keterangan :

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

γ_V = Koefisien suhu V_{MP}

T = Temperatur udara ambien maksimum pada modul

T_{STC} = Temperatur STC



b. Hak Cipta Diindungi 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.

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 (2.2):

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

Keterangan :

$V_{OC\ STC}$ = Tegangan rangkaian terbuka di STC (V)

γ_{VOC} = Koefisien temperatur V_{OC}

T = Temperatur modul diharapkan terendah di temperatur yang ditentukan (°C)

T_{STC} = Temperatur modul STC (°C)

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.

$$V_{inverter} = V_{max\ input} \times 0.95 \tag{2.3}$$

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

$$Jumlah\ modul = \frac{V_{inverter}}{V_{OC\ MOD}} \tag{2.4}$$

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}).

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

Keterangan :

I_{SC-STC} = Tegangan rangkaian terbuka di STC (A)

γ_{VOC} = Koefisien Temperatur untuk V_{OC}

T = Temperatur modul diharapkan terendah di temperatur yang ditentukan ($^{\circ}C$)

T_{STC} = Temperatur modul STC ($^{\circ}C$)

Jumlah maksimum string dihitung persamaan (2.6) dengan membagi tegangan inverter dengan V_{oc} modul :

$$\text{Jumlah String} = \frac{V_{Inverter}}{I_{SC MOD}} \quad (2.6)$$

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:

$$\text{Ukuran array} = \frac{\text{Maksimum daya inverter}}{\text{Daya modul}} \quad (2.7)$$

2.9.8 Sistem Proteksi Sub-Array dan Array

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

$$1.5 \times I_{SC} < I_{TRIP} < 2.4 \times I_{SC} \quad (2.8)$$

Perangkat proteksi *Sub- Array* ditentukan pada nilai :

$$1.25 \times I_{SC SUB ARRAY} < I_{TRIP} < 2.4 \times I_{SC SUB ARRAY} \quad (2.9)$$

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 . makan arus minimal DC isolator ditentukan pada *rating* nilai :

$$1.25 \times I_{SC \text{ ARRAY}} < I_{TRIP} \quad (2.10)$$

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 $V_{DC \text{ ARRAY}}$ ditentukan pada suhu minimum.

$$V_{OC \text{ ARRAY}} = \text{No.}_{Mod} \times \text{Max } V_{oc \text{ modul}} \quad (2.11)$$

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)

$$A = \frac{2 \times L \times I \times \rho}{\text{loss} \times V_d} \quad (2.12)$$

Keterangan:

- ρ = Resistivitas kawat tembaga 0,0183 $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$
- l = Panjang kabel (meter)
- I = Arus melalui kabel (*ampere*)



A

= Luas penampang (mm²)

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. Jumlah energi yang dihasilkan oleh sistem PV tergantung pada sejumlah faktor, tetapi faktor utama adalah:

- Ukuran PV array
- Jumlah iradiasi (sinar matahari) yang diterimanya
- Total efisiensi sistem yaitu berapa besar daya yang dihasilkan setelah semua kerugian telah dihitung dan diterapkan.

Hasil produksi energi dari PV array dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$E_{array} = \text{Ukuran PV array} \times H_{tilt} \times Losses \quad (2.13)$$

Hasil produksi energi dari PV array dalam 1 tahun dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$E_{array} = 365 \times \text{Ukuran PV array} \times H_{tilt} \times Losses \quad (2.14)$$

Keterangan :

- E_{array} = Rata-rata keluaran energi dari PV array (Wh)
 P_{STC} = Output daya dinilai modul STC (W)
 $Losses$ = Total kerugian diterjemahkan ke dalam efisiensi (%)
 H_{tilt} = Radiasi matahari, (1 PSH = 1 kWh / m²)
 N = Jumlah modul dalam array



2.10.2 Rasio Performa (*Performance Ratio*)

Rasio performa didefinisikan sebagai rasio dari jumlah sebenarnya energi PV dikirim ke jaringan utilitas dalam jangka waktu tertentu dengan jumlah teoritis energi yang dihasilkan oleh modul PV di bawah kondisi uji standar (STC). Rumus perhitungannya adalah sebagai berikut (Sivertsen,2014):

$$\text{Rasio performa} = \frac{\text{Hasil produksi energi}}{\text{Produksi energi teoritis}} \quad (2.15)$$

2.10.3 Faktor kapasitas (*Capacity Faktor*)

Faktor kapasitas / *Capacity Faktor* pembangkit listrik adalah rasio output aktual dari pembangkit listrik selama periode waktu dan output potensial jika telah beroperasi pada kapasitas penuh sepanjang waktu. Secara matematis, faktor kapasitas adalah jumlah total energi pabrik yang dihasilkan selama periode waktu dibagi dengan jumlah energi PLTS akan menghasilkan pada kapasitas penuh. Faktor kapasitas sangat bervariasi tergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan dan desain pabrik. Hal ini juga menyediakan alat untuk perbandingan kinerja dari berbagai jenis pembangkit listrik. Rumus perhitungannya adalah sebagai berikut (Sivertsen,2014):

$$\text{Capacity factor} = \frac{\text{Hasil produksi energi}}{\text{kapasitas PV} \times \frac{365 \text{ day}}{\text{year}} \times 24 \text{ h/day}} \quad (2.16)$$

2.11 Aspek Ekonomi

Dalam pembangunan PLTS ada beberapa aspek ekonomi yang harus diperhatikan yaitu aspek biaya dan aspek finansial.

2.11.1 Aspek biaya

Aspek biaya dalam pembangunan meliputi biaya modal, perawatan dan penggantian dari berbagai komponen. Adapun aspek biaya dalam PLTS adalah:

2.11.1.1 Biaya Awal (*Capital Cost*)

Biaya investasi awal adalah biaya yang dikeluarkan untuk membangun sebuah sistem hingga siap digunakan. Biaya ini biasanya dikeluarkan diawal-awal pembangunan dalam jumlah yang relatif besar dan berdampak jangka panjang. Salah satu contoh



investasi awal adalah biaya keseluruhan bahan baku sistem, biaya pekerja, dan lain-lain (Giatman, 2005).

2.11.1.2 Biaya Operasional (*Operational Cost*)

Biaya operasional (*operational cost*) adalah biaya yang dikeluarkan setelah sistem sudah siap digunakan. Biaya ini biasanya dikeluarkan secara rutin atau periodik waktu tertentu dalam jumlah yang relatif sama (Giatman, 2005).

2.11.1.3 Biaya Perawatan (*Maintenance Cost*)

Biaya perawatan (*maintenance cost*) adalah biaya yang dikeluarkan dalam rangka menjaga/menjamin *performance* agar selalu prima dan siap untuk dioperasikan. Contohnya adalah biaya untuk mengganti salah satu alat pendukung sistem apabila terjadi kerusakan (Giatman, 2005).

2.11.2 Analisa *Financial*

Dalam rangka untuk menilai apakah proyek dapat diterima atau tidak teknik analisa *financial* terlebih dahulu melakukan analisa terhadap *Net Present Value* (NPV), *Internal rate of return* (IRR) dan *simple payback* (SP).

2.11.2.1 *Net Present Value* (NPV)

Net Present Value (NPV) menyatakan bahwa seluruh aliran kas bersih dinilai sekarang atas dasar faktor diskonto (*diccount factor*). Teknik ini menghitung selisih antara seluruh kas bersih nilai sekarang dengan investasi awal yang ditanamkan (Halim, 2009).

Keterangan pengambilan keputusannya adalah sebagai berikut:

- Jika nilai NPV yang didapatkan adalah positif maka proyek tersebut layak dilaksanakan karena hal itu mengindikasikan bahwa perhitungan investasi proyek itu telah mencapai kondisi yang mampu memberi keuntungan sampai periode yang diperhitungkan.
- Jika nilai NPV yang didapatkan adalah negatif maka proyek tersebut tidak layak dilaksanakan karena hal itu mengindikasikan bahwa perhitungan investasi proyek itu belum mencapai kondisi yang mampu memberi keuntungan sampai periode yang diperhitungkan.



- Jika nilai NPV yang didapatkan adalah 0 maka itu berarti dalam sepanjang periode perhitungan investasi yang dilakukan maka proyek tersebut telah memberikan hasil yang sebanding dengan nilai investasi yang dikeluarkan.

2.11.2.2 Internal Rate of Return (IRR)

IRR merupakan nilai discount rate yang membuat nilai NPV suatu proyek sama dengan nol. Rumus perhitungan IRR adalah sebagai berikut (Giatman,2005):

Berdasarkan perhitungan IRR, apabila nilai IRR lebih besar daripada tingkat bunga relevan (tingkat keuntungan yang disyaratkan), maka investasi dikatakan menguntungkan. Sebaliknya jika nilai IRR lebih kecil tingkat bunga relevan maka investasi dikatakan merugikan dan tidak layak untuk dilaksanakan.

2.11.2.3 Simple payback

Simple payback adalah Pengembalian modal adalah analisis ekonomi pada sistem PV *grid-connected* metode paling mudah untuk dipahami. Dalam PLTS *simple payback* bertujuan menghitung jumlah waktu yang diperlukan untuk memulihkan biaya Investasi berdasarkan penghematan biaya energi tahunan.

2.12 Aspek Emisi

2.12.1 Analisa Pengurangan Emisi

Analisis potensi reduksi emisi CO₂ melalui pembangunan PLTS dilakukan dengan mengurangi jumlah energi listrik dari pembangkit berbahan bakar fosil dan mengganti dengan PLTS. Pemanfaatan PLTS *grid-connected* merupakan salah satu alternatif dalam rangka mengganti/substitusi pembangkit tenaga fosil. Selain sumber–sumber energi fosil yang semakin terbatas, pembangkit listrik tenaga fosil melepaskan CO₂ akibat dari pemanfaatan pembakaran energi fosil. CO₂ merupakan salah satu emisi penghasil gas rumah kaca

Pemanfaatan PLTS merupakan salah satu alternatif dalam rangka mengganti/substitusi pembangkit tenaga fosil. Selain sumber–sumber energi fosil yang semakin terbatas, pembangkit listrik tenaga fosil melepaskan CO₂ akibat dari pemanfaatan pembakaran energi fosil. CO₂ merupakan salah satu emisi penghasil gas rumah kaca (Waskito, 2011).

Analisis potensi reduksi emisi CO₂ melalui pembangunan PLTS dilakukan dengan mengurangi jumlah energi listrik dari pembangkit berbahan bakar fosil dan



mengganti dengan PLTS. Berdasarkan pada penggunaan energi listrik yang berasal dari pembangkit berbahan bakar fosil dapat diketahui rata-rata faktor emisi CO₂ pembangkit berbahan bakar fosil adalah 0.743 kg CO₂/kWh, kemudian dihitung potensi pengurangan CO₂ dengan pergantian tersebut. Artinya untuk menghasilkan energi listrik 1 kWh melalui pembangkit berbahan bakar fosil dihasilkan emisi CO₂ sebesar 0.743 kg (Indralaksono, 2009).

Perhitungan pengurangan emisi akibat mengganti/substitusi bahan bakar fosil adalah sebagai berikut:

Menghitung emisi CO₂. Persamaan yang digunakan adalah:

$$eCO_2 = kWh \times ef \quad (2.17)$$

Keterangan:

eCO_2 = Emisi CO₂ (tCO₂)

$A kWh$ = Produksi energi listrik pertahun (MWh)

ef = *emission factor*

2.13 RETScreen

RETScreen International Project Clean Energy Analysis Software adalah alat terkemuka khusus ditujukan untuk memfasilitasi pra-kelayakan dan analisa kelayakan teknologi energi bersih. Inti dari alat ini terdiri dari analisa proyek standar dan terintegrasi *software* yang dapat digunakan di seluruh dunia untuk mengevaluasi biaya produksi energi, siklus hidup dan pengurangan emisi gas rumah kaca untuk berbagai jenis energi yang diusulkan efisien dan teknologi energi terbarukan. Semua model teknologi energi bersih di RETScreen yang *Software* memiliki tampilan umum dan mengikuti pendekatan standar untuk memfasilitasi pengambilan keputusan. Setiap model juga mencakup terintegrasi produk, biaya dan database cuaca dan user manual yang rinci secara online, semua yang membantu untuk secara dramatis mengurangi waktu dan biaya yang terkait dengan mempersiapkan studi pra-kelayakan. *Software* RETScreen mungkin yang tercepat dan termudah alat untuk estimasi kelangsungan hidup potensial proyek energi bersih

RETScreen menyediakan akses ke database iklim global berdasarkan pengukuran tanah dan data satelit NASA, analisa proyek di seluruh dunia yang memungkinkan. Perangkat lunak ini tersedia dalam 35 bahasa dan termasuk database peralatan untuk komponen yang diproduksi dan tersedia di seluruh dunia. sumber pelatihan untuk belajar

sendiri, digunakan dalam program pelatihan atau program universitas termasuk webcast, slide presentasi, dan catatan instruktur, studi kasus, pengguna dan bahan lainnya.

© Hak cipta milik UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

Hak Cipta Diindungi 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.



UIN SUSKA RIAU

