

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terkait

Penelitian Tugas Akhir ini dibuat berdasarkan studi literatur dari beberapa sumber penelitian terdahulu tentang pemanfaatan energi surya sebagai sumber energi listrik. Beberapa penelitian tersebut antara lain, penelitian yang berjudul *Techno-Economic Simulation of a Grid-Connected PV System Design as Specifically Applied to Residential in Surabaya, Indonesia*. Penelitian ini bertujuan mengetahui luas atap yang dapat digunakan untuk pemasangan sistem PV, potensi energi surya, dan biaya komponen yang dibutuhkan. Untuk mengetahui potensi energi surya dilakukan dengan simulasi menggunakan solarGIS dan PV planner. Dari hasil simulasi yang telah dilakukan, total area atap untuk semua gedung Universitas Surabaya yang dapat digunakan untuk pemasangan PV sistem sekitar 12,280 m². Atap terdiri dari empat arah yang berbeda: North East (NE) dengan area yang digunakan seluas 329 m² atau 26%, South East (SE) 2731 m² atau 22%, South West (SW) 3409 m² atau 29%, dan North West (NW) 353 m² atau 23% dari total area masing-masing atap. Kapasitas total panel yang dapat dipasang adalah sekitar 2.030 kWp atau 2,03 MWp dengan produksi energi bulanan berkisar antara 248 mWh hingga 362 mWh per bulan [10].

Penelitian terkait lainnya yang berjudul *Design and Analysis of a 1 MW Grid-Connected Solar PV System in Ghana*. Sistem PLTS yang dirancang terinterkoneksi dengan 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. Hasil simulasi juga menyatakan PLTS ini menghasilkan Performance Ratio yang lumayan tinggi, yaitu sebesar 74,3 % dengan Capacity Factor 13,2 % [11].

Penelitian tentang pemanfaatan energi surya sebagai energi listrik yang 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 50kW 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 [12].

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 [13].

Penelitian yang berjudul Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Di Atap Gedung Harry Hartanto Universitas Trisakti. Penelitian yang telah dilakukan bertujuan untuk mengetahui potensi pemasangan PLTS di atap gedung Hery Hartanto, biaya yang dibutuhkan, dan juga *output* daya listrik yang dihasilkan. Hasil penelitian ini menunjukkan dari total area seluas 855m², dengan panel surya yang digunakan berkapasitas 300 WP sebanyak 312 buah dan *inverter* sebesar 20 kW sebanyak 5 buah. Daya yang dihasilkan dari PLTS adalah sebesar 131.232,1 kWh per tahun. Dengan biaya investasi awal sebesar Rp.2.869.777.544 dan juga membutuhkan perawatan PLTS sebesar Rp.28.697.775 per tahun [14].

Berdasarkan penelitian yang berjudul Perancangan Pembangkit Listrik (PLTS) *Rooftop Grid Connected* pada Gedung Pemerintah dengan studi kasus gedung kantor gabungan dinas provinsi Riau. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar potensi perancangan PLTS pada atap gedung pemerintah kantor gabungan dinas provinsi Riau, dari hasil penelitian menunjukkan luas atap gedung tersebut 2840 m² dengan modul surya 330 Wp dapat dipasang dengan jumlah 874 modul surya dan jumlah inverter 19 buah dengan kapasitas 15 kW. Kapasitas daya yang dihasilkan dari PLTS ini sebesar 405,4 MWh pertahun dengan spesifikasi teknis yakni *losses* sebesar 20%, *performa ratio* 80%

dan *capacity factor* sebesar 16.4%. Dengan biaya investasi awal sebesar Rp. 5.671.592.000, biaya operasi dan pemeliharaan Rp.56.715.920 dan biaya penggantian Rp. 923.780.000 selama umur proyek 20 tahun. Analisa ekonomi dalam penelitian ini menggunakan RETscreen [15].

Berdasarkan penelitian terdahulu perancangan PLTS ditentukan pada kapasitas PLTS saja namun pada penelitian ini peneliti melakukan perancangan PLTS ini dengan cara identifikasi layout atap gedung Rektorat UIN SUSKA Riau untuk melihat bagaimana kontuksi atau bentuk dari atap tersebut. Kemudian dibuat perancangan sistem yang ideal dengan mengkonfigurasi spesifikasi peralatan dan melakukan analisa teknis daya *output* listrik yang dihasilkan untuk mengetahui aspek teknis. Setelah itu dilakukan analisa biaya yaitu perhitungan biaya yang dibutuhkan, selanjutnya analisa finansial untuk mengetahui aspek finansial seperti *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), dan *Simple Payback* (SP). Analisis aspek teknis dan ekonomi dalam penelitian ini disimulasikan menggunakan *software* PVSyst dan RETScreen untuk mendapatkan hasil yang lebih baik dan akurat.

Sebagian besar referensi merujuk pada buku berjudul *Grid-Connected PV Systems Design and Instalation*, ditulis oleh *Global Sustainable Energy Solution* (GSES) yang diterbitkan di India pada tahun 2013.

2.2. Landasan Teori

2.2.1. Sel Surya (*Photovoltaic*)

Energi matahari dapat diubah menjadi energi listrik dengan menggunakan 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 yaitu, 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 [16].

2.2.2. 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) [30]. Pada kurva I-V terdapat hal-hal yang sangat penting yaitu:

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. Tegangan Rangkaian Terbuka (V_{oc})

VOC 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.

3. Faktor Pengisian (*Fill Factor*)

- 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.

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 Voc dan Isc.

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.

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*).

2.2.3. 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 *photovoltaic*. 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, *cell photovoltaic* 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

catu daya dan dapat dirancang sebagai sumber energi untuk kebutuhan listrik yang kecil sampai dengan besar, baik secara mandiri maupun secara *hibryd* [30]. Pada umumnya pembangkit listrik tenaga surya digolongkan menjadi dua:

1. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Off-Grid*

PLTS *off-grid* dapat disebut juga *Stand Alone PV system* atau pembangkit listrik tenaga surya terpusat yang merupakan sitem pembangkit listrik alternatif yang dapat diaplikasikan pada tempat atau daerah yang jauh dan tidak terjangkau oleh jaringan PLN dan mengandalkan satu-satunya energi matahari sebagai sumber energi listrik untuk kebutuhan.

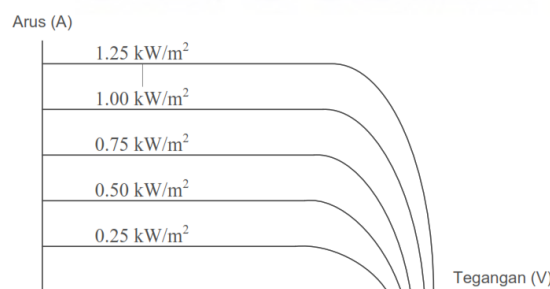
2. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *On-Grid*

PLTS *on-grid* merupakan pembangkit listrik tenaga surya yang terhubung dengan jaringan atau disebut juga jaringan *grid-connected* dimana pemanfaatannya diaplikasikan dengan jaringan dari sumber lain misalkan PLN ataupun generator set.

2.2.4. Faktor yang mempengaruhi kinerja PLTS

2.2.4.1. Radiasi

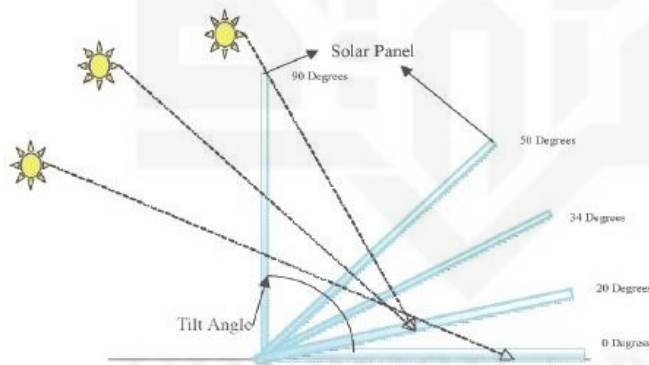
Radiasi mempengaruhi variasi arus dan tegangan. Terdapat hubungan antara variasi pada radiasi dan variasi pada hubungan arus. Tegangan pada rangkaian terbuka tidak berubah secara drastis terhadap radiasi. Namun, bagaimanapun tetap terjadi sedikit peningkatan pada saat kenaikan radiasi. Semakin tinggi 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 [16]

2.2.4.2. Sudut Kemiringan Modul Surya

Sudut kemiringan memiliki dampak yang besar terhadap radiasi matahari di permukaan 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 sistem 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 ke arah 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 diletakkan mendatar (tilt angle = 0°), akan menghasilkan energi maksimum [18].

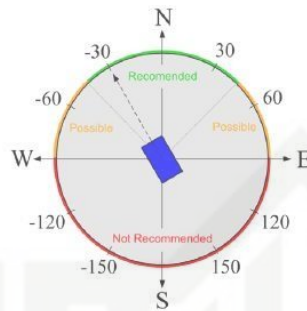


Gambar 2.2 Sudut Kemiringan Modul Surya [18].

2.2.4.3. 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 [18].

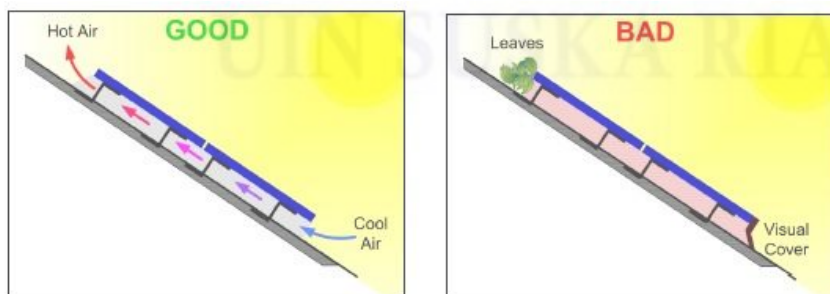


Gambar 2.3 Orientasi Modul Surya [19]

2.2.4.4. 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.



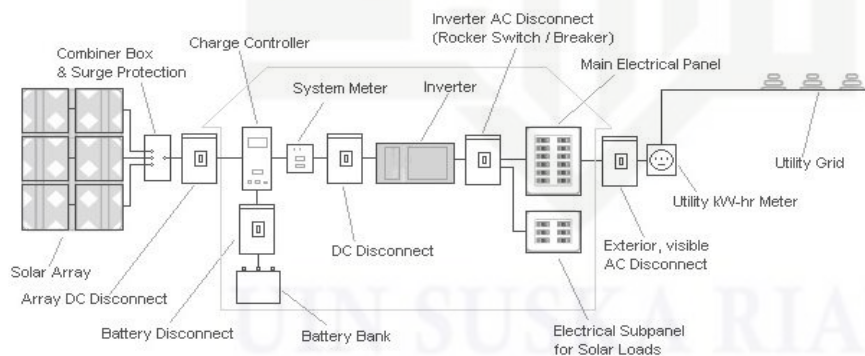
Gambar 2.4 Temperatur pada Modul Surya[19].

2.2.5. 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:

2.2.5.1. Sistem Menggunakan Baterai (*Grid-Connected PV With A Battery BackUp*)

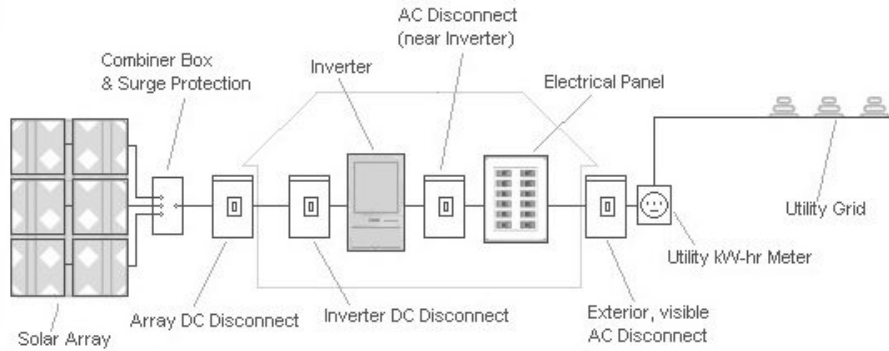
Sistem PLTS *grid-connected* ini dapat menggunakan baterai sebagai cadangan atau backup energi. Sistem ini disebut sebagai *grid-connected PV system with battery-backup*, sistem ini berfungsi sebagai *backup* energi listrik untuk menjaga kontinuitas operasional peralatan-peralatan elektronik. Jika terjadi 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 BackUp* [20]

2.2.5.2. Sistem Tanpa Baterai (*Grid-Connected PV Without A Battery BackUp*)

Sistem PLTS ini tidak menggunakan *battery* sebagai *backup*. Berdasarkan aplikasinya sistem ini dibagi menjadi dua yaitu, *Grid-connected distributed PV* dan *Grid-connected centralized PV* [16].



Gambar 2.6 *Grid-Connected PV Without A Battery Back Up* [20].

2.2.6. Komponen- Komponen PLTS *Grid-Connected*

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

2.2.6.1. 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.

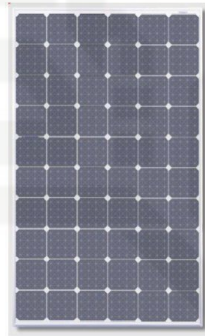
- a. *Peak Power* (W_p), menyatakan daya maksimum yang terjadi pada titik lutut (*knee point*) kurva I-V.
- b. *Peak voltage* (V_{mp}), menyatakan nilai tegangan pada titik lutut kurva I-V.
- c. *Open voltage* (V_{oc}), menyatakan nilai tegangan pada saat terminal positif dan negatif tidak ada beban 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 .

1. Jenis Modul Surya

1. *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* [21]

2. *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.

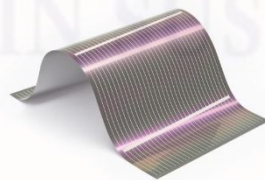


Gambar 2.8 *Polycrystalline* [22]

3. *Thin Layer (FILM) Cells*

Merupakan modul surya (dua lapisan) dengan struktur lapisan tipis *microcrystal-silicon* dan *amorphous* dengan efisiensi modul hingga 8.5% sehingga untuk luas permukaan yang diperlukan daya yang dihasilkan lebih besar dari pada *monocrystalline* dan *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) Solar Cells* [23]

2.2.6.2. *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%.

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 di bagian belakang setiap modul surya. *Inverter* ini diproduksi di kisaran 100-300W. 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 *inverter* dan tidak perlu membongkar.



Gambar 2.10 *Micro Inverter* [24]

b. *Inverter* string (*String Inverter*)

String *inverter* biasanya digunakan untuk pemasangan jaringan tersambung skala kecil (10kW atau kurang). Biasanya kapasitas *string inverter* ialah 1kW sampai kira-kira 12kW, ketika PLTS berkapasitas di atas 5kW maka *inverter multi string* atau *inverter* terpusat dapat digunakan sebagai *inverter* alternatif. Setiap *inverter on-grid* memiliki fungsi sebagai MPPT dan tegangan DC *input* bisa mencapai 1000V DC.



Gambar 2.11 String Inverter [25]

c. *Inverter* Terpusat (*Central Inverter*)

Inverter terpusat ini biasanya digunakan untuk daya PLTS yang besar, sebagai contoh *inverter* ini digunakan pada daya dari 30kWp (*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*.

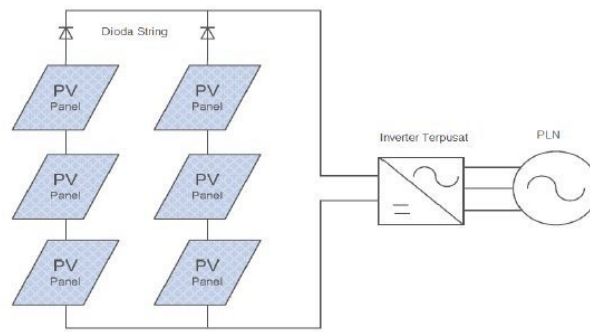


Gambar 2.12 Central Inverter [25]

2. **Konfigurasi *Inverter***

a. Konfigurasi *Inverter* Terpusat

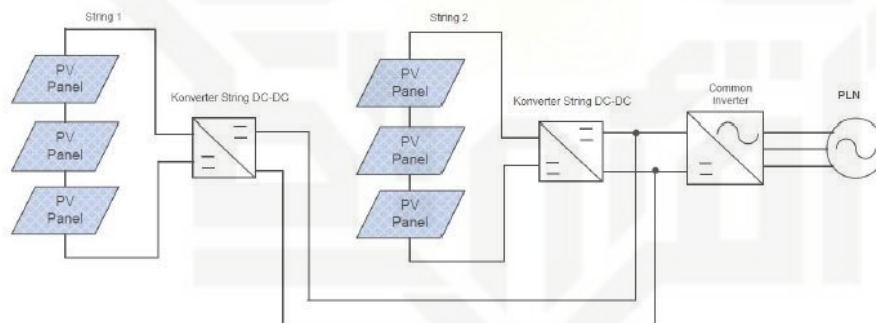
Konfigurasi *Inverter* Terpusat yang relatif sederhana dari pembangkit listrik tenaga surya fotovoltaik. Topologi penyambungan pembangkit tipe ini paling murah, karena hanya memiliki satu *inverter* DC ke AC terpusat untuk string modul fotovoltaik yang dihubungkan secara seri dan paralel untuk menghasilkan 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 *inverter* terpusat [26]

b. Konfigurasi Multi - String *Inverter*

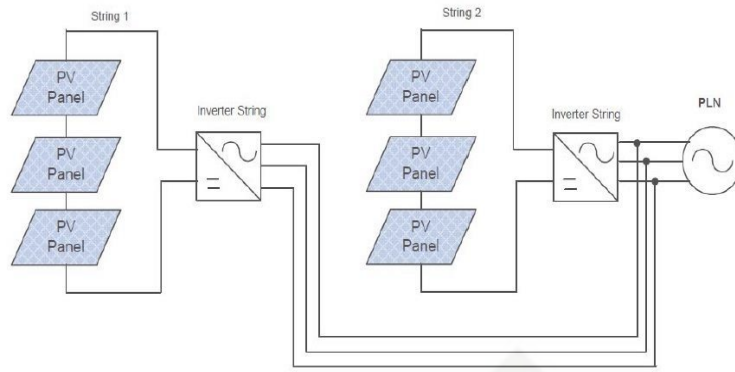
Multi string *inverter* menggunakan beberapa string dengan sistem pelacak MPP yang terpisah (menggunakan DC/DC konverter) terhubung ke *inverter* DC/AC umum untuk menghasilkan AC yang disalurkan ke sistem distribusi. Konfigurasi ini memungkinkan untuk mengoptimalkan efisiensi pengoperasian setiap string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



Gambar 2.14 Konfigurasi *Multi-String Inverter* [26]

c. Konfigurasi *Inverter Multi String*

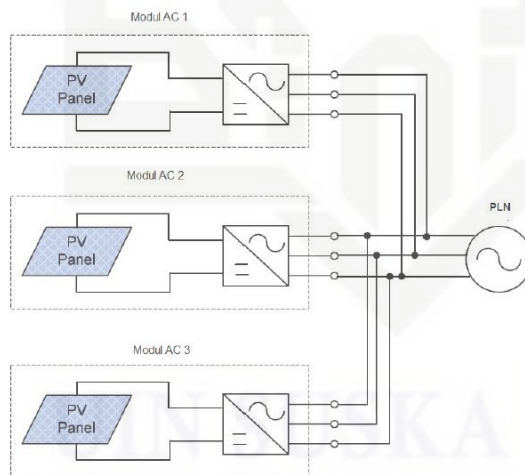
Inverter String Array mengilustrasikan yang mana rangkaian seri tunggal modul fotovoltaik dihubungkan secara seri dan *string* terhubung ke *inverter* tunggal dan ada satu *inverter* untuk setiap string. Keuntungan dari konfigurasi ini adalah bahwa *string inverter* memiliki kemampuan pelacakan titik 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* [26]

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 2.16 Konfigurasi *Inverter Modul AC* [26]

2.2.7. Komponen Pendukung 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:

2.2.7.1. Kabel

Dalam sistem grid connected membutuhkan kabel terhubung, yaitu:

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. 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 dengan kapasitas besar *inverter* yang digunakan adalah 380V AC tiga fasa.

3. Kabel Pembumian

Kabel yang digunakan untuk pembumian (*grounding*) adalah sama halnya dengan kabel yang digunakan untuk pembumian instalasi bangunan.

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 sekering pada PLTS.

2.2.7.2. 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 sakelar penghubung dan memutus. Namun, harus dipasang pada arus DC. Alat ini biasanya dipasang antara PLTS dan *inverter*. Alat ini terbagi dua bagian yaitu isolator yang memiliki polaritas dan isolator yang tidak memiliki polaritas.

b. Isolator AC pada PLTS

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

2.2.7.3. Meteran

pada tipe dari sel surya, rata-rata koefisien suhu pada modul *cristaline* dapat mencapai 0.5 % V/° C sedangkan rata-rata pengurangan modul *thin film* mencapai 0.1-0.4% V/° C.

2.2.8.2. Kotoran (*Soilage*)

Kotoran dapat menumpuk di atas di 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 [17].

2.2.8.3. Toleransi Pabrikan (*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 ± 4% *output* solar modul 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 fmm digunakan pada faktor toleransi pabrikan dan mewakili presentasi kehilangan.

2.2.8.4. Bayangan (*Shading*)

Bayangan pada *array* yang terjadi di siang 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.

2.2.8.5. 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.

2.2.8.6. 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.

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%

Tabel 2.1 Pengurangan sistem dari waktu ke waktu [19].

2.2.9. Perancangan Sistem PLTS Grid-Connected

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

2.2.9.1. 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.

2.2.9.2. 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.

2.2.9.3. 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.

2.2.9.4. 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.

2.2.9.5. 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*).

2.2.9.6. 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.

2.2.9.7. Penyesuaian 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* [17].

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

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*. Langkah pertama adalah untuk menemukan tegangan modul pada suhu modul maksimum dengan menggunakan persamaan (2.1) [17] :

$$V_{MP\ CELL\ EFF} = V_{MP-STC} - [\gamma_{VOC} \times (T - T_{STC})] \quad (2.1)$$

Keterangan :

- $V_{MP\ STC}$ = Tegangan MPP pada kondisi pengujian standar (STC),
- γ_{VOC} = Koefisien suhu V_{MP}
- T = Temperatur udara ambien maksimum pada modul
- T_{STC} = Temperatur 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 (2.2):

Keterangan :

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

- V_{OC-STC} = Tegangan rangkaian terbuka di STC (V)
- γ_{VOC} = Koefisien temperatur V_{OC}
- T = Temperatur modul diharapkan terendah di temperatur yang ditentukan ($^{\circ}C$)
- T_{STC} = Temperatur modul STC ($^{\circ}C$)

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.

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

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. **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}).

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

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 :

$$\text{Jumlah modul} = \frac{V_{inverter}}{V_{OC \text{ Mod}}} \quad (2.6)$$

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[17]. Dengan *inverter* dan modul yang dipilih, jumlah maksimum modul dalam *array* adalah:

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

2.2.9.8. Sistem Proteksi Sub-Array dan Array

Menurut draf 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 :

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

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 itu 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 Draf 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.

$$V_{OC \text{ ARRAY}} = No_{\text{-MOD}} \times \text{Max } V_{OC \text{ modul}} \quad (2.11)$$

2.2.9.9. 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 di bawah 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 [17].

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

Keterangan:

- ρ = Resistivitas kawat tembaga 0,0183 Ω mm²/m
- l = Panjang kabel (meter)
- I = Arus melalui kabel (ampere)
- A = Luas penampang (mm²)

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.

2.2.10.1. Menentukan *Output PLTS Grid-Connected*

Dalam perancangan 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:

- a. Ukuran PV *array*
- b. Jumlah iradiasi (sinar matahari) yang diterimanya
- c. 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:

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

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

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

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_{ilt}

= Radiasi matahari, (1 PSH = 1 kWh / m²)

N

= Jumlah modul dalam *array*

2.2.10.2. 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 [27]:

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

2.2.10.3. Faktor kapasitas (*Capacity Faktor*)

Faktor kapasitas 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 [27]:

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

2.2.11. Aspek Ekonomi

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

2.2.11.1. Biaya

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

1. Biaya Awal (*Capital Cost*)

Biaya investasi awal adalah biaya yang dikeluarkan untuk membangun sebuah sistem hingga siap digunakan. Biaya ini biasanya dikeluarkan di 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 biaya lainnya.

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.

3. **Biaya Perawatan (Maintenance Cost)**

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

2.2.11.2. **Analisa Finansial**

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

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. Keterangan pengambilan keputusannya adalah sebagai berikut:

1. 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.
2. 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.
3. 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. **Internal Rate of Return (IRR)**

IRR merupakan nilai *discount rate* yang membuat nilai NPV suatu proyek sama dengan nol. 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.

3. *Simple payback*

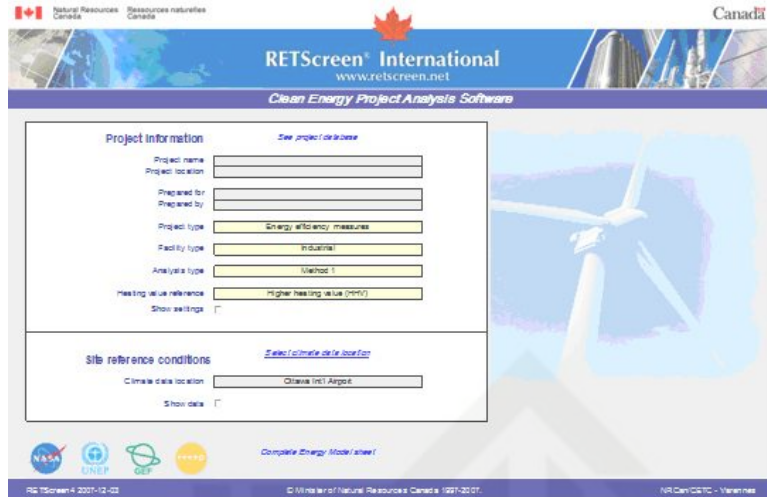
Simple payback adalah pengembalian modal adalah analisis ekonomi pada sistem PV *grid-connected* metode paling mudah untuk dipahami. Dalam PLTS *simple payback* bertujuan menghitung jumlah waktu yang diperlukan untuk memulihkan biaya Investasi berdasarkan penghematan biaya energi tahunan.

2.2.12. *Software yang digunakan dalam analisis di penelitian ini*

1. 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 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.

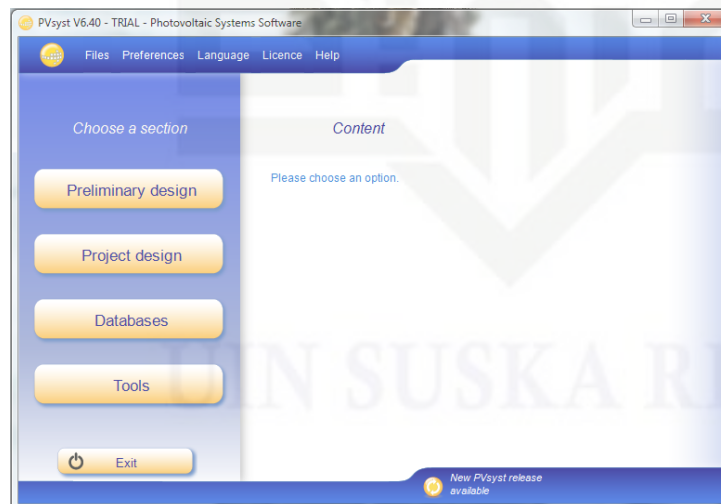
RETScreen menyediakan akses ke *database* iklim global berdasarkan pengukuran tanah dan data satelit NASA, analisa proyek di seluruh dunia yang memungkinkan. Perangkat lunak ini tersedia dalam 35 bahasa dan termasuk *database* peralatan untuk komponen yang diproduksi dan tersedia di seluruh dunia. sumber pelatihan untuk belajar sendiri, digunakan dalam program pelatihan atau program universitas termasuk *webcast*, *slide* presentasi, dan catatan instruktur, studi kasus, pengguna dan bahan lainnya.



Gambar 2.17 RETScreen

2. PVsyst

PVsyst merupakan *software* untuk studi, pengukuran dan analisis data dari sistem PV *Software* dirancang untuk digunakan oleh arsitek, insinyur, dan peneliti. Ini juga merupakan alat yang sangat berguna untuk pelatihan dalam pendidikan. Ini termasuk menu bantuan kontekstual yang terperinci yang menjelaskan prosedur dan model yang digunakan, dan menawarkan pendekatan pengguna-freindly dengan panduan untuk mengembangkan proyek. PVsyst mampu mengimpor data meteo dari berbagai sumber, serta data pribadi. Tahapan dalam penggunaan PVSyst dalam pengembangan proyek PV:



Gambar 2.18 PVSyst

1. Desain awal (*Preliminary design*): ini adalah langkah *pre-sizing* proyek. Dalam mode ini evaluasi hasil sistem dilakukan dengan sangat cepat dalam nilai-nilai bulanan, hanya menggunakan sangat sedikit karakteristik sistem umum atau parameter, tanpa menentukan komponen sistem yang sebenarnya. Sebuah

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.

perkiraan kasar dari biaya sistem juga tersedia. Untuk sistem grid-connected, dan terutama untuk membangun integrasi, tingkat ini akan arsitek-oriented, yang membutuhkan informasi tentang daerah yang tersedia, teknologi PV (warna, transparansi, dll), daya yang diperlukan atau investasi yang diinginkan. Untuk sistem yang berdiri sendiri alat ini memungkinkan untuk ukuran daya PV dan baterai kapasitas yang diperlukan, mengingat profil beban dan probabilitas bahwa pengguna tidak akan puas. Untuk sistem pompa, kebutuhan air diberikan dan kedalaman untuk memompa, dan menentukan beberapa pilihan teknis umum, alat ini mengevaluasi kekuatan pompa dan ukuran array PV diperlukan. Adapun sistem yang berdiri sendiri, ukuran ini dapat dilakukan sesuai dengan probabilitas tertentu yang kebutuhan air tidak terpenuhi sepanjang tahun.

2. Desain Proyek (*Project Design*): bertujuan untuk melakukan desain sistem menyeluruh menggunakan simulasi jam rinci. Dalam kerangka proyek, pengguna dapat melakukan simulasi sistem yang berbeda berjalan dan membandingkan mereka. Dia harus menentukan orientasi pesawat (dengan kemungkinan pelacakan pesawat atau gudang pemasangan), dan untuk memilih komponen sistem tertentu. Dia dibantu dalam merancang PV array (jumlah modul PV secara seri dan paralel), diberi pilihan model yang inverter, baterai atau pompa. Pada tahap kedua, pengguna dapat menentukan parameter yang lebih rinci dan menganalisis efek baik seperti perilaku termal, kabel, kualitas modul, ketidakcocokan dan sudut datang kerugian horizontal (*shading*), atau nuansa parsial dekat objek pada array dan sebagainya.
3. Sistem pemompaan, beberapa desain sistem dapat diuji dan dibandingkan satu sama lain, dengan analisis rinci tentang perilaku dan efisiensi. Hasil mencakup beberapa puluhan variabel simulasi, yang dapat ditampilkan dalam nilai-nilai bulanan, harian atau per jam, dan bahkan ditransfer ke perangkat lunak lain. "Rugi Diagram" sangat berguna untuk mengidentifikasi kelemahan dari desain sistem. Sebuah laporan insinyur dapat dicetak untuk setiap simulasi dijalankan, termasuk semua parameter yang digunakan untuk simulasi, dan hasil utama. Evaluasi ekonomi rinci dapat dilakukan dengan menggunakan harga komponen nyata, biaya tambahan dan kondisi investasi.
4. Database: manajemen database - untuk data dan PV meteorologi komponen. Pembuatan dan pengelolaan situs geografis, generasi dan visualisasi data

meteorologi jam, impor data meteorologi dari beberapa sumber yang telah ditetapkan atau dari file ASCII kustom. Manajemen database dari produsen dan komponen PV, termasuk modul PV, Inverter, Regulator, Generator, Pompa, dan sebagainya.

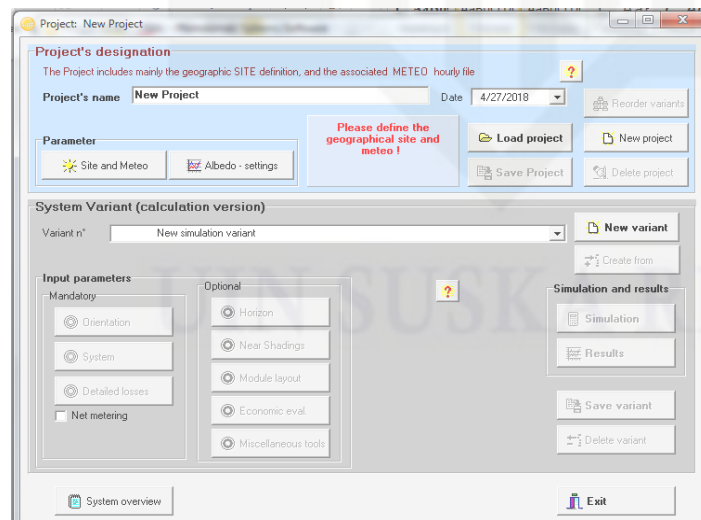
Untuk menjalankan *software* dan memulai desain sistem simulasi dapat dilihat pada gambar berikut:

1. Project design



Gambar 2.19 Halaman *project design*

2. Grid-Connected



Gambar 2.20 Halaman *project design grid-connected*

Penggunaan kedua *software* tersebut yang mana pertama adalah PVSyst untuk digunakan analisis teknis dengan memasukan lokasi lebih sesuai dengan titik koordinat dan

beban serta komponen dari produk *database*, dan software ini akan secara otomatis mengkalulasi ukuran setiap komponen. Kedua menggunakan software RETScreen dalam menganalisis ekonomi untuk memperkirakan nilai ekonomi lebih terperinci sampai usia masa sistem dari PVSyst.

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.

