

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian telah dilakukan untuk menemukan sumber energi terbarukan. Berikut ini merupakan rujukan penelitian yang pernah dilakukan untuk mendukung penulisan skripsi ini, diantaranya:

Hakim, Muhammad Fahmi (2017) Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, melakukan penelitian tentang " Perancangan *Rooftop Off Grid* Solar Panel Pada Rumah Tinggal Sebagai ALternatif Sumber Energi Listrik". Penelitian ini bertujuan untuk kebutuhan energi listrik yang berasal dari energi non-terbarukan semakin meningkat setiap tahunnya. Jadi ada Upaya harus dilakukan untuk mengurangi atau bahkan menghilangkan ketergantungan pada listrik dari PLN. Salah satu cara itu Praktis dan mudah adalah mendesain panel surya atap di atas rumah. Berdasarkan perhitungan dan Desainnya, panel surya yang dibutuhkan sebanyak lima panel berdaya 275 WP, berkapasitas solar *charge* Pengendali yang digunakan pada 85 A, dibutuhkan empat baterai 12 V 230 Ah, inverter memiliki kekuatan DC sampai 1800 W dan output daya AC 1500 W maksimal, dan juga penampang konduktor yang dibutuhkan adalah 2,5 mm² dengan *rating* MCB 16 A.

Hafid, Abdul, Zainal Abidin, Saddam Husain, dan Rahmat Umar (2017) Jurnal Listrik Telekomunikasi Elektronika (pISSN: 1693-8097; eISSN: 2549-8762) Vol. 14 No.1, melakukan penelitian tentang "Analisa Pembangkit Listrik Tenaga Surya Pulau Balang Lompo". Penelitian ini bertujuan untuk analisis sistem tata surya pada PT Pulau Balang Lompo dengan menghitung kapasitas tenaga surya yang terpasang dan gangguan tenaga surya Analisis selama operasi, ada beberapa perubahan baik komponen maupun daya yang dipasok tenaga surya.

Jufrizel,MT dan Muhammad Irfan, ST (2017) UIN Sultan Syarif Kasim Riau, melakukan penelitian tentang "Perencanaan Teknis dan Ekonomis PLTS Sistem *On-Grid*". Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui

analisis teknis PLTS menggunakan data beban penerangan di Gedung Terpadu PT. Pertamina RU II Dumai sebesar 496 kWh untuk menentukan kapasitas sistem PLTS mencakup modul PV, dan inverter sentral, perhitungan biaya, simulasi menggunakan software PVsyst dan juga analisis ekonomis. Untuk mengevaluasi pengoperasian PLTS maka digunakannya analisis ekonomis dengan metode, seperti NPW (*Net Present Worth*), CF (*Cash Flow analysis*), B-CR (*Benefit–Cost Ratio analysis*), dan PP (*Payback Period*). Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan untuk memenuhi beban harian sebesar 496 kWh dapat disuplai dari sistem PLTS dengan kapasitas *photovoltaic array* sebesar 517 kWp, dan inverter sebesar 100 kW. Nilai CFB sebesar Rp.108.943.024.578, CFC sebesar Rp.23.263.500.042, NPV sebesar Rp.85.679.524.536, BCR sebesar 30,9 dan PP selama 17,5 tahun.

Naim, Muhammad dan Setyo Wardoyo (2017) Akademi Teknik Sorowako, melakukan penelitian tentang “Rancangan Sistem Kelistrikan PLTS *On-Grid* 1500 Watt Dengan *Back Up Battery* Di Desa Timampu Kecamatan Towuti”. Penelitian di Desa Timampu kecamatan Towuti tentang PLTS *On-Grid* dengan kapasitas 1500 Watt dengan *backup* baterai adalah suatu sistem yang terhubung dengan jaringan PLN dan sumber PLN tersebut masih tetap menjadi sumber energi utama untuk memenuhi kebutuhan sehari-hari kemudia PLTS *On-Grid* hanya sebagai energi tambahan, energi tambahan PLTS *On-Grid* ini tersimpan didalam baterai dan dapat digunakan jika terjadi suatu gangguan listrik. Komponen-Komponen yang digunakan untuk perancangan sistem kelistrikan PLTS *On Grid* 1500 Watt dengan *Backup Battery* yaitu 6 Panel surya 250 Wp, MPPT *Solar Charge Controller* 1500 Watt, AKI basah 24 Volt 160 Ah, 2 x 100 Ah dan 2 x 60 Ah, *Pure Sine Wave* inverter 1500 Watt dan KWH meter piringan 2 arah putaran.

Myson, Ir. H., MT (2016) Universitas Batanghari Jambi, melakukan penelitian tentang “Desain Pembangkit Listrik Tenaga Surya Pada Daerah Pesisir Kuala Tungkal Tanjab Barat”. Penelitian ini bertujuan untuk penggunaan PLTS yang tidak dapatnya diprediksi keacaan cuaca dalam waktu yang singkat, sehingga produksi energi listrik sulit dapat memenuhi target

yang diharapkan, dan hal ini membuat ketidak nyamanan pengguna. Perlunya penelitian terhadap efisiensi modul solar panel, karena saat ini efisiensi yang dihasilkan modul solar panel masih sangat rendah, sehingga untuk mendapatkan 1 KWh energi listrik masih tergolong sangat mahal.

Engelbertus, Tomi (2016) Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tanjungpura, melakukan penelitian tentang “Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Catu Daya Untuk Tambahan Pada Hotel Kini Pontianak”. Penelitian di Hotel Kini Kota Pontianak ini bertujuan untuk perencanaan sistem PLTS sebagai energi simpanan. PLTS yang digunakan yaitu PLTS *On-Grid* tidak menggunakan baterai. Dengan memakai panel surya 300 Wp, dan di Kota Pontianak rata-rata harian intensitas paling minimum 3,08Kw/m²/hari, pada Kota Pontianak suhu rata-rata 28,22 °C, Pada perencanaan PLTS ini membutuhkan 99 buah panel surya, 3 buah inverter *single phase grid connected* 10.000 watt. Untuk memasang panel surya di Kota Pontianak lebih baik menggunakan sudut kemiringan 0° , hal tersebut berdasarkan letak geografis Kota tersebut. Daya yang dihasilkan dalam perencanaan ini yaitu 90,003kWh/hari atau sebesar 32.851,095 kWh/tahun. Biaya investasi dalam perencanaan PLTS ini sebesar Rp. 688.201.200,00, dan menurut analisis ekonomis NPV (*Net Present Value*), PI (*Profitability Index*), dan DPP (*Discounted Payback Period*), dari analisis tersebut maka perencanaan ini layak untuk diterapkan.

Syafik, Mhd. dan Ibnu Kahfi Bachtiar (2016) Teknik Elektro, Universitas Maritim Raja Ali Haji, melakukan penelitian tentang ”Rancangan Implementasi PLTS Skala Rumah Tangga Menggunakan *Software* HOMER untuk Masyarakat Kelurahan Pulau Terong Kecamatan Belakang Padang Kota Batam”. Penelitian ini menggunakan 2 kategori yaitu kategori 1 450 VA *On-Grid* dengan software HOMER dan komponen yang digunakan 1 kWp Panel Surya, 2 unit *battery*, dan 3 kW inverter dengan biaya total NPC sebesar US\$1.634, melainkan sistem *Off-Grid*nya komponen yang digunakan 2 kWp Panel Surya , 5 Unit *Battery*, dan 3 kW Inverter dengan biaya total NPC sebesar US\$5.378. Untuk kategori 2 900 VA *On-Grid* komponen yang

digunakan 1,5 kWp Panel Surya, 2 Unit *battery*, dan 3 kW inverter dengan biaya total NPC sebesar US\$7.361, melainkan sistem *Off-Grid* komponen yang digunakan 2,5 kWp Panel Surya, 15 Unit *Battery*, dan 3 kW Inverter dengan biaya total NPC sebesar US\$12.116.

Sianipar, Rafael (2014) Jurusan Teknik Elektro Trisakti, melakukan penelitian tentang “Dasar Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya”. Penelitian ini bertujuan untuk pemanfaatan energi surya sebagai pembangkit tenaga listrik berkembang pesat, akan tetapi belum ada standard terkait pembangunan PLTS di Indonesia. Pembangunan PLTS dapat mempercepat rasio kelistrikan dan mengurangi konsumsi bahan bakar minyak di daerah terpencil. PLN yang bertanggung jawab dalam meningkatkan rasio kelistrikan memerlukan standard teknis yang dapat digunakan oleh kantor wilayah dalam merencanakan dan membangun PLTS. Pada makalah ini dibahas konfigurasi dasar PLTS, spesifikasi teknis peralatan utama seperti modul surya, inverter dan baterai serta pertimbangan dalam menentukan kapasitas PLTS.

Islamy, Zawahar dan Agung Sudrajad (2014) Jurusan Teknik Mesin, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, melakukan penelitian tentang “Studi Perencanaan Atap Panel Surya di Hotel The Royale Krakatau Cilegon”. Penelitian ini bertujuan untuk daya yang dihasilkan dari pemasangan panel surya direncanakan akan mensubstitusi kebutuhan sebagian energi listrik di hotel seperti penerangan lampu-lampu. Metode yang digunakan adalah metode observasi dan perhitungan empiris menyangkut daya output dan luasan panel surya. Dari studi perencanaan yang dilakukan, daya *output* yang dihasilkan oleh pemasangan panel surya adalah 10% dari kebutuhan total energi listrik di hotel.

Rahayuningtyas Ari, Seri Intan Kuala, dan Ign. Fajar Apriyanto (2014) Pusat Pengembangan Teknologi Tepat Guna, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, melakukan penelitian tentang “Studi Perencanaan Sistem PLTS Skala Rumah Sederhana didaerah Pedesaan Sebagai Pembangkit Listrik Alternative Untuk Mendukung Program Ramah Lingkungan dan Energi Terbarukan” Penelitian ini bertujuan untuk penerangan rumah, TV dan

catu daya pada tiap rumah sederhana warga. Untuk skala rumah sederhana pada studi perancangan PLTS di daerah pedesaan digunakan oleh calon pemakai energi listrik sebagai sumber energi alternative yang ramah lingkungan dan menerapkan energi terbarukan yaitu PLTS. Untuk memperhitungkan dan merencanakan PLTS ini harus bias menentukan kebutuhan minimal berapa energi listrik yang dibutuhkan sebelum dalam membeli komponen-komponen PLTS agar dapat menghindari pembelian komponen yang tidak dibutuhkan. Melihat harga dalam perencanaan PLTS ini relative sangat mahal.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya)

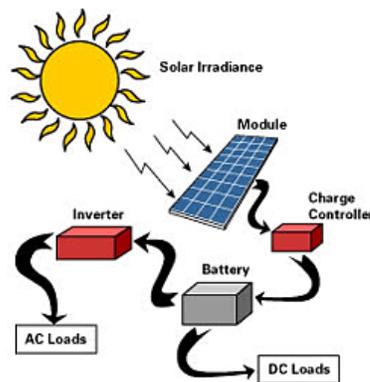
Suatu pembangkit energi listrik yang memanfaatkan energi dari cahaya matahari menuju ke sel surya dapat mengubah suatu radiasi cahaya foton matahari menjadi energi listrik adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) (Anggara, 2014). Unjuk kerja PLTS sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu faktor lingkungan, faktor temperature PV modul, faktor kondisi cuaca lingkungan dan faktor Intensitas cahaya matahari. Sel surya yang mendapat penyinaran sinar matahari merupakan salah satu sumber energi yang sangat menjanjikan. Dalam keadaan puncak atau saat posisi matahari tegak lurus, sinar matahari yang jatuh di permukaan sel surya seluas satu meter persegi akan mampu menghasilkan energi listrik 900 hingga 1000 Watt (Jatmiko, 2011).



Gambar 2.1. Sel Surya yang sudah dipasang ke dalam panel surya
(sumber : Visnu Semara Putra, 2015)

Sel surya adalah beberapa lapisan tipis dari suatu bahan semikonduktor silikon (Si) murni, dan bahan semikonduktor lainnya. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) untuk menghasilkan energi listrik yaitu membutuhkan listrik DC yang dihasilkan oleh cahaya matahari, selanjutnya terhubung dengan inverter untuk diubah menjadi listrik AC, saat cuaca mendung dan selama cahaya matahari masih ada maka PLTS masih dapat menghasilkan energi listrik.

PLTS merupakan suatu pencatu daya, bisa dirancang sebagai mencatu kebutuhan listrik dalam skala kecil maupun skala besar, untuk secara mandiri ataupun untuk *hybrid* (dikombinasikan dengan beberapa sumber energi lain), baik menggunakan metode desentralisasi (satu rumah satu pembangkit) maupun menggunakan metode sentralisasi (listrik didistribusikan dengan jaringan kabel). Energi terbarukan yang energinya tidak habis-habis dan memanfaatkan energi cahaya matahari sebagai sumber energi utamanya, ramah lingkungan dan tanpa menimbulkan suara bising ataupun limbah itu adalah PLTS. (Muhammad Naim & Setyo Wardoyo, 2017).



Gambar 2.2. Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya.

(sumber : <https://tenagamatahari.wordpress.com/beranda/konsep-kerja-sistem-plts/>)

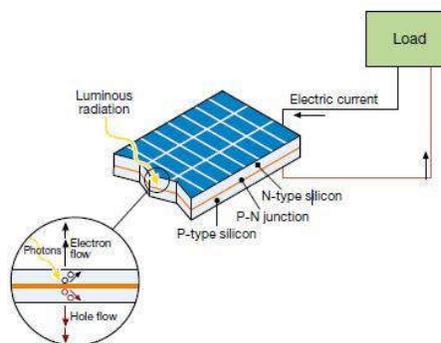
2.2.2 Prinsip Kerja Sel Surya (*Photovoltaic*)

Terjadinya Mekanisme konversi energi cahaya dikarenakan adanya suatu elektron bebas yang berpindahan menuju ke atom. Untuk menghasilkan elektroda bebas maka dipilihlah material semikonduktor yang digunakan pada Sel surya. Padatan logam yang elektron valensinya

ditentukan berdasarkan konduktifitas elektriknya merupakan material semikonduktor. Konduktifitas Material semikonduktor secara signifikan akan meningkat.

Untuk menghasilkan energi yang cukup besar dan dapat memisahkan suatu elektron terlepas dari struktur atomnya. Maka foton dari sumber cahaya harus menabrak ke elektron valensi dari atom semikonduktor. elektron yang bermuatan negative ini terlepas dan bebas bergerak pada bidang Kristal dan dalam posisi didaerah pita konduksi dari material semi konduktor. Elektron yang hilang dapat mengakibatkan kekosongan pada struktur Kristal atau biasa disebut “hole” dengan muatan positif.

Daerah semikonduktor sebagai pendonor elektron dengan memanfaatkan elektron bebas, bersifat negatif sebagai pendonornya disebut *negative type (n-type)*. Dan untuk daerah semikonduktor sebagai penerima (*acceptor*) elektron dengan *hole*, dan bersifat positif disebut *positive type (p-type)*. Untuk menciptakan energi listrik internal maka ikatan Sisi positif dan sisi negative akan mendorong elektron bebas dan *hole* untuk bergerak kesuatu arah yang berlawanan. Elektron dan *hole* akan bergerak menjauhi sisi negatif (untuk elektron) dan sisi positif (untuk *hole*). Sebuah arus listrik akan tercipta jika *p-n junction* ini dihubungkan dengan suatu beban (lampu).



Gambar 2.3 Susunan Lapisan *Solar Cell*

(Sumber: ABB QT Vol. 10 P. 8)

Material semikonduktor yang bervalensi empat adalah silikon. Kelebihan silikon yaitu memiliki nilai resistifitas yang tinggi hingga mencapai $300.000 \Omega \text{ cm}$. Kekurangan silikon yaitu terdapat pada tingginya biaya produksi *silikonwafer*, Hal tersebut karena dibutuhkan kemurnian silikon yang sangat tinggi hingga di atas 99,9% agar dapat mendapatkan kinerja sel surya yang baik. Dapat dilakukan pengembangan dengan meminimalisir material yang digunakan agar dapat mengurangi biaya produksi. (Visnu Semara Putra, 2015).

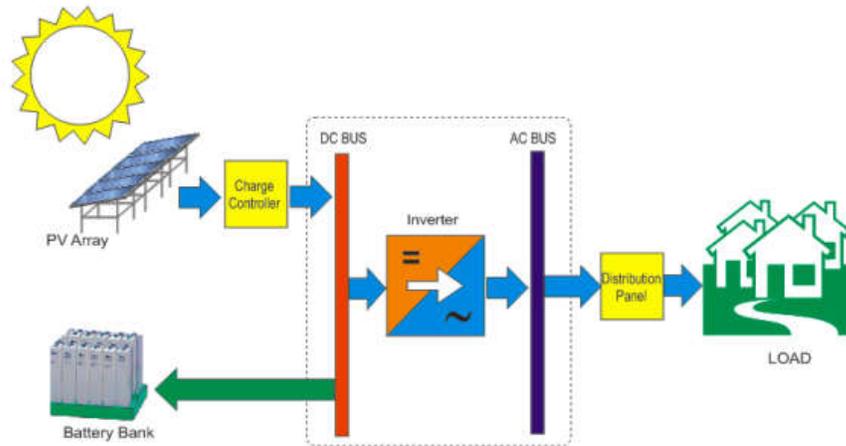
2.2.3 PLTS *Off Grid*

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Off-Grid* adalah suatu sistem pembangkit listrik alternative untuk suatu daerah-daerah terpencil atau daerah-daerah pedesaan yang tidak terjangkau oleh jaringan listrik PLN. Sulitnya akses dan mobilisasi ke lokasi menjadikan biaya investasi pengembangan jaringan listrik atau pembangkit konvensional menjadi besar, serta biaya operasional dan pemeliharaan yang sedikit akibat sulitnya jalur transportasi menuju lokasi. Sistem PLTS *Off-Grid* mengandalkan energi matahari sebagai satusatunya sumber listrik sehingga aman dari polusi atau tidak mencemari udara.

Sistem PLTS *Off-Grid* merupakan solusi terbaik dalam penyediaan energi listrik di daerah terpencil dengan memanfaatkan energi matahari yang dikonversi menjadi energi listrik untuk melayani kebutuhan listrik penduduk dengan sistem pengoperasian dan perawatan yang sangat mudah serta dapat berfungsi selama 10 tahun tanpa adanya penggantian peralatan. Pemilihan Sistem PLTS *Off Grid* didasarkan atas pertimbangan beberapa faktor, yaitu Pola pemukiman antar rumah yang cukup menyebar, Sulit untuk mendapatkan transportasi darat, belum memerlukan integrasi dengan pembangkit lain, modular dan mudah dikembangkan, kapasitas kecil sehingga mudah di instalasi, harga terjangkau, radiasi matahari sebagai sumber energi mencukupi, dan tidak tergantung terhadap bahan bakar minyak (Rahayuningtyas, dkk. 2014).

Secara umum mode operasi PLTS Sistem *Off-Grid* dapat diuraikan sebagai berikut:

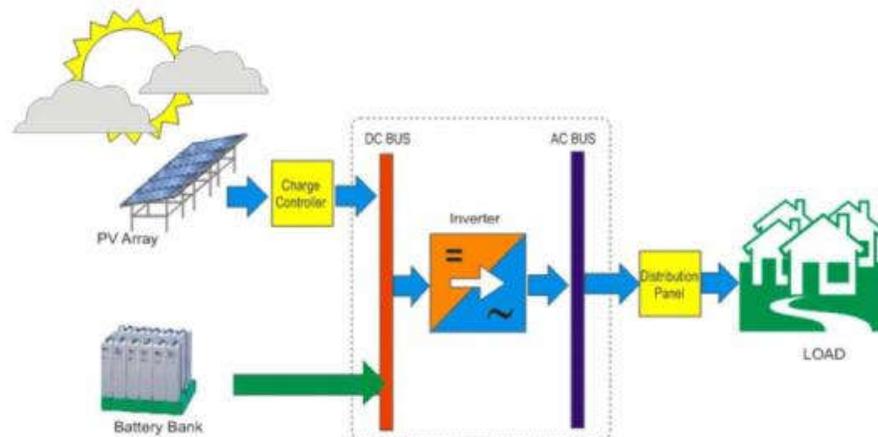
- **Pagi Hari Saat Energi PV > Kebutuhan Beban**



Gambar 2.4. Diagram aliran energi pada siang hari

(Sumber: <https://tmlenergy.co.id/wp.../01/Proposal-Off-Grid-PV-System.pdf>)

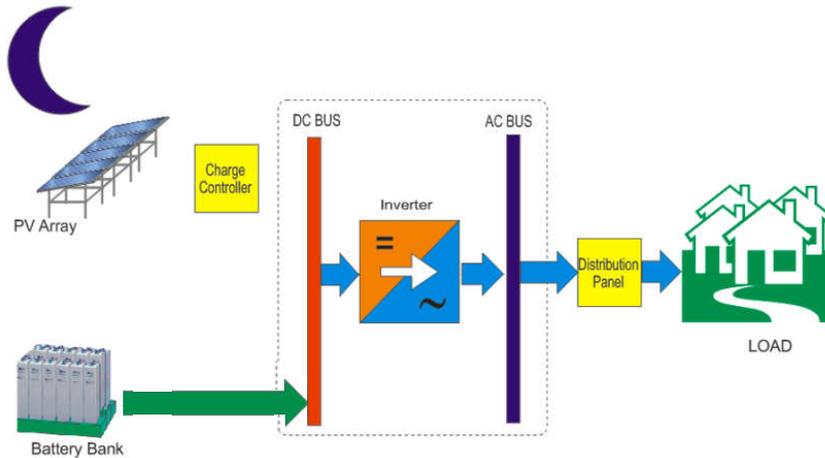
- **Siang Hari Saat Energi PV < Kebutuhan Beban**



Gambar 2.5. Diagram aliran energi pada siang hari kondisi mendung

(Sumber: <https://tmlenergy.co.id/wp.../01/Proposal-Off-Grid-PV-System.pdf>)

- **Malam Hari**



Gambar 2.6. Diagram aliran energi pada malam hari

(Sumber: <https://tmlenergy.co.id/wp.../01/Proposal-Off-Grid-PV-System.pdf>)

2.2.4 Komponen-komponen Sistem PLTS *Off-Grid*

2.2.4.1 Sel surya (*photovoltaics*)

Sel surya merupakan komponen penting dalam konversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik yang pada umumnya dibuat dari bahan semikonduktor. Luas dari sel surya ini sekitar 10-15 cm². Energi yang di hasilkan dari sel surya adalah energi listrik DC dan dapat diubah menjadi energi listrik AC jika dibutuhkan, selama masih ada cahaya matahari dan meskipun cuaca mendung, energi listrik masih dapat dihasilkan sel surya. Bahan semikonduktor silikon (Si) murni, dan bahan semikonduktor lainnya adalah Lapisan-lapisan tipis yang terdapat di sel surya. Tenaga listrik yang dibangkitkan oleh sel surya tunggal sangat kecil sehingga dibutuhkan beberapa sel surya yang digabungkan menjadi sebuah komponen yang disebut panel surya atau *solar module*. Panel surya inilah yang diproduksi pabrik sel surya pada umumnya. Dan apabila beberapa panel surya digabungkan menjadi satu akan membentuk suatu komponen

yang disebut *solar array*, *solar array* untuk meningkatkan energi listrik dari panel surya.

Kini telah berhasil mengembangkan dua jenis sel surya yang umum digunakan dalam Pembangkit Listrik Tenaga Surya. Jenis sel surya itu antara lain *monocrystalline* dan *polycrystalline*. Tiap jenis sel surya mempunyai kelebihan dan kekurangan masing-masing.

Tipe *monocrystalline* mempunyai efisiensi yang sangat tinggi sekitar 16-17 % bahkan ada yang memiliki efisiensi hingga 20%. Selain itu dimensi dari tipe ini lebih kecil. Namun dalam proses produksinya menemui kendala pada biaya yang lebih mahal karena proses pembuatannya yang rumit. Selain itu sel surya ini kurang berfungsi dengan baik atau efisiensinya akan berkurang drastis jika cuaca berawan.

Tipe *polycrystalline* mempunyai efisiensi yang lebih rendah dan dimensi yang lebih besar jika dibandingkan dengan tipe *monocrystalline*. Akan tetapi tipe ini dapat menghasilkan energi listrik dalam keadaan cuaca berawan dan mempunyai harga yang lebih murah sehingga banyak dipakai di pasaran (Muhammad Fahmi Hakim, 2017).



Gambar 2.7. Panel surya tipe *monocrystalline* dan *polycrystalline*

(Sumber: <http://energias-renovables-y-limpias.blogspot.co.id/2013/04/que-panel-comprar-monocristalino-o-policristalino.html>)

2.2.4.1.1 Sistem Instalasi Pada Solar Cell

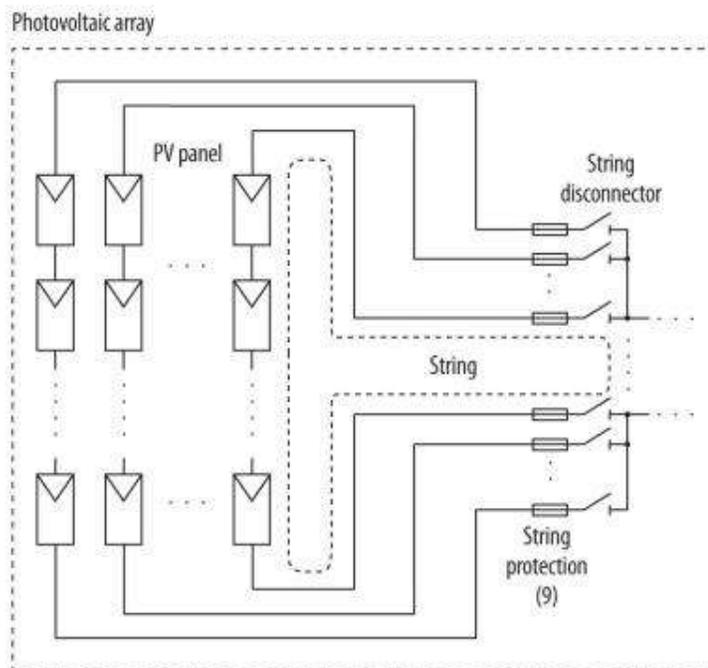
Sistem pengkabelan dalam pemasangan *solar cell* terdiri dari 2 sistem yaitu sistem dengan menggunakan rangkaian seri dan sistem dengan menggunakan rangkaian paralel (Visnu Semara Putra, 2015):

1. *Solar Cell* dengan menggunakan rangkaian seri

Pada rangkaian seri yang terdapat pada *Solar Cell* maka sel surya pertama pada kutub positifnya (+) harus bertemu dengan sel surya kedua kutub negatif (-) dan begitu juga seterusnya.

2. *Solar Cell* dengan menggunakan rangkaian paralel

Pada rangkaian paralel yang terdapat pada *Solar Cell* maka sel surya pada kutub positifnya (+) harus terhubung dengan kutub positif (+) lainnya, begitu juga dengan kutub negatif (-) sel surya harus terhubung dengan kutub positif (-) lainnya.



Gambar 2.8. PV array disusun secara seri dan paralel

(Sumber: <https://gautamakarisma.wordpress.com/2014/03/17/plts-stand-alone-system/>)

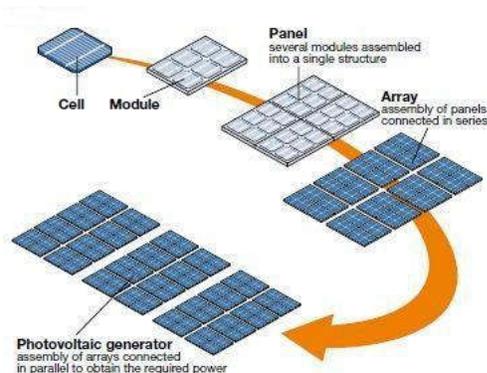
Beberapa modul surya disusun secara seri bertujuan untuk meningkatkan tegangan agar sesuai dengan spesifikasi input dari *charge controller/inverter*. rangkaian modul surya yang dirangkai secara seri disebut *PV string*.

PV string diparalel bertujuan untuk meningkatkan daya sesuai dengan kapasitas yang akan dipasang. sebelum masuk ke charge controller, Modul surya akan diproteksi terlebih dulu dalam sebuah panel yang umumnya disebut *combiner box*. pada *combiner box* terdapat fuse yang memproteksi setiap string, *surge arrester* untuk proteksi petir, MCCB/*disconnecter*, dan beberapa literatur ada yang menyarankan untuk memasang *blocking diode*.

2.2.4.2 Modul Surya

Modul surya (*Photovoltaic Module*) adalah salah satu komponen PLTS yang terdiri dari beberapa sel surya yang dirangkai seri maupun dirangkai paralel bermaksud untuk menciptakan daya listrik yang diinginkan. dan Beberapa modul surya yang disusun disebut *array*.

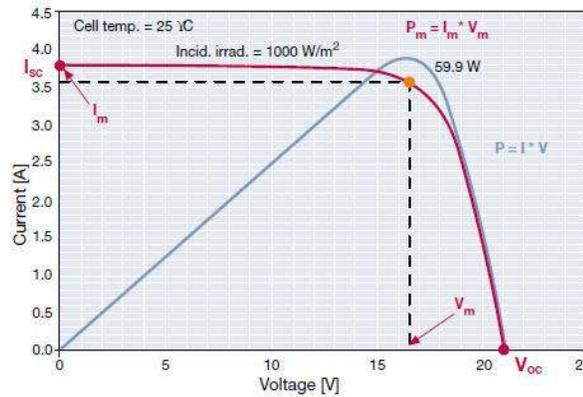
Untuk meningkatkan tegangan (VDC) maka dapat menggabungkan PV modul yang terangkai seri dari sel-sel suryanya. Dan untuk arusnya maka dapat disesuaikan menurut kebutuhan dengan memperhatikan luas permukaan sel surya (Visnu Semara Putra, 2015).



Gambar 2.9. Hubungan Diagram pada *Solar Cell*, Modul, Panel, dan *Array*
(Sumber: ABB QT Vol. 10 P. 9)

2.2.4.2.1 Karakteristik Listrik Modul Surya

Untuk mengetahui besarnya daya puncak (*peak power*) yang dapat dicapai maka dapat ditentukan berdasarkan besarnya arus hubung singkat (*short circuit current*) dan tegangan rangkaian terbuka (*open circuit voltage*) hal tersebut merupakan karakteristik listrik modul surya secara umum, karakteristik modul surya dijelaskan menggunakan kurva arus terhadap tegangan (*I-V Curve*) dapat dilihat pada **Gambar 2.10**.



Gambar 2.10. Kurva karakteristik listrik pada modul surya
(Sumber: ABB QT Vol. 10 P. 18)

Saat modul surya menerima cahaya matahari, pada kutub positif dan negative modul surya diukur menggunakan voltmeter untuk mengetahui tegangan yang dihasilkan. Saat itu sistem belum terhubung ke beban jadi tidak ada arus yang mengalir, maka pengukuran ini disebut *open circuit voltage* (V_{oc}). Mengalirnya arus dari modul surya ke beban hal itu dikarenakan penerapan beban atau pengisian baterai terhubung diantara kedua terminal. Jika hal tersebut terjadi maka, tegangan modul lebih kecil dari pada V_{oc} .

Arus akan bertambah besar dan tegangan akan bertambah kecil jika dengan menambahkan beban yang terhubung secara paralel. Untuk Kedua terminal modul dapat dihubungkan secara langsung, maka tegangan akan menjadi 0 (*nol/zero*), hal tersebut untuk menghasilkan arus yang besar pada modul surya. Dan dapat diketahui arus maksimum

modul tersebut, dengan cara diukur menggunakan amperemeter maka hal ini disebut *short circuit current* atau I_{sc} .

Peak power (daya maksimum) adalah salah satu spesifikasi yang terdapat pada PV (diberikan oleh pabrik pembuatnya). Untuk menciptakan daya listrik maka harus adanya arus dan tegangan dan jika untuk menghasilkan *peak power* dari modul surya pada suatu tegangan dan arusnya harus maksimum dan hal ini dapat dilihat pada **Gambar 2.10** (ABB QT Vol. 10).

2.2.4.2.2 Perhitungan Solar Panel

Untuk menentukan Energi yang dihasilkan oleh Solar Panel terlebih dahulu harus mengetahui berapa jumlah panel yang akan digunakan dan mengetahui Max Power Panel Surya tersebut, untuk dapat mengetahui berapa jumlah Max Power pada Panel Panel surya, biasanya dapat diketahui dengan cara melihat spesifikasi Panel Surya tersebut dikarenakan setiap Panel Surya memiliki *Max Power* yang berbeda-beda setelah itu, lalu menentukan jumlah jam kerja efektif Panel Surya. Jam kerja efektif Panel Surya yaitu 3 – 5 jam/hari (Muhammad Fahmi Hakim, 2017).

Berikut merupakan rumus untuk menghitung energi yang dihasilkan Solar Panel (Ramadhan S.G., & Ch. Rangkuti Ch., 2016) :

Rumus:

$$\text{Energi Yang Dihasilkan} = (N_{\text{Panel}} \times \text{Max Power Panel Surya}) \times t$$

Keterangan:

N_{Panel} = Jumlah berapa panel yang akan digunakan

Max Power = Tegangan Max panel surya

t = Jam Kerja Efektif panel surya (3-5 Jam/hari)

Setelah menentukan energi panel surya selanjutnya yaitu mengetahui tegangan panel surya. Untuk mengetahui tegangan panel surya harus diketahui terlebih dahulu *Open Circuit Voltage (VoC)* Panel surya yang akan digunakan, VoC dapat dilihat pada setiap spesifikasi panel surya dan setelah itu harus mengetahui berapa jumlah panel surya yang akan diseri sesuai sistem yang digunakan dalam perancangan PLTS tersebut.

Berikut merupakan rumus untuk menghitung total tegangan panel surya yang dihasilkan Solar Panel (Muhammad Fahmi Hakim, 2017):

Rumus:

$$\text{Total tegangan panel surya} = \text{VoC} \times \text{Panel Di Seri}$$

Keterangan:

VoC : *Open Circuit Voltage*

Panel Diseri : Jumlah panel diseri sesuai dengan sistem yang akan digunakan

2.2.4.3 Solar charge controller

Solar Charge Controller (SSC) merupakan salah satu komponen PLTS yang berguna untuk *setting* arus listrik (*current regulator*) yang masuk dari panel PV maupun arus beban keluar/digunakan dan berfungsi untuk melindungi baterai dari pengisian yang berlebihan (*over charge*), dan dari panel surya ke baterai dapat di atur tegangan serta arusnya sesuai kebutuhan. Fungsi dan fitur *solar charge controller* sebagai berikut (Visnu Semara Putra, 2015) :

1. Pada saat baterai terisi penuh, arus listrik yang masuk menuju baterai akan dihentikan oleh *controller* agar tidak terjadi *over charge*, hal tersebut bertujuan agar jauh lebih tahan lama ketahanan baterai tersebut. Dan daya listrik yang dihasilkan oleh panel surya akan langsung didistribusikan ke beban/peralatan

listrik sesuai dengan konsumsi daya peralatan listrik dalam jumlah tertentu.

2. *Controller* berfungsi menghentikan pengambilan arus listrik dari baterai oleh beban/peralatan listrik saat baterai hampir dalam keadaan kosong (umumnya sekitar 10% sisa tegangan di baterai), lalu arus beban akan diputuskan oleh *controller* untuk melindungi baterai agar sel sel baterai tidak rusak.. Dari beberapa *type controller*, yang memberitahukan baterai dalam proses *charging* yaitu sebuah lampu indikator yang menyala pada umumnya berwarna merah atau kuning. Saat Kondisi pengambilan arus listrik pada baterai akan dihentikan oleh *controller* bila arus baterai sudah kosong (dibawah 10%), oleh karena itu peralatan listrik / beban tidak dapat beroperasi, dikarenakan beban menampung cukup besar keadaan ini disebut *over discharge*
3. Beberapa tipe – tipe tertentu *controller* biasanya sudah dilengkapi indikator dan digital meter secara lengkap, agar dapat mengamati dan mendeteksi dengan baik segala sesuatu yang terjadi pada sistem PLTS tersebut.



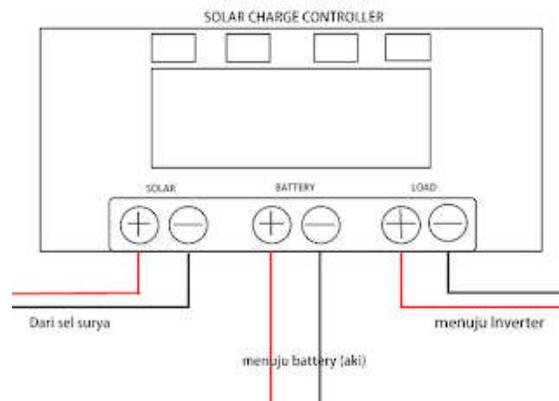
Gambar 2.11. Schneider Conext MPPT 60/150 *Solar Charge Controller*

(Sumber: <https://solar.schneider-electric.com/product/conext-mppt-60-150/>)

Solar charge controller (SCC) yang dapat mendeteksi kapasitas baterai merupakan SCC yang baik untuk digunakan. Jika suatu baterai sudah terisi penuh, maka arus yang mengisi otomatis dari panel surya akan berhenti. Melalui monitor level tegangan baterai pada SCC dapat mendeteksi hal tersebut. Baterai akan terisi sampai ke level tegangan

tertentu oleh *Solar charge controller* jika *level* tegangannya *drop* maka, baterai akan terisi kembali.

Satu input (2 terminal) *Solar charge controller* terhubung dengan keluaran pada panel surya, dan satu output (2 terminal) *Solar charge controller* terhubung dengan baterai lalu satu output (2 terminal) yang terhubung dengan beban. Baterai memiliki arus listrik DC yang tidak dapat masuk ke panel surya dikarenakan dari panel surya menuju baterai terdapat '*diode protection*' yang hanya dapat melewatkan arus listrik DC, bukan sebaliknya. Ukuran (atau rating) suatu alat pengontrol arus masuk dan keluar dari baterai ditentukan berdasarkan satuan Ampere (Muhammad Fahmi Hakim, 2017).



Gambar 2.12. Posisi *solar charge controller* dalam sistem

(Sumber: <https://www.kelistrikan.com/2017/01/cara-memasangkan-panel-surya-PLTS.html>)

2.2.4.3.1 Perhitungan Solar Charge Controller

Untuk menghitung kebutuhan *solar charge controller*, maka harus diketahui terlebih dahulu karakteristik dan spesifikasi dari panel surya, biasanya pada bagian belakang panel surya terdapat spesifikasi teknis, yang harus diperhatikan adalah angka I_{sc} (*Short Circuit Current*) pada panel surya, nilai I_{sc} dikalikan dengan jumlah panel surya yang dirangkai secara paralel sesuai dengan kebutuhan sistem, selanjutnya dikalikan lagi dengan jumlah kelompok panel surya sesuai sistem yang digunakan, hasilnya merupakan minimal nilai Ampere *Solar Charge Controller* yang dibutuhkan.

Berikut rumus untuk menghitung kapasitas *solar charge controller* (SCC) (Muhammad Fahmi Hakim, 2017):

$$I_{SCC} = I_{sc \text{ Panel}} \times N \text{ Panel Paralel} \times 125\%$$

Keterangan:

I_{sc} = Arus SCC (Ampere)

$I_{sc \text{ panel}}$ = Arus yang terdapat pada panel surya

$N \text{ Panel Paralel}$ = Jumlah kelompok panel yang diparalel

125% = Kompensasi

Berikut rumus untuk menghitung berapa Kebutuhan *solar charge controller* (SCC) yang akan digunakan (Muhammad Fahmi Hakim, 2017):

$$N_{SCC} = \frac{I_{SCC}}{\text{Arus SCC}}$$

Keterangan:

N_{SCC} = Jumlah Kebutuhan *Solar Charge Controller*

I_{sc} = Arus *Solar Charge Controller*

Arus SCC = Kapasitas arus maksimal dari *Solar Charge Controller*

2.2.4.4 Baterai

Mengingat PLTS sangat tergantung pada kecukupan energi matahari yang diterima panel surya, maka diperlukan media penyimpanan energi sementara bila sewaktu-waktu panel tidak mendapatkan cukup sinar matahari atau untuk penggunaan listrik malam hari. Baterai harus ada pada sistem PLTS terutama tipe *Off Grid*.

Beberapa teknologi baterai yang umum dikenal adalah *lead acid*, alkalin, NiFe, Ni-Cad dan Li-ion. Masing-masing jenis baterai memiliki kelemahan dan kelebihan baik dari segi teknis maupun ekonomi (harga). Baterai *lead acid* dinilai lebih unggul dari jenis lain jika mempertimbangkan kedua aspek tersebut. Baterai *lead acid* untuk sistem PLTS berbeda dengan baterai *lead acid* untuk operasi *starting* mesin-mesin seperti baterai mobil. Pada PLTS, baterai yang berfungsi untuk

penyimpanan (*storage*) juga berbeda dari baterai untuk *buffer* atau stabilitas. Baterai untuk pemakaian PLTS lazim dikenal dan menggunakan *deep cycle lead acid*, artinya muatan baterai jenis ini dapat dikeluarkan (*discharge*) secara terus menerus secara maksimal mencapai kapasitas nominal. Baterai adalah komponen utama PLTS yang membutuhkan biaya investasi awal terbesar setelah panel surya dan *inverter*. Namun, pengoperasian dan pemeliharaan yang kurang tepat dapat menyebabkan umur baterai berkurang lebih cepat dari yang direncanakan, sehingga meningkatkan biaya operasi dan pemeliharaan. Atau dampak yang paling minimal adalah baterai tidak dapat dioperasikan sesuai kapasitasnya.

Kapasitas baterai yang diperlukan tergantung pada pola operasi PLTS. Besar kapasitas baterai juga harus mempertimbangkan seberapa banyak isi baterai akan dikeluarkan dalam sekali pengeluaran. Kapasitas baterai dinyatakan dalam Ah atau Ampere *hours*. Jika suatu PLTS menggunakan baterai dengan kapasitas 2000 Ah dengan tegangan sekitar 2 Volt. Maka baterai tersebut memiliki kemampuan menyimpan muatan sekitar $2000 \text{ Ah} \times 2 \text{ V}$ atau 4 kWh (Rafael Sianipar, 2014).

Beberapa faktor yang harus diperhatikan dalam menentukan jenis dan kapasitas baterai untuk suatu PLTS dan pengaruhnya pada umur baterai antara lain: DoD (*Depth of Discharge*), jumlah siklus, efisiensi baterai, *discharge/charge rate* dan temperatur.

2.2.4.4.1 Depth of Discharge (DoD)

Depth of discharge adalah jumlah muatan/energi yang dikeluarkan atau dipakai dari baterai. DoD dinyatakan dengan persentase dari kapasitas nominal baterai. DoD 80% artinya bahwa baterai tersebut telah melepaskan muatannya 80% dari 100% *ratingnya*. Pada kondisi ini baterai tinggal memiliki muatan sekitar 20% yang disebut juga dengan SOC atau *stated of charge*.

Semakin besar DoD suatu baterai semakin pendek umur baterai tersebut. Dalam perhitungan, baterai dinyatakan dengan 2 (dua) angka DoD yaitu DoD maksimal dan DoD harian. DoD maksimal adalah DoD terbesar yang dapat dicapai baterai. Jika DoD maksimal dicapai, *charge controller* akan memutuskan hubungan baterai dengan beban (*cut-off*). Sedangkan DoD harian adalah batas DoD rata-rata yang akan dicapai dalam setiap siklus normalnya.

Umumnya baterai sistem PLTS direncanakan untuk DOD 25% hingga 30% sehingga umur baterai sekitar 5 tahun. Ini berarti, kapasitas baterai harus beberapa kali jumlah energi yang akan dilepas dalam satu siklus. Umur baterai berpengaruh langsung dengan DoD dalam setiap siklusnya. Baterai dengan DoD 50% akan memiliki umur lebih panjang dua kali. Jika DoD 10%, maka umurnya akan bertambah 5 kali dari DoD 50%. Konsekuensinya adalah tingginya biaya baterai (Rafael Sianipar, 2014).

2.2.4.4.2 Jumlah Siklus Baterai

Satu kali proses lengkap dari satu kali proses pengeluaran (*discharge*) dan satu kali proses pengisian kembali (*charge*) disebut 1 *cycle*. Umur baterai biasanya dinyatakan dengan jumlah siklus baterai. Jika suatu baterai dinyatakan memiliki umur siklus 1800 *cycle*, dan dioperasikan sebanyak 1 *cycle* perhari, maka umur baterai relatif $1.800/(1 \times 365 \text{ hari})$ sama dengan 4,9 tahun. Tapi jika 2 *cycle*/hari maka umur baterai turun menjadi 2,5 tahun.

2.2.4.4.3 Efisiensi Baterai

Sesuai fungsinya sebagai media penyimpan sementara, maka proses penting yang terjadi pada baterai adalah pengisian (*charging*) dan pengeluaran (*discharging*). Rugi-rugi di baterai adalah karena adanya *internal resistance* sehingga sebagian energi listrik diubah menjadi panas pada saat *charging* dan *discharging*. Selama 1 *cycle* efisiensi baterai sekitar 75%. Efisiensi dalam 1 siklus disebut dengan *round trip efficiency*.

2.2.4.4.4 Discharge dan Charge Rate

Faktanya, baterai hampir tidak dapat dioperasikan sesuai dengan *rating* yang disebutkan. Kapasitas baterai sering dihubungkan dengan *rate* dari *charge* atau *discharge* baterai tersebut. *Charge rate* atau *discharge rate* adalah bilangan yang menyatakan waktu yang dibutuhkan baterai dalam mengeluarkan atau mengisi muatannya. *Discharge rate* disimbolkan dengan Cxx dan umumnya baterai distandarkan dengan rate C20, artinya berapa besar arus yang mampu dikeluarkan suatu baterai dalam waktu 20 jam. Jika suatu baterai memiliki kapasitas 2000 Ah, maka pada skala C20, baterai tersebut mampu mengeluarkan arus maksimal $2000 \text{ Ah}/20 \text{ jam} = 100 \text{ A}$. Jika baterai harus digunakan untuk mengeluarkan arus lebih besar dari 100 A, maka secara teori baterai akan mampu selama $2000 \text{ Ah}/200 \text{ A} = 10 \text{ jam}$. Tapi faktanya, kapasitas baterai akan segera berkurang tidak mencapai 10 jam. Semakin besar *discharge rate* semakin kecil kemampuan kapasitas baterai. Laju *charging* dan *discharging* akan menentukan efisiensi juga, semakin cepat lajunya akan semakin rendah efisiensinya, hal ini dikarenakan arus listrik yang mengalir akan semakin meningkat.

2.2.4.4.5 Temperatur Baterai

Temperatur baterai sangat mempengaruhi kinerja baterai. Semakin tinggi temperatur baterai semakin mampu baterai bekerja pada kapasitas maksimalnya, dan sebaliknya. Namun, pengoperasian baterai pada temperatur yang lebih tinggi akan menyebabkan baterai mengalami penuaan dini (*aging*). Temperatur ideal baterai adalah sekitar $20^{\circ}\text{-}25^{\circ}\text{C}$.



Gambar 2.13. Baterai Sunlight 12V 200Ah

(Sumber: <http://www.systems-sunlight.com/wp-content/uploads/2014/11/spg-12v-200ah.pdf>)

2.2.4.4.6 Perhitungan Baterai

Untuk menghitung jumlah baterai yang dibutuhkan menggunakan rumus sebagai berikut (Ari Rahayuningtyas et al, 2014):

Tahap 1

Pada tahap ini yaitu menentukan kapasitas daya panel dengan DOD (*Depth of discharge*) 50%, dengan demikian kebutuhan daya kita kalikan 2 x lipat dan bisa dilihat pada rumus dibawah ini:

Kapasitas Daya Panel dengan DOD 50%

$$= \text{Total daya panel} \times (\text{DOD } 50\% = 2)$$

Tahap 2

Pada tahap ini yaitu menentukan Kapasitas Daya Panel Setelah 2x lipat dengan 3 hari tanpa matahari, dapat dilihat dengan rumus sebagai berikut:

Kapasitas Daya Panel Setelah 2x lipat dengan 3 hari tanpa matahari

$$= \text{Total Daya panel setelah 2x lipat} \times 3 \text{ hari tanpa matahari}$$

Tahap 3

Pada tahap ini yaitu menentukan kebutuhan baterai panel surya yang nantinya akan digunakan dalam PLTS ini dan dapat dilihat dengan rumus sebagai berikut:

Kebutuhan Baterai Panel Surya

$$= \text{Kapasitas Daya Panel Setelah 2x lipat dengan 3 hari tanpa matahari} \times \text{Tegangan Baterai} \times \text{Kapasitas Baterai}$$

Tahap 4

Pada tahap ini harus sudah menentukan terlebih dahulu sistem yang digunakan dalam perancangan PLTS ini agar memudahkan dalam menentukan kapasitas baterai yang dihasilkan.

$$\mathbf{B_{paralel}} = \frac{\mathbf{N \text{ baterai}}}{\mathbf{B \text{ seri}}}$$

Keterangan :

B_{paralel} = Baterai yang akan dirangkai paralel

N_{baterai} = Jumlah keseluruhan baterai yang digunakan

B_{seri} = Baterai yang dirangkai seri sesuai dengan system yang digunakan

Setelah ditemukan hasil berapakah baterai yang di paralel maka selanjutnya dapat mengetahui berapa total kapasitas baterai yang dihasilkan dengan menggunakan rumus sebagai berikut ini:

$$\mathbf{Total \ Kapasitas \ Baterai} = B_{\text{paralel}} \times \text{Kapasitas Baterai}$$

2.2.4.5 Inverter

Inverter adalah suatu komponen PLTS yang memiliki sistem kontrol dapat merubah arus listrik searah (DC) yang dihasilkan solar modul menjadi listrik arus bolak-balik (AC) dan juga sebagai pengkondisi tenaga listrik (*power condition*), nantinya kualitas daya listrik yang dari inverter menuju beban atau jaringan listrik akan diatur berapa daya yang dikeluarkan dalam kebutuhan tersebut.

Sistem inverter pada PLTS terbagi menjadi dua macam sistem yaitu (Visnu Semara Putra, 2015):

1. Sistem Inverter 1 fasa Pembangkit Listrik Tenaga Surya yaitu sistem PLTS yang tidak terlalu banyak beban yang digunakan (bebannya kecil).
2. Sistem Inverter 3 fasa Pembangkit Listrik Tenaga Surya yaitu sistem PLTS yang menggunakan beban besar (banyak) dan terhubung dengan jaringan PLN.

Untuk suatu sistem PLTS inverter terdiri dari 2 sistem yaitu yang pertama PLTS *stand alone* atau biasa disebut PLTS berdiri sendiri dan yang kedua

PLTS *grid-connected*. Karakteristik kedua sistem tersebut mempunyai perbedaan, dan dapat dijelaskan dibawah ini: (Visnu Semara Putra, 2015):

1. PLTS *stand-alone* atau PLTS berdiri sendiri, tegangan AC yang konstan harus dapat diberikan oleh inverter terhadap variasi produksi terhadap modul surya dikarenakan terdapat tuntutan beban (*load demand*) yang digunakan.
2. PLTS *grid-connected*, Untuk mengoptimalkan dan memaksimalkan keluaran energi yang dihasilkan oleh modul surya inverter harus mensuplai kembali tegangan yang sama persis dengan tegangan jaringan pada waktu yang sama.

2.2.4.5.1 Konsep Hubungan Inverter

Bentuk rangkaian inverter pada sistem PLTS yang terhubung terhadap panel surya, dan hubungan antara inverter dengan beban atau jaringan hal tersebut yaitu konsep hubungan inverter. Inverter secara umum terdapat dua konsep yaitu inverter sentral atau disebut *central inverters* dan *string inverters*.

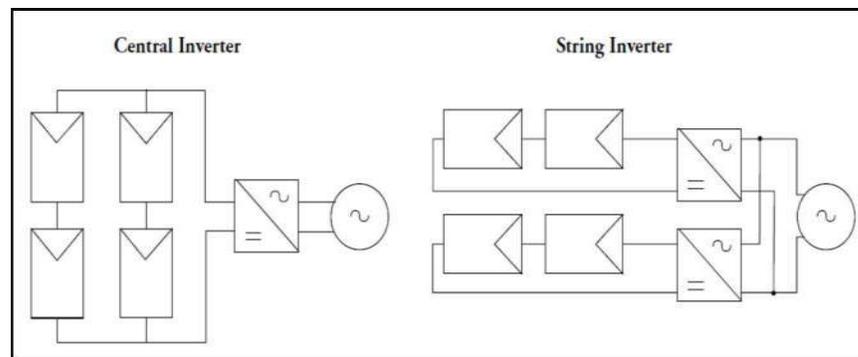
1. *Central Inverters* (Inverter Sentral)

Untuk sistem PLTS skala menengah dan skala besar harus menggunakan konsep *Central inverters* (Inverter sentral) dalam perancangannya. Hal tersebut dikarenakan instalasi *Central inverters* yang lebih handal dan sederhana, tapi ada ketidaksamaan antara rugi-rugi (*mismatch losses*) meningkat, hal tersebut menjadi suatu kekurangan dari *Central inverters* yang disebabkan ketiadaan dari *maximum power point tracking* (MPPT) dari setiap *string* dan variasi profil tegangan dan arus modul surya pada *array* yang sama. pada kemiringan dan sudut orientasi beragam berkaitan dengan iradiasi, bayangan atau tipe modul surya yang berbeda mungkin akan menyebabkan masalah pada suatu *array*. Sistem tiga fasa yang dilengkapi dengan transformator frekuensi jaringan (*grid frequency*

transformer) biasanya terdapat di *Central inverters*. Selain itu konfigurasi yang digunakan yaitu master slave, untuk beberapa inverter nantinya tidak akan bekerja/padam saat iradiasi saat keadaan rendah, tetapi inverter lainnya akan bekerja sesuai/mendekati pembebanan yang optimal. Semua inverter akan ditanggung saat semua beban dibagi dan jika ketika iradiasi tinggi (Solar Guide Book (IFC), 2012).

2. *String Inverter*

Inverter yang digunakan pada *String Inverter* yaitu berlipat ganda dan juga berlaku untuk *string array* yang berlipat ganda. *String Inverter* sangat banyak digunakan karena *String Inverter* lebih baik dari pada *central inverters*, pada *String Inverter* lebih murah dalam proses pabrikasinya dan mampu mengatasi batasan daya yang luas. Jika kondisi modul surya tidak bisa dipasang pada *orientasi* yang sama, perbedaan iradiasi yang diterima atau perbedaan spesifikasi maka sistem ini sangat cocok. *String Inverter* mempunyai kelebihan yaitu penggantian dan perbaikannya sangat mudah tidak memerlukan waktu yang begitu lama seperti system *sentral*, jadi tidak banyak yang terbuang percuma hasil produksi yang dihasilkan saat perbaikan dan tidak memerlukan personil dan spesialis. (Solar Guide Book (IFC), 2012).



Gambar 2.14. 2 Contoh Sistem Konfigurasi Inverter
(Sumber: Solar Guide Book (IFC) 2012 P. 35)

Berdasarkan bentuk gelombang yang dihasilkan, inverter di kelompokkan menjadi tiga (Gatot, 2014) yaitu:

1. *Square wave* (gelombang kotak)

Pada beban-beban listrik yang menggunakan kumparan / motor *square wave inverter* tidak dapat bekerja sama sekali.

2. *Modified sine wave*

Inverter Modified sine wave (gelombang sinus modifikasi), menghasilkan daya listrik yang cukup memadai untuk sebagian peralatan elektronik tetapi memiliki kelemahan karena kekuatan daya listrik yang dihasilkan tidak sama persis dengan daya listrik dari PLN.

3. *Pure sine wave*

Inverter pure sine wave (gelombang sinus murni) menghasilkan gelombang listrik yang sama dengan listrik PLN. Bahkan lebih baik dari segi kestabilan daya listrik dibandingkan daya listrik dari PLN. Untuk beban-beban yang masih menggunakan motor agar bekerja lebih mudah, dan tidak cepat panas inverter jenis ini sangat tepat untuk digunakan.

Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam menentukan *inverter* adalah (Rafael Sianipar, 2016):

1. Kapasitas/daya *inverter*

Daya *inverter* harus mampu melayani beban pada kondisi daya rata-rata, tipikal dan surja. Secara praktis, kapasitas *inverter* dihitung sebesar 1,3 x beban puncak.

2. Tegangan masukan *inverter*

Pada kondisi beban naik turun, tegangan keluaran panel surya dapat mencapai tegangan tanpa beban (V_{oc}). Untuk menghindarkan kerusakan akibat kenaikan tegangan, tegangan masukan *inverter* dihitung = 1,1 – 1,15 V_{oc} string PV.

3. Arus masukan inverter
 Pada kondisi sinar matahari sangat terik, panel surya dapat menghasilkan arus seolah-olah pada kondisi tanpa beban (I_{sc}). Untuk menghindarkan kerusakan akibat kenaikan tegangan, secara praktek kapasitas arus input *inverter* dihitung = $1,1 - 1,15 I_{sc}$ *string* PV.
4. *Inverter* memiliki beberapa kualitas berdasarkan mutu daya keluarannya. Ada yang sinus murni, *modified square wave* atau *square wave*. Pilihlah yang memiliki kualitas sinus murni agar mampu memberikan suplai bagi seluruh jenis beban.
5. Pilih *inverter* yang menggunakan sistem komutasi elektronik dengan *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT).
6. Memiliki sistem pengaturan MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) dengan metoda PWM (*Pulse Width Modulation*).
7. Mampu bekerja pada temperatur sampai dengan 45°C.



Gambar 2.15. *Pure Sine Wave Solar Inverter YIY 10000W*

(Sumber: https://www.alibaba.com/product-detail/Wall-Mount-Type-Off-Grid-DC_60691107118.html?spm=a2700.7724857.main07.61.181d505ddkZb4j)

2.2.4.5.2 Perhitungan Inverter

Untuk mengetahui Daya Inverter yang dibutuhkan jika total beban belum diketahui (Rashid, 1993):

$$\text{Jumlah Inverter} = \frac{(\text{N Panel Surya} \times \text{Max Power Panel Surya})}{\text{Kapasitas Inverter}}$$

Keterangan:

Jumlah inverter = Inverter yang digunakan

N Panel Surya = Jumlah Panel Surya

Max Power Panel Surya = Kapasitas power Panel Surya

Kapasitas Inverter = Daya Inverter (Watt)

2.2.5 Analisis Ekonomi PLTS

Analisis perhitungan ROI (*Return On Investment*) *Return On Investment* merupakan rasio yang menunjukkan hasil dari jumlah aktiva yang digunakan dalam perusahaan atau suatu ukuran tentang efisiensi manajemen. Rasio ini menunjukkan hasil dari seluruh aktiva yang dikendalikan dengan mengabaikan sumber pendanaan, rasio ini biasanya diukur dengan persentase. *Return On Investment* dijalankan menurut Peraturan Menteri ESDM No.17 Tahun 2013 yang berisi tentang pembelian energi listrik Pembangkit Listrik Tenaga Surya yang dibeli oleh PLN, menjelaskan bahwa harga US\$ 25 sen/kWh (dua puluh lima sen dolar Amerika Serikat per kilo watt hour) harga tersebut adalah harga pembelian energi tenaga listrik dari PLTS (Ramadhan S.G., & Rangkuti Ch., 2016).

Dalam melakukan analisis ekonomi terhadap sistem PLTS terdapat beberapa indikator yang sering digunakan, yaitu Biaya Pemeliharaan dan Operasional, Investasi PLTS, *payback period analysis*, *Net Present Value (NPV)*.

2.2.5.1 Biaya Pemeliharaan dan Operasional PLTS *Off-Grid*

Diperhitungkan bahwa sebesar 1 - 2% dari total biaya investasi awalnya untuk suatu biaya pemeliharaan dan operasional per-tahun untuk PLTS, (Jais, 2012). Pada penelitian ini menurut sumber tersebut, akan ditetapkan sebesar 1% dari total investasi awal, besarnya suatu persentase tersebut untuk digunakan per-tahun yang mencakup biaya pemeliharaan dan pemeriksaan peralatan dan instalasi lalu untuk pekerjaan pembersihan panel surya. Berdasarkan Negara Indonesia

hanya memiliki dua musim, musim kemarau dan musim penghujan oleh karena itu biaya untuk pemeliharaan dan biaya pembersihan PLTS ini tidak sebesar Negara lainnya yang mengalami empat musim dalam satu tahun. Maka dari itu penentuan persentase yaitu hanya 1%, Selain hal tersebut presentase 1% juga didasarkan bahwa tenaga kerja di Indonesia lebih murah tingkat upahnya dibandingkan Negara maju yang tingkat upahnya lebih tinggi. Untuk mengetahui biaya pemeliharaan dan operasional (M) per tahun untuk PLTS yang akan dikembangkan maka dapat dilihat sebagai berikut (Ramadhan S.G., & Rangkuti Ch., 2016):

$$M = 1\% \times \text{Total Biaya Investasi}$$

Keterangan:

M : Hasil Biaya pemeliharaan dan operasional PLTS

1% : Biaya pemeliharaan dan operasional per-tahun

Total Biaya Investasi : Biaya Investasi Awal

2.2.5.2 Total Investasi PLTS

Total Investasi PLTS merupakan suatu perkiraan berapa total biaya yang dibutuhkan dalam membeli komponen dan membangun sebuah PLTS, biaya yang dibutuhkan tersebut mencakup total biaya investasi awal, dan biaya pemeliharaan dan operasional sesuai dengan berapa lama waktu yang ditentukan (tahun) dan total investasi tersebut dapat kita ketahui dengan menggunakan rumus sebagai berikut (Ramadhan S.G., & Rangkuti Ch., 2016):

$$\text{Total Investasi} = \text{Investasi Awal} + \text{Biaya pemeliharaan dan operasional}$$

2.2.5.3 Payback Period

Payback period adalah waktu yang dibutuhkan agar investasi yang telah dikeluarkan kembali kepada investor. Perhitungan *payback period* dilakukan untuk mengetahui risiko keuangan terhadap proyek

yang akan dilakukan. Nilai *payback period* yang semakin kecil akan semakin baik, dengan faktor risiko terhadap pengembalian modal akan semakin cepat dalam waktu yang cepat. Dalam menghitung *payback period* biasa disebut metode *payback* dengan membagi modal awal yang dikeluarkan dengan pendapatan yang diterima oleh pemodal selama satu tahun.

Penggunaan *payback period* dalam menghitung efektivitas investasi tetap memiliki batasan. *Payback period* tidak menghitung keuntungan yang didapatkan setelah *payback period* serta memiliki keterbatasan dalam membandingkan dua proyek. Maka dalam hal ini untuk mengetahui ROI (*Return On Investment*) dapat dihitung dengan metode *Pay Back Period* dengan rumus sebagai berikut (Ramadhan S.G., & Rangkuti Ch., 2016):

$$\text{Payback Period} = \text{Jumlah Investasi} / \text{Aliran Kas Bersih}$$

2.2.5.4 *Net Present Value (NPV)*

Net Present Value atau NPV digunakan untuk menganalisis keuntungan dari investasi atau proyek, formula yang digunakan sensitif terhadap perubahan nilai mata uang atau barang. NPV membandingkan nilai uang yang diterima hari ini dan nilai uang pada masa mendatang dengan memasukkan variabel inflasi dan laju pengembalian. NPV didasarkan pada teknik *discounted cash flow* (DCF) dengan 3 langkah dasar, yaitu menemukan *present value* dari setiap arus uang, termasuk didalamnya adalah pemasukan, pengeluaran, dan diskon harga proyek.

NPV adalah perbandingan antara nilai investasi pasar dan biaya itu sendiri. Jika nilai NPV adalah negatif, maka proyek tidak direkomendasikan untuk dilaksanakan, jika nilainya positif, maka proyek layak untuk dilaksanakan. Nilai NPV bernilai nol berarti tidak ada perbedaan apabila proyek tetap dilaksanakan atau ditolak. Rumus untuk menentukan NPV adalah sebagai berikut. (Ross, 2010).

Perhitungan NPV dilakukan berdasarkan berapa lama tahun yang telah ditentukan dengan proyeksi perhitungan pendapatan dan biaya yang sesuai dengan berapa lama tahun yang telah ditentukan tersebut. (berdasarkan suatu penggunaan tingkat suku bunga (*interest*) menurut bank yang digunakan setiap tahunnya). Untuk mengetahui nilai NPV dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa persamaan diantaranya, yang pertama yaitu Mengetahui Nilai Bunga (%), yang kedua Mengetahui Nilai Kas dan yang ketiga Mengetahui Nilai NPV (Ramadhan S.G., & Rangkuti Ch., 2016).

Rumus Mengetahui Nilai Bunga (%):

$$\text{Bunga (\%)} = \frac{1}{(1 + i)^n}$$

Keterangan:

i = Nilai suku bunga yang digunakan yaitu (*i*=4,5%)

ⁿ = Nilai Periode atau waktu arus kas

Rumus Mengetahui Nilai Kas:

$$\text{Nilai Kas} = \text{Arus Kas} \times i$$

Keterangan:

i = Nilai suku bunga setiap tahunnya

Rumus Mengetahui Nilai NPV:

$$\text{NPV} = \left(\frac{\text{NCF}^1}{(1+i^1)} + \frac{\text{NCF}^2}{(1+i^2)} + \frac{\text{NCF}^3}{(1+i^3)} + \dots + \frac{\text{NCF}^n}{(1+i^n)} \right) - \text{Biaya Investasi}$$

Keterangan :

NPV = Net present value

NCF¹ = Arus Kas Bersih

i = Tingkat Suku Bunga (4,5%)

ⁿ = Waktu Periode (Tahun)