



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Dalam penelitian tugas akhir ini akan dilakukan studi literatur yang merupakan pencarian referensi yang relevan dengan kasus atau permasalahan yang akan diselesaikan dari buku, artikel dan jurnal yang berkaitan. Penelitian terkait pembangkit listrik tenaga surya telah dilakukan beberapa Universitas yang ada di Indonesia maupun di luar Indonesia.

Gustriansyah dan Hairul (2015) pada penelitian yang berjudul Studi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terpusat di Talang Dabuk Kabupaten Banyuasin. Penelitian ini dilaksanakan di Talang Dabuk dan BMKG Kenten Palembang dilakukan dengan menghitung total daya listrik yang digunakan warga dan mengetahui intensitas radiasi matahari di Kabupaten Banyuasin. Talang Dabuk memiliki profil energi listrik total sebesar 203,52 kWh. Sistem PLTS yang direncanakan untuk mensuplai energi listrik warga mulai pukul 18.00-06.00 WIB, dengan sistem PLTS Terpusat. Berdasarkan hasil perhitungan besar daya PLTS yang akan dibangkitkan untuk mensuplai energi listrik yang direncanakan adalah 149 kWp, yang dihasilkan dari panel surya sebanyak 450 panel dengan kapasitas panel surya per-unitnya sebesar 330 Wp. Lahan yang dibutuhkan untuk pemasangan rangkaian panel tersebut seluas 733,4054 m². Pemasangan panel surya di Talang Dabuk diorientasikan ke Utara dengan sudut kemiringan 12,84°. Energi yang dihasilkan oleh rangkaian panel surya saat intensitas radiasi matahari terendah adalah sebesar 228,957 kWh. Selain itu komponen lain seperti Baterai *Charge Controller* direncanakan sebesar 3000 A, baterai dengan kapasitas total sebesar 48 Volt, 5600 Ah dan inverter dengan kapasitas total sebesar 150 kW.

Ariani dkk (2014) pada penelitian yang berjudul Analisis Kapasitas Dan Biaya Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Komunal Desa Kaliwungu Kabupaten Banjarnegara. Berdasarkan data beban di Desa Kaliwungu untuk menentukan kapasitas sistem PLTS (*photovoltaic Array*, baterai, *charge controller*, dan inverter), potensi pengurangan emisi karbondioksida, perhitungan biaya dan analisis ekonomi. Analisis ekonomi digunakan untuk mengevaluasi keberlangsungan pengoperasian PLTS. Analisis menggunakan beberapa metode, yaitu NPW (*Net Present Worth*), ACF (*Annual Cash Flow analysis*), B-CR (*Benefit–Cost Ratio analysis*), FW (*Future Worth analysis*), dan PP



(*Payback Period*). Perhitungan menggunakan *software* MATLAB 2008 dan hasil penelitian menunjukkan untuk memenuhi beban harian sebesar 8,922 kWh dapat disuplai dari sistem PLTS dengan kapasitas *photovoltaic Array* sebesar 2,85 kWp, baterai sebesar 464,678 Ah, *charge controller* sebesar 60 A, dan inverter sebesar 3500 W. Untuk potensi pengurangan emisi karbon dioksida sebesar 3,640 ton. Nilai NPW sebesar Rp.-266.351.000, ACF sebesar Rp.-23.894.600, FW sebesar Rp.714.063.000, B-CR sebesar 0,38505, dan PP selama 29 tahun.

Ardiansyah (2014) pada penelitian yang berjudul *Analisa Dan Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Studi Kasus Desa Somagede*. Kecamatan Somagede merupakan daerah yang terletak di pulau Jawa Kecamatan Banyumas, merupakan salah satu daerah yang masyarakatnya belum pernah merasakan terangnya listrik seperti daerah lain di kota-kota besar di pulau Jawa. Listrik di wilayah ini belum masuk di karenakan jangkauan PLN untuk masuk ke daerah terpencil seperti kecamatan Somagede sangat sulit. Dari hasil pembahasan dengan menggunakan metode pendekatan Perencanaan, Desain dan Analisa Kebutuhan didapat bahwa untuk memenuhi kebutuhan listrik di desa kanding dengan jumlah 30 unit rumah dan penerangan umum dibutuhkan listrik 13,5 KW per jam. Untuk memenuhi kebutuhan itu maka diperlukan 207 panel surya, 216 baterai, 6 buah *charge controller* dengan kapasitas 300 Ampere dan 3 Buah inverter dengan kapasitas 15 KW. Untuk kebutuhan tersebut maka dibutuhkan anggaran biaya Rp.2.266.110.000.

Agung dkk (2012) dalam makalah *Perencanaan PLTS Untuk Wilayah Kabupaten Gowa Dusun Pakkulompo Provinsi Sulawesi Selatan*. Dusun Pakkulompo yang terletak di Kecamatan Parangloe Kabupaten Gowa dengan jumlah penduduk Dusun Pakkulompo sebanyak 220 jiwa, terdapat 49 rumah, sebuah mesjid dan sekolah dasar. Daya untuk masing-masing rumah penduduk terpasang sebesar 200 W dengan daya total dari 49 rumah adalah 9800 W. Pada saat beban puncak daya yang dibutuhkan untuk didistribusikan ke pelanggan sebesar 11 kW. Dengan potensi energi surya rata-rata sekitar 4,91 kWh/m²/hari. Jumlah modul surya yang digunakan sebanyak 50 Unit dengan kapasitas 100 Wp, 66 unit baterai dengan kapasitas 100 Ah, satu unit panel kontrol dengan spesifikasi 200 x 200 cm, BCR dan Inverter dengan kapasitas 100 kW dan satu unit *automatic switch controller*. Investasi total sebesar Rp.501.685.000 yang mencakup antara lain biaya pra studi Rp. 1.130.000, biaya pekerjaan sipil Rp. 44.250.000 dan pekerjaan listrik yang juga mencakup peralatan pembangkit Rp.456.305.000. Biaya operasional dan pemeliharaan pembangkit



Rp.5.016.850/tahun. Keuntungan bersih yang diperoleh dari pembangkit Rp.8.303.954 dengan jangka waktu pengembalian modal investasi, adalah 60 tahun 3 bulan.

Suriadi dkk (2011) pada penelitian yang berjudul Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terpadu Menggunakan *Software* PVsyst pada Komplek Perumahan di Banda Aceh. Untuk perencanaan sebuah pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) pada perumahan perlu diperhatikan kapasitas masing-masing komponen PLTS. Dalam perencanaan ini dilakukan perhitungan untuk kebutuhan distribusi listrik rumah tangga sebesar 26,927 kWh perharinya dengan menggunakan *software* PVsyst. Karakteristik modul surya yang digunakan berkapasitas 200 Wp baterai sebanyak 30 unit dengan kapasitas 100 Ah, baterai *charge regulator* (BCR) dengan kapasitas arusnya sebesar 500 A dan inverter dengan kapasitas daya 12 kW. Apabila setiap komponen terpasang telah memenuhi spesifikasi, maka sistem PLTS ini akan mampu melayani 10 rumah dengan daya sambung 6 A.

Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu yang telah disebutkan diatas bahwa pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) Terpusat *Off-Grid System* merupakan solusi untuk permasalahan ketersediaan energi listrik yang bersumber dari energi terbarukan untuk desa terpencil yang jauh dari jaringan listrik milik PT.PLN (Persero) dan memiliki akses transportasi yang sangat sulit. Beberapa penelitian diatas juga menunjukkan bahwa PLTS Terpusat *Off-Grid System* dapat memberi kualitas layanan dan jaminan pasokan listrik. Dalam perancangan PLTS Terpusat *Off-Grid System* perlu menggunakan beberapa metode terbaik dan menyesuaikan dengan perancangan PLTS Terpusat *Off-Grid System*.

Dari beberapa penelitian diatas memiliki beberapa kekurangan dan kelebihan pada perancangan PLTS Terpusat *Off-Grid System* maupun pada analisis ekonominya. Pada beberapa penelitian terdahulu perhitungan tidak menggunakan standar perancangan PLTS Terpusat *Off-Grid System* hanya menggunakan perhitungan sederhana dengan *input* yang sedikit dan ada juga yang menggunakan *software* PVsyst dan *software* MATLAB 2008 namun, *software-software* tersebut juga memiliki kekurangan dan kelebihan seperti pada *software* Pvsyst memiliki kelebihan dalam perancangan namun dalam analisis ekonomi memiliki kekurangan.

Untuk melengkapi beberapa kekurangan dari beberapa penelitian terdahulu maka pada perancangan PLTS Terpusat *Off-Grid System* dalam penelitian ini akan menggunakan *Australian/New Zealand Standard TM AS/NZS 4509.2:2010* tentang *Stand Alone Power System Part 2: System Design* agar mendapatkan hasil yang lebih maksimal dan handal.



Pada penelitian ini tidak hanya merancang komponen utama seperti PV Array, Solar Charge Controller (SCC), baterai dan inverter tetapi juga merancang komponen pendukung seperti kabel, sistem proteksi pada panel box, mounting system dan penangkal petir. Sedangkan untuk mendapatkan nilai biaya yang terbaik sesuai perencanaan maka analisis ekonomi pada penelitian ini digunakan metode Life Cycle Cost (LCC) atau biaya siklus hidup dengan mengkalkulasikan semua biaya yang dikeluarkan oleh suatu sistem, selama kehidupannya. Sehingga dapat diperoleh tujuan utama dari penelitian ini yaitu tercapainya nilai perancangan PLTS Terpusat Off-Grid System yang meliputi aspek teknis, ekonomi dan lingkungan.

2.2 Profil Kabupaten Rokan Hulu

Kabupaten Rokan Hulu merupakan salah satu kabupaten yang berada di Provinsi Riau. Saat ini, Provinsi Riau memiliki 10 kabupaten, yaitu Kuantan Singingi, Indragiri Hulu, Indragiri Hilir, Pelalawan, Siak, Kampar, Rokan Hulu, Bengkalis, Rokan Hilir, dan Kepulauan Meranti. Serta memiliki 2 kota madya Pekanbaru dan Dumai (BPS Provinsi Riau, 2015)

Letak Kabupaten Rokan Hulu berada di bagian barat Provinsi Riau yang berbatasan dengan Kabupaten Rokan Hilir dan Provinsi Sumatera Utara di sebelah utara, Kecamatan XIII Koto Kampar dan Kecamatan Bangkinang Barat Kabupaten Kampar dan Provinsi Sumatera Barat di sebelah selatan, Provinsi Sumatera Barat dan Provinsi Sumatera Utara di sebelah barat, dan Kecamatan Tapung dan Kecamatan Bangkinang Barat Kabupaten Kampar, Kecamatan Minas (Kabupaten Siak), Kecamatan Mandau (Kabupaten Bengkalis) di sebelah timur, yang ditunjukkan oleh Peta Provinsi Riau pada gambar 2.1.

Ada 16 kecamatan yang berada di Kabupaten Kabupaten Rokan Hulu, yaitu Rokan IV Koto, Pendalian IV Koto, Tandun, Kabun, Ujung Batu, Rambah Samo, Rambah, Rambah Hilir, Bangun Purba, Tambusai, Tambusai Utara, Kepenuhan, Kepenuhan Hulu, Kunto Darussalam, Pagaran Tapah Darussalam, dan Bonai Darussalam. Dari 16 kecamatan tersebut, Kecamatan Bonai Darussalam merupakan Kecamatan yang paling jauh dari pusat pemerintahan Kabupaten Rokan Hulu dengan jarak 111 km (BPS Kabupaten Rokan Hulu, 2015).

Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

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

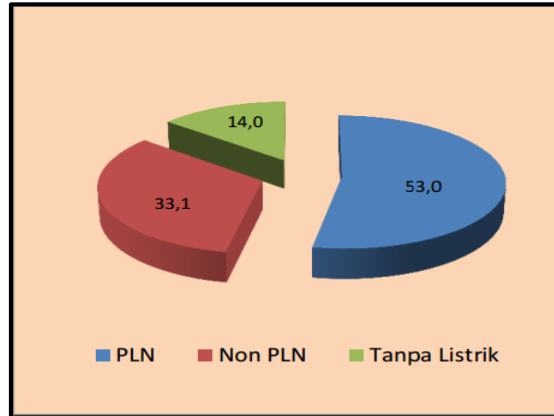


Gambar 2.1. Letak geografi Kabupaten Rokan Hulu di Peta Provinsi Riau (Sumber: peta-kota.blogspot.co.id, 2016).

Kabupaten Rokan Hulu yang beribu kota di Pasir Pengaraian, berada antara $00^{\circ} 25' 20''$ LU - $010^{\circ} 25' 41''$ LU dan $100^{\circ} 02' 56''$ - $100^{\circ} 56' 59''$ BT, dengan ketinggian dari permukaan laut berkisar antara 10-164 meter. Wilayah Kabupaten Rokan Hulu dialiri oleh 2 (dua) sungai besar yaitu Sungai Rokan Kanan dan Sungai Rokan Kiri yang masih berfungsi sebagai sarana perhubungan, sumber air bersih dan budidaya ikan (BPS Kabupaten Rokan Hulu, 2015).

2.2.1 Energi

Pada tahun 2016 ini rasio elektrifikasi kabupaten Rokan Hulu masih rendah, baru sekitar 48,5% atau ketersediaan daya listrik sekitar 30 Mega Watt (MW). Tidak semua kecamatan di Kabupaten Rokan Hulu telah di aliri listrik PLN. Dari diagram pada gambar 2.1 terlihat bahwa 53% jumlah tangga telah menikmati listrik PLN, 33,1% rumah tangga menikmati listrik namun bukan berasal dari PLN. Listrik non PLN ini biasanya adalah pembangkit listrik yang di kelola oleh desa atau masyarakat. Pembangkit ini bisa dari swadaya masyarakat, milik perusahaan, maupun hibah dari pemerintah. Sedangkan 14 persen rumah tangga sama sekali tidak di aliri listrik (BPS Kabupaten Rokan Hulu, 2015).



Gambar 2.2 Persentase Sumber Penerangan Kabupaten Rokan Hulu Tahun 2014 (Sumber: BPS Kabupaten Rokan Hulu, 2015)

Desa yang belum tersentuh jaringan listrik di kabupaten Rokan Hulu pada umumnya terjadi di daerah yang lokasinya jauh dari jaringan tegangan tinggi menengah listrik milik PT.PLN (Persero), termasuk desa terpencil, dan akses transportasi ke desa tersebut sangat sulit. Dikarenakan faktor tersebut masyarakat yang di desa terpencil lebih memilih menggunakan Genset sebagai teknologi untuk penerangan. Selain itu masyarakat juga masih ada yang menggunakan peralatan penerangan konvensional berupa pelita, senter, obor, dan lainnya. Salah satu desa yang belum tersentuh jaringan listrik dari PT. PLN (Persero) di kabupaten Rokan Hulu berada di kecamatan Bonai Darussalam (BPS Kabupaten Rokan Hulu, 2015).

2.2.2 Data Klimatologi

Berdasarkan data klimatologi dari BPS Kabupaten Rokan Hulu dapat dilihat informasi curah hujan, jumlah hari hujan dan ketinggian dari permukaan laut pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Data Klimatologi Kabupaten Rokan Hulu Tahun 2014

Data	Min	Max	Satuan	Keterangan
Curah Hujan	0	683	mm	Curah hujan terkecil terjadi pada bulan Juli dan curah hujan terbesar terdapat di bulan Desember
Jumlah Hari Hujan	0	25	Hari	Jumlah hari hujan terkecil terjadi di bulan Juli dan jumlah hari hujan terbanyak terdapat di bulan November

Tabel 2.1 Data Klimatologi Kabupaten Rokan Hulu Tahun 2014 Lanjutan

Data	Min	Max	Satuan	Keterangan
Ketinggian Dari Permukaan Laut	10	164	m	Daerah terendah dari permukaan laut yaitu Desa Pendalian dan Desa Sontang Daerah tertinggi dari permukaan laut berada di Desa Rambah Samo

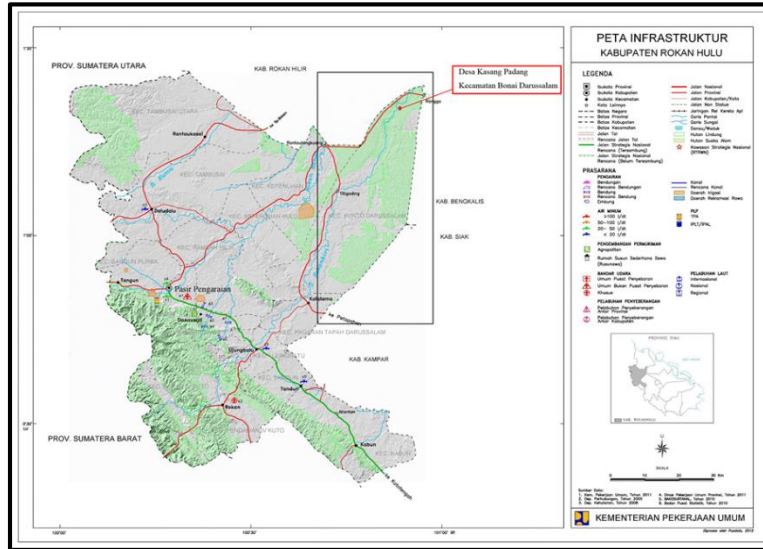
Sumber: BPS Kabupaten Rokan Hulu (2015)

2.3 Gambaran Umum Kecamatan Kecamatan Bonai Darussalam

2.3.1 Geografi dan Iklim

Secara geografi Kecamatan Bonai Darussalam berada di bagian utara Kabupaten Rokan Hulu dengan luas wilayah mencapai $\pm 2.370 \text{ km}^2$, tepatnya berada di ujung utara Rokan Hulu dan mempunyai 7 Desa dengan pusat pemerintahan berada di Desa Sontan. Kecamatan Bonai Darussalam berbatasan dengan Kecamatan Tanah Putih Kabupaten Rokan Hilir di sebelah utara, Kecamatan Kunto Darussalam di sebelah selatan, Kecamatan Kepenuhan dan Kecamatan Tanah Putih Kabupaten Rokan Hilir di sebelah barat, dan Kecamatan Mandau Kabupaten Bengkalis, Kecamatan Kandis Kabupaten Siak, dan Kecamatan Tapung Hulu Kabupaten Kampar di sebelah timur (BPS Kecamatan Bonai Darussalam, 2015). Berikut ini peta infrastruktur kabupaten Rokan Hulu pada gambar 2.3.

Untuk temperatur rata-rata tahunan di Kecamatan Bonai Darussalam yang diambil dari data SSE milik NASA berdasarkan titik koordinat Kecamatan sebesar 25.75°C , dengan temperatur minimum mencapai $22,1^\circ\text{C}$ dan temperatur maksimum mencapai $32,6^\circ\text{C}$. Untuk kecepatan angin rata-rata tahunan sebesar $2,21 \text{ m/s}$ pada ketinggian 50 meter (NASA, 2016).



Gambar 2.3 Letak Geografi Kecamatan Bonai Darussalam dan Desa Kasang Padang (Sumber: <http://loketpeta.pu.go.id>, 2016)

Kecamatan Bonai Darussalam memiliki 7 desa yaitu Desa Teluk Sono, Rawa Makmur, Sontang, Bonai, Pauh, Kasang Padang, Kasang Mungkal. Dari 7 desa tersebut, Desa Kasang Padang merupakan desa terkecil dan terjauh, dengan luas 12,50 km² atau 0.53% dari luas Kecamatan Bonai Darussalam, dan dengan jarak 24 km dari ibu kota kecamatan (BPS Kecamatan Bonai Darussalam, 2015).

2.3.2 Penduduk

Jumlah penduduk di Kecamatan Bonai Darussalam sebanyak 23.629 jiwa di tahun 2014, dengan kepadatan penduduk 10 jiwa/km². Berikut ini tabel jumlah dan kepadatan penduduk Kecamatan Bonai Darussalam tahun 2014.

Tabel 2.2 Jumlah dan Kepadatan Penduduk Kecamatan Bonai Darussalam Tahun 2014.

Desa/Kelurahan	Jumlah Penduduk		Luas Wilayah (km ²)	Kepadatan Penduduk (Jiwa/km ²)
	Laki-laki	Perempuan		
Teluk Sono	1.303	1.164	159,5	15
Rawa Makmur	625	562	250	5
Sontang	2.444	2.315	361	13
Bonai	1.921	1.675	120	30
Pauh	3.617	2.958	900	7
Kasang Padang	2.033	1.680	12,5	297
Kasang Mungkal	731	601	524	3
Jumlah	12.674	10.955	2.327	10

Sumber: BPS Kecamatan Bonai Darussalam (2015).

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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



Untuk rata-rata jumlah penduduk per rumah tangga menurut desa dan kelurahan di Kecamatan Bonai Darussalam pada tahun 2014 ditunjukkan pada tabel 2.3.

Tabel 2.3. Rata-rata Jumlah Penduduk Per Rumah Tangga Kecamatan Bonai Darussalam Tahun 2014.

Desa/Kelurahan	Jumlah Penduduk	Jumlah Rumah Tangga	Rata-rata (jiwa/KK)
Teluk Sono	2.467	572	4
Rawa Makmur	1.187	244	5
Sontang	4.759	1.152	4
Bonai	3.596	855	4
Pauh	6.575	1.606	4
Kasang Padang	3.713	885	4
Kasang Mungkal	1.332	278	5
Jumlah	23.629	5.592	4

Sumber: BPS Kecamatan Bonai Darussalam (2015)

2.3.3 Sumber Penerangan

Jumlah rumah tangga per desa berdasarkan sumber penerangan di Kecamatan Bonai Darussalam dan jarak per desa dengan jaringan distribusi PT.PLN (Persero) dapat dilihat pada tabel 2.4 dibawah ini.

Tabel 2.4 Jumlah Rumah Tangga Kecamatan Bonai Darussalam Berdasarkan Sumber Penerangan

Desa/Kelurahan	PLN	NON PLN	Tanpa Listrik	Jumlah	Jarak desa dengan jaringan PLN
Teluk Sono	-	315	258	572	7,6 KM
Rawa Makmur	195	46	198	244	-
Sontang	-	1.060	92	1.152	17 KM
Bonai	-	846	9	855	43 KM
Pauh	-	1.333	273	1.606	15 KM
Kasang Padang	-	292	593	885	26 KM
Kasang Mungkal	178	50	50	278	-
Jumlah					

Sumber: Pengolahan data (2016)

Tabel 2.4 memberikan informasi jumlah rumah tangga Kecamatan Bonai Darussalam berdasarkan beberapa sumber penerangan yaitu PT.PLN (Persero), Non PT.PLN (Persero) atau PLTD (Pembangkit Listrik Tenaga Diesel) dari bantuan pemerintah daerah dan tanpa listrik atau menggunakan Genset pada setiap rumah. Dapat dilihat bahwa



jarak desa-desa di Kecamatan Bonai dengan jaringan PT.PLN (Persero) terjauh terdapat pada Desa Bonai dan Desa Kasang Padang. Desa Bonai memang memiliki jarak paling jauh dengan jaringan PT.PLN (Persero) yaitu sebesar 43 Km namun desa ini memiliki jumlah rumah tangga tanpa listrik paling sedikit diantara desa lainnya. Sedangkan Desa Kasang Padang memiliki jumlah rumah tangga tanpa listrik yang paling banyak diantara 6 desa lainnya dan jarak paling dekat antara desa ini dengan jaringan distribusi PT.PLN (Persero) yaitu 26 Km.

2.3.4 Potensi Energi Surya

Dilihat dari letak geografis berdasarkan Google Earth®, kawasan Desa Kasang Padang berada pada koordinat $1,5^{\circ}$ Lintang Utara dan $100,5^{\circ}$ Bujur Timur. Pengambilan data potensi energi surya bersumber dari *Surface Meterology and Solar Energy (SMSE)* milik NASA. Data yang diakses pada SMSE berdasarkan koordinat Desa Kasang Padang yaitu data radiasi matahari ($\text{kWh/m}^2/\text{hari}$) dan data *clearning indeks*.

2.4 Studi Beban Listrik

Studi beban listrik dalam penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahapan yaitu membuat daftar beban listrik dan membuat profil beban listrik. Sumber data studi beban listrik diperoleh dengan melakukan wawancara dan pengisian kusioner secara langsung dari setiap responden, yang merupakan anggota dari kelompok pengguna yang menjadi sampel dalam penelitian ini.

Studi beban listrik mengacu pada teori yang dikemukakan oleh Sugiyono tentang pengambilan sampel menggunakan teknik *probability sampling*. *Probability sampling* merupakan teknik pengambilan sampel yang memberikan peluang yang sama bagi setiap anggota populasi untuk dipilih menjadi anggota sampel (Sugiyono, 2010).

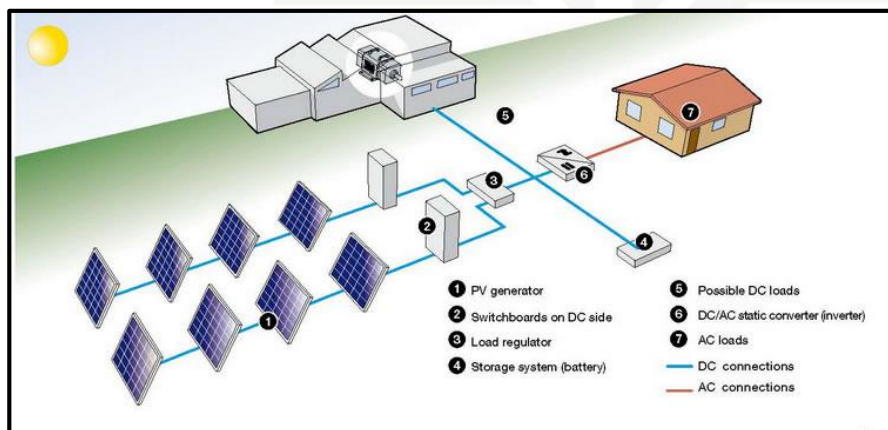
Dalam teknik *probability sampling* terbagi beberapa teknik untuk menentukan jumlah sampel, dan ada beberapa macam teknik dalam *probability sampling* salah satunya adalah teknik *simple random sampling*. Dengan teknik ini pengambilan data dilakukan secara acak tanpa memperhatikan strata yang ada dalam suatu populasi karena populasi dianggap homogen, dan jumlah sampel 10% saja sudah cukup mewakili (Sugiyono, 2010).

2.5 Estimasi Kebutuhan Beban

Dalam perancangan suatu pembangkit listrik harus memperkirakan permintaan beban yang tepat. Perkiraan permintaan beban secara sederhana bisa dilakukan dengan mengalikan jumlah pengguna dengan rata-rata estimasi penggunaan listrik per pengguna. Namun, pendekatan ini tidak benar-benar cukup karena memiliki tingkat akurasi yang rendah untuk pedesaan yang besar. Sebaliknya, lebih baik untuk menggabungkan estimasi permintaan listrik masing-masing calon pengguna, seperti rumah tangga, bangunan sosial, dan layanan ekonomi (ARE, 2011). Memperkirakan permintaan listrik membutuhkan usaha yang intensif ketika observasi langsung kelapangan dari pintu ke pintu (*door to door*). Dua faktor penting dalam perencanaan listrik pedesaan, yaitu kesediaan pengguna untuk terhubung ke akses listrik yang akan dibangun dan konsumsi peralatan listrik yang akan digunakan ketika terhubung ke akses listrik (ARE, 2011).

2.6 PLTS Terpusat *Off-Grid System*

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terpusat *Off-Grid system* merupakan sistem pembangkit listrik alternatif untuk daerah-daerah terpencil atau pedesaan yang tidak terjangkau oleh jaringan PLN. Sistem PLTS Terpusat disebut juga *Stand Alone PV System* yaitu sistem pembangkit yang hanya mengandalkan energi matahari sebagai satu-satunya sumber energi utama dengan menggunakan rangkaian modul surya (PV Array) untuk menghasilkan energi listrik sesuai kebutuhan. Secara umum konfigurasi PLTS Terpusat *Off-Grid system* dapat dilihat seperti gambar 2.4.



Gambar 2.4 PLTS Terpusat *Off-Grid System*
(Sumber: ABB, 2011)



Prinsip kerja pada PLTS Terpusat *Off-Grid system* yaitu sumber energi listrik yang dihasilkan oleh PV Array pada siang hari akan disimpan dalam baterai. Proses pengisian energi listrik dari PV Array ke baterai diatur oleh *Solar Charge Controller* (SCC) agar tidak terjadi *over charge*. Besar energi yang dihasilkan oleh PV Array sangat tergantung kepada intensitas penyinaran matahari yang diterima oleh PV Array dan efisiensi *cell*. Selanjutnya energi yang tersimpan dalam baterai digunakan untuk menyuplai beban melalui inverter saat dibutuhkan. Inverter mengubah arus DC dari baterai menjadi arus AC untuk disalurkan ke beban (Putra, 2015). Berikut ini kompoen-komponen pada PLTS Terpusat *Off-Grid System*.

2.6.1 Solar Cell / Sel Surya

Solar cell atau sel surya adalah alat untuk mengkonversi tenaga matahari menjadi energi listrik. Photovoltaic adalah teknologi yang berfungsi untuk mengubah atau mengkonversi radiasi matahari menjadi energi listrik secara langsung. PV biasanya dikemas dalam sebuah unit yang disebut modul. Dalam sebuah modul surya terdiri dari banyak sel surya yang bisa disusun secara seri maupun paralel. Sedangkan yang dimaksud dengan surya adalah sebuah elemen semikonduktor yang dapat mengkonversi energi surya menjadi energi listrik atas dasar efek *photovoltaic* (Putra, 2015).

2.6.1.1 Tipe Sel Surya

Sel surya salah satunya terbuat dari teknologi irisan silikon (*silikon wafers*), pembuatannya dengan cara memotong atau mengiris tipis silikon dari balok batang silikon. Sel surya juga bisa terbuat dari teknologi film tipis biasa disebut *thin film technologies*, dimana lapisan tipis dari bahan semikonduktor diendapkan pada *low-cost substrates*. Sel surya selanjutnya digolongkan sesuai dengan batasan struktur dari bahan semikonduktornya seperti, *monocrystalline*, *poly-rystalline* dan *amorphous material* (Setiawan, Agus (2014).

1. Monocrystalline

Jenis ini terbuat dari batangan kristal yang diiris tipis – tipis dan 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 dari pada *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 solar panel *monocrystalline*. Kelemahan dari sel surya tipe *monocrystalline* adalah potongan dari setiap sel suryanya berupa segi 6, 8 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 (GSES, 2013).



Gambar 2.5 *Monocrystalline*
(Sumber: Rizal, 2008)

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.

Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

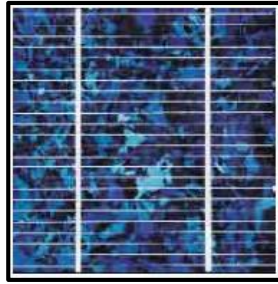
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

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

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

Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

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



Gambar 2.6. *Polycrystalline*
(Sumber: Rizal, 2008)

3. *Thin Film*

Merupakan panel surya (dua lapisan) dengan struktur lapisan tipis mikrokristal-silikon dan *amorphous* dengan efisiensi modul hingga 8.5% sehingga untuk luas permukaan yang diperlukan per *watt* daya yang dihasilkan lebih besar daripada *monocrystalline* & *polycrystalline*. Jenis sel surya ini mempunyai kerapatan atom yang rendah, sehingga mudah dibentuk dan dikembangkan ke berbagai macam ukuran dan potongan dan secara umum dapat diproduksi dengan biaya yang lebih murah. Sel surya ini dibuat dengan menambahkan satu atau beberapa lapisan tipis ke dalam lapisan dasar. Sel surya jenis ini sangat tipis sehingga ringan dan fleksibel. Oleh sebab itu sering disebut juga sebagai TFPV (*Thin Film Photovoltaic*). Inovasi terbaru adalah *Thin Film Triple Junction PV* (dengan tiga lapisan) dapat berfungsi sangat efisien dalam udara yang sangat berawan dan dapat menghasilkan daya listrik sampai 45% lebih tinggi dari panel jenis lain dengan daya yang ditera setara (GSES, 2013).

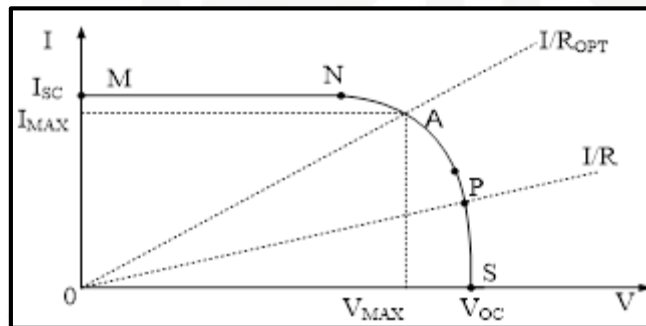


Gambar 2.7. *Thin Film*
(Sumber: Rizal, 2008)

2.6.1.2 Karakteristik Sel Surya

Sel surya adalah sebuah alat yang untuk memahami karakteristiknya diperlukan suatu grafik. Sifat elektrik dari sel surya dalam menghasilkan energi listrik dapat dilihat dari karakteristik listrik sel tersebut. Yaitu berdasarkan arus dan tegangan yang dihasilkan

sel sel surya pada kondisi cahaya dan beban berbeda-beda. Kurva IV menggambarkan sel surya lebih lengkap. Ketika sel dihubungkan dengan beban (R) beban memberi hambatan sebagai garis linier dengan garis $I/V = I/R$. Hal tersebut menunjukkan daya yang didapat bergantung pada nilai resistansi. Jika R kecil maka sel beroperasi pada daerah kurva MN, dimana sel beroperasi sebagai sumber arus yang konstan atau arus *short circuit*. Pada sisi lain, jika R besar, sel beroperasi pada kurva PS, dimana sel beroperasi sebagai sumber tegangan yang konstan atau tegangan *open circuit* jika dihubungkan dengan hambatan optimal berarti sel surya menghasilkan daya maksimal dengan tegangan maksimal dan arus maksimal. (Karina A dan Satwiko S, 2014)



Gambar 2.8. Karakteristik arus dan tegangan solar sel
(Sumber: Karina A dan Satwiko S, 2014)

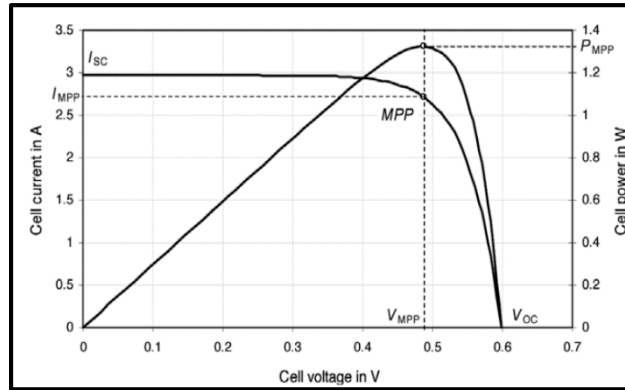
2.6.1.3 Karakteristik Daya Pada Sel Surya

Total output dari sel surya adalah sama dengan tegangan (V) operasi dikalikan arus (I) operasi. Tegangan serta arus keluaran yang dihasilkan ketika sel surya memperoleh penyinaran merupakan karakteristik yang disajikan dalam bentuk kurva I-V pada gambar 2.9 Kurva ini menunjukkan bahwa pada saat arus dan tegangan berada pada titik kerja maksimal (*Maximum Power Point*) maka akan menghasilkan daya keluaran maksimum (PMPP). Tegangan di *maximum power point* (MPP) V_{MPP} , lebih kecil dari tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) dan arus saat MPP (I_{sc}) (Quaschnig, 2005).

1. *Short circuit current* (I_{sc}), terjadi pada suatu titik dimana arusnya adalah nol sehingga pada saat ini, daya keluaran adalah nol.
2. *Open circuit voltage* (V_{oc}), terjadi pada suatu titik dimana tegangannya adalah nol, sehingga pada saat ini pun daya keluaran adalah nol.
3. *Maximum power point* (MPP) adalah titik daya output maksimum, yang sering dinyatakan sebagai “*knee*” dari kurva I-V.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

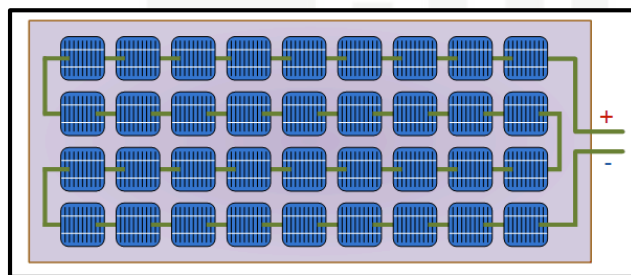
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruhnya tanpa izin tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang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



Gambar 2.9 Karakteristik arus dan tegangan solar sel (Sumber: Quaschnig, 2005)

2.6.2 Modul Surya

Modul surya atau *solar module* merupakan komponen PLTS yang tersusun dari beberapa sel surya yang dirangkai sesuai perencanaan, baik dirangkai seri maupun paralel dengan tujuan mendapatkan hasil daya listrik yang diinginkan dan disusun pada satu bingkai (*frame*) dan dilaminasi atau diberikan lapisan pelindung. PV modul yang terangkai seri dari sel-sel surya ditujukan untuk meningkatkan, atau dalam hal ini dapat dikatakan menggabungkan tegangan (VDC) yang dihasilkan setiap selnya. Sedangkan untuk arusnya dapat didesain sesuai kebutuhan dengan memperhatikan luas permukaan sel (Putra, 2015). gambar 2.10 menunjukkan rangkaian 36 sel surya yang tersambung seri dalam sebuah modul surya.



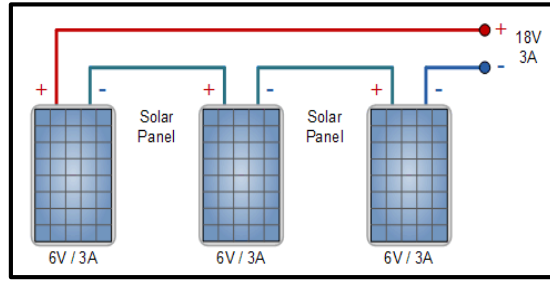
Gambar 2.10 Tipe modul surya dengan 36 sel surya terhubung seri (Sumber: <http://www.alternative-energy-tutorials.com>)

2.6.2.1 Rangkaian Seri Modul Surya

Hubungan seri suatu modul surya didapatkan dengan cara menghubungkan kutub yang berbeda yaitu negatif dengan positif seperti gambar 2.11. Hasil dari hubungan seri ini yaitu penjumlahan dari nilai tegangan dari setiap module tetapi nilai arus tetap.

Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

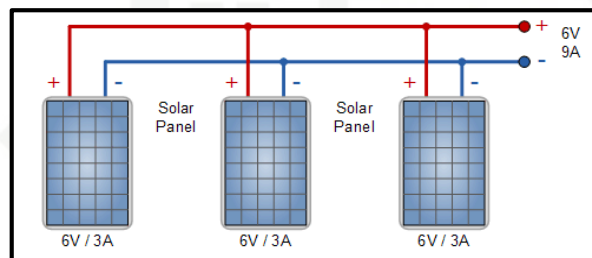
1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan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



Gambar 2.11 Rangkaian modul surya seri
 (Sumber: <http://www.alternative-energy-tutorials.com>)

2.6.2.2 Rangkaian Paralel Modul surya

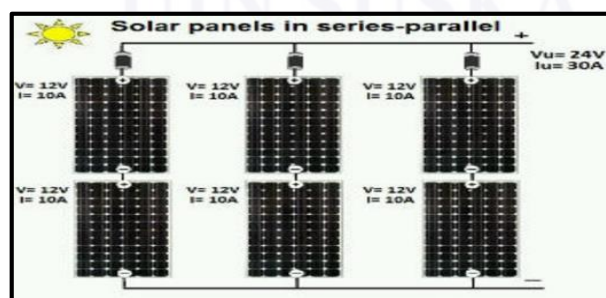
Hubungan seri suatu modul surya didapatkan dengan cara menghubungkan kutub yang sama yaitu negatif dengan negatif dan positif dengan positif seperti gambar 2.12 hasil dari hubungan paralel ini yaitu penjumlahan dari nilai arus dari setiap module tetapi nilai tetap tetap.



Gambar 2.12 Rangkaian modul surya paralel
 (Sumber: <http://www.alternative-energy-tutorials.com>)

2.6.2.3 Rangkaian Seri-Paralel Modul Surya

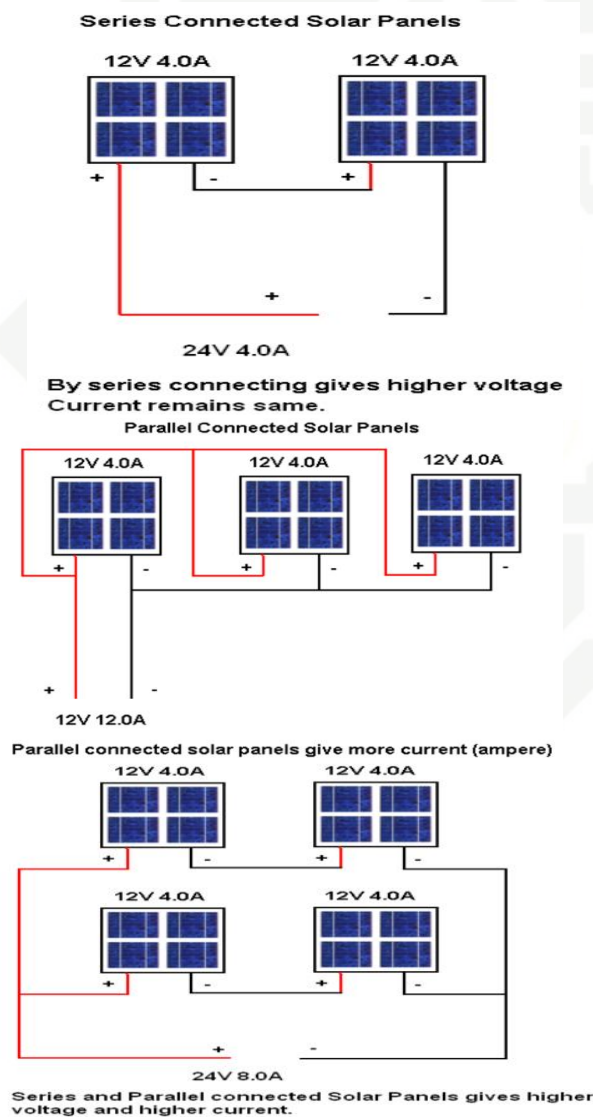
Hubungan seri-paralel suatu modul surya didapatkan dengan cara menggabungkan rangkaian seri dan rangkaian paralel seperti gambar 2.13 hasil dari hubungan seri-paralel ini yaitu penjumlahan dari nilai arus setiap rangkaian paralel dan penjumlahan dari nilai tegangan setiap rangkaian seri.



Gambar 2.13 Rangkaian modul surya seri-paralel
 (Sumber: <http://www.alternative-energy-tutorials.com>)

2.6.3 Panel Surya

Panel surya atau *solar panel* merupakan komponen PLTS yang tersusun dari beberapa modul surya yang dirangkai sesuai perencanaan, baik dirangkai seri maupun paralel dengan tujuan mendapatkan hasil tegangan dan arus yang diinginkan. PV modul yang terangkai seri dari sel-sel surya ditujukan untuk meningkatkan, atau dalam hal ini dapat dikatakan menggabungkan tegangan (VDC) yang dihasilkan setiap modulnya. Sedangkan untuk arusnya dapat didesain sesuai kebutuhan dengan mengatur susunan rangkaian modul surya. gambar 2.14 menunjukkan macam-macam rangkaian panel surya.



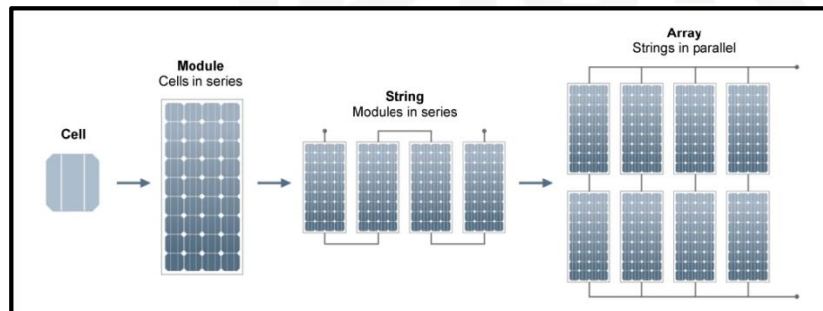
Gambar 2.14 Macam-macam rangkaian panel surya.
(Sumber: <http://www.solaregy.com>)

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



2.6.4 Array Photovoltaic (PV Array)

Array photovoltaic atau *PV Array* adalah suatu unit pembangkit listrik yang lengkap terdiri dari sejumlah sel surya yang dirangkai menjadi modul surya dan modul surya dirangkai menjadi panel surya kemudian panel surya dirangkai menjadi satu melalui kabel dengan susunan tertentu baik dirangkai seri maupun paralel dengan tujuan mendapatkan hasil tegangan dan arus yang diinginkan. Pada PLTS Terpusat *off-Grid system*, sel surya perlu dikombinasikan dengan beberapa sel surya lain hingga menjadi bentuk sebuah modul surya yang kemudian digabungkan dengan banyak modul surya hingga membentuk sebuah panel surya. Panel surya yang digabungkan dengan beberapa panel surya lainnya hingga membentuk sebuah *PV Array* kemudian baru dihubungkan ke *solar charger controller* dan baterai atau langsung ke inverter untuk memenuhi beban.



Gambar 2.15 Konfigurasi PV array
(Sumber: Stapleton dkk, 2013)

2.6.5 Baterai

Baterai merupakan salah satu komponen utama dalam sistem PLTS yang memegang peranan penting sebagai sumber listrik, yang apabila lemah atau soak dapat menjadi penyebab terganggunya sistem PLTS, bahkan dapat mengakibatkan kerusakan pada komponen-komponen lainnya, baik dalam aplikasi PLTS Terpusat (*Solar Home System*) SHS maupun dalam aplikasi lampu jalan tenaga surya. Baterai mengalami proses siklus menyimpan dan mengeluarkan daya energi, tergantung pada ada atau tidak adanya sinar matahari. Selama waktu matahari ada, modul surya menghasilkan arus listrik dalam satuan *Ampere/hours* (Ah) dengan segera dipergunakan untuk pengisian baterai. Baterai yang paling umum dalam aplikasi PLTS mempunyai tegangan nominal sebanyak 12 *Volt*, 24 *Volt*, 36 *Volt* dan untuk PLTS Terpusat tegangan baterai minimal 48 *Volt* (Nasution, 2016).



2.6.5.1 Fungsi Baterai

Baterai menyimpan energi listrik yang dihasilkan modul surya pada saat matahari bersinar, dan baterai akan mengeluarkan kembali energi listrik pada saat modul surya tidak dapat lagi menghasilkan energi listrik. Pada kondisi normal baterai dipergunakan saat malam hari atau saat cuaca berawan atau mendung. Apabila terjadi daya energi beban di konsumen yang berlebih di waktu siang hari, baterai dapat difungsikan untuk menambah beban yang dihasilkan oleh modul surya. Sifat baterai adalah menyimpan dan mengeluarkan energi dari proses reaksi kimia. Proses penyimpanan dan pengeluaran daya energi dalam besaran satuan watt/hours (Wh) listrik. Pengeluaran ini nantinya akan dipulihkan seperti semula disaat pengisian (*charging*) dari modul surya. Secara ringkas baterai memenuhi dua tujuan penting dalam sistem PLTS meliputi :

1. Untuk memberikan daya energi (*Watt/hours*) kepada PLTS ketika daya energi tidak disediakan oleh PV Array.
2. Untuk menyimpan kelebihan daya yang ditimbulkan oleh *PV Array* setiap kali daya itu melebihi beban.

Siklus penyimpanan akan terjadi setiap kali sesuai intensitas irradiasi matahari dan mengeluarkan energi setiap kali sesuai dengan penggunaan daya listrik untuk melayani beban konsumen, jika ada sinar matahari dengan irradiasi yang cukup, baterai akan menyimpan energi yang cukup dan pelayanan bebannya akan menjadi ringan. Oleh karena itu fungsi baterai pada malam hari akan mengeluarkan jumlah total daya yang diperlukan dari arus dikalikan dengan total tegangan baterai yang 48 Volt. Jika baterai tidak menyimpan cukup arus dan tegangan daya energi, maka tidak bisa memenuhi permintaan untuk melayani beban pada pengguna. Apabila tidak adanya matahari, sistem akan kehabisan arus dan tegangan menurun ke titik terendah dan tidak siap memenuhi kebutuhan penggunaan energi. Jika baterai tidak menyimpan cukup daya untuk memenuhi permintaan selama periode tidak adanya matahari, sistem akan kehabisan daya dan tidak mampu memenuhi konsumsi. Salah satu cara dengan melakukan perkiraan jumlah hari dimana sistem beroperasi secara mandiri atau *number of days of autonomy* 3 sampai dengan 4 hari untuk menjamin pengaturan pengisian baterai (*charging*) dan pengeluaran (*discharging*) baterai yang baik (Nasution, 2016).

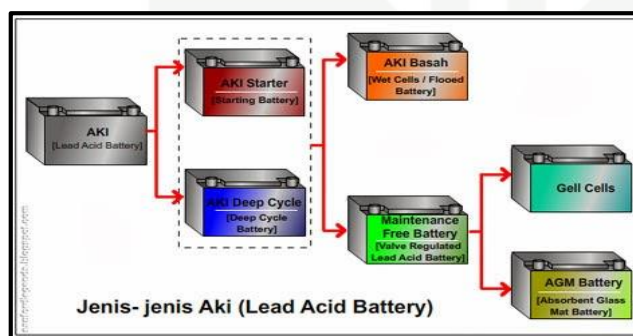
Untuk *State of Charge* (SOC) baterai diukur berdasarkan pada tegangan sebenarnya dari baterai. Dengan mengukur tegangan baterai dan diprogram dengan tipe teknologi penyimpanan yang digunakan oleh baterai, pengatur bisa mengetahui titik tepat

dimana baterai akan mengalami pengisian (*charge*) sesuai dengan sinar matahari bersinar penuh atau pengeluaran (*discharge*) yang berlebihan sesuai kebutuhan melayani beban listrik. Batas pengosongan dari baterai disebut dengan *depth of discharge* (DOD) yang dinyatakan dalam satuan persen. Suatu baterai memiliki DOD 80%, ini berarti bahwa hanya 80% dari energi yang tersedia dapat dipergunakan dan 20% tetap berada dalam cadangan. Semakin dalam DOD yang diberlakukan pada suatu baterai maka semakin pendek pula siklus dari baterai tersebut (Nasution, 2016).

2.6.5.2 Jenis Baterai

Baterai terbentuk oleh sekelompok elemen atau sel yang terhubung seri, secara umum ada dua jenis baterai yang digunakan untuk keperluan PLTS, yaitu *lead acid battery* (Aki) dan *nicel cadmium battery*. Kedua jenis baterai tersebut memiliki komponen yang hampir sama, hanya saja berbeda dalam jenis elektroda yang dipakai dan jenis elektrolit yang digunakan untuk membangkitkan reaksi elektrokimia. *Lead acid battery* menggunakan lempengan yang terbuat dari *lead*, dan sebagai elektrolitnya digunakan H_2SO_4 (asam sulfur) yang sama seperti pada ACCU serta memiliki efisiensi 80%. Sedangkan *nickel cadmium battery* menggunakan *cadmium* sebagai elektroda negatif dan nikel sebagai elektroda positif sedang elektrolitnya dipakai *potassium hidroksida* dan memiliki efisiensi 70% (Putra, 2015).

Menurut bentuk struktur baterai dikelompokkan yang terdiri dari *starting battery* dan *deep cycle battery* seperti ditunjukkan pada gambar 2.16 mengenai Jenis-jenis *lead acid battery*.



Gambar 2.16 Jenis-jenis *lead acid battery*
(Sumber: Nasution, 2016)

1. *Starting Battery*

Starting battery adalah sebuah sel listrik dimana di dalamnya berlangsung proses elektrokimia yang *reversibel* (dapat berbalik) dengan efisiensinya yang tinggi, yang

dimaksud dengan proses elektrokimia *reversible* adalah di dalam baterai dapat berlangsung proses perubahan kimia menjadi tenaga listrik (proses pengosongan), dan sebaliknya dari tenaga listrik menjadi tenaga kimia, pengisian kembali dengan cara regenerasi dari elektroda – elektroda yang dipakai, yaitu dengan melewati arus listrik dalam arah (polaritas) yang berlawanan di dalam sel. Kontruksi baterai stater didalam wadahnya terdapat elektrolit asam sulfat, elektroda positif dan negatif dalam bentuk plat. Plat-plat tersebut dibuat dari timah atau berasal dari timah, karena itu baterai tipe ini sering disebut baterai timah. Ruangan didalamnya dibagi menjadi beberapa sel (biasanya 6 sel, untuk baterai mobil) dan didalam masing masing sel terdapat beberapa elemen yang terendam didalam elektrolit (Nasution, 2016).

Sedangkan tegangan accu ditentukan oleh jumlah dari pada sel baterai, dimana satu sel baterai biasanya dapat menghasilkan tegangan kira-kira 2 sampai 2,1 Volt. Tegangan listrik yang terbentuk sama dengan jumlah tegangan listrik tiap-tiap sel. Jika baterai mempunyai enam sel, maka tegangan baterai standar tersebut adalah 12 Volt sampai 12,6 Volt. Biasanya setiap sel baterai ditandai dengan adanya satu lubang pada kotak accu bagian atas untuk mengisi elektrolit aki. Setiap sel terdiri dari beberapa plat positif dan plat negatif. Kedua plat tersebut dipisahkan oleh separator agar tidak terjadi hubungan langsung (hubungan singkat). Dalam setiap sel baterai jumlah plat negatif lebih satu jika dibandingkan dengan plat positif. Kotak baterai adalah wadah yang menampung elektrolit dan elemen baterai. Ruangan didalamnya dibagi menjadi ruangan sesuai dengan jumlah selnya. Pada kotak baterai terdapat garis tanda *upper level* dan *lower level*, sebagai indikator jumlah elektrolit. Seperti ditunjukkan pada gambar 2.17 mengenai konstruksi baterai stater (Nasution, 2016).



Gambar 2.17 *Starting Battery*
(Sumber: Nasution, 2016)

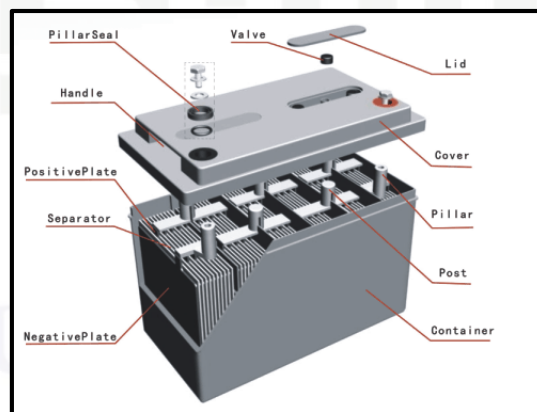
2. *Deep Cycle Battery*

Deep cycle battery dirancang untuk menghasilkan energi arus listrik yang stabil tidak sebesar *starting battery* namun dalam waktu yang lama. Baterai jenis ini tahan

terhadap siklus pengisian-pengosongan baterai yang berulang-ulang. *Deep cycle battery* karena konstruksinya menggunakan pelat yang lebih tebal dan memungkinkan untuk melepaskan energi dalam selang waktu yang panjang. *Deep cycle battery* tidak dapat melepaskan energi listrik secepat dan sebesar *starting battery*. Semakin tebal pelat baterai semakin panjang usia baterai yang dapat diharapkan. Jenis ini juga banyak digunakan pada proyek energi alternatif untuk menyimpan arus listrik seperti pada pembangkit listrik tenaga surya dan pembangkit listrik tenaga angin. Jenis-jenis *deep cycle battery* terdiri dari *Valve Regulated Lead Acid Battery (VRLA)*, *Gel Cells Battery* dan *Absorbent Glass Mat Battery* (Nasution, 2016).

a. *Valve Regulated Lead Acid Battery (VRLA)*

Baterai VRLA merupakan baterai yang tertutup rapat dan dilengkapi dengan sebuah *valve* atau katub, yang akan terbuka jika tekanan gas hasil elektrolisa air melebihi suatu nilai tekanan tertentu, untuk melepaskan gas keluar dari *box*. *Box* baterai VRLA tidak mempunyai penutup sel, dan bekerja pada tekanan konstan 1-4 psi. Tekanan ini membantu mengembalikan 99% *hydrogen* dan oksigen yang terbentuk pada proses pengisian untuk kembali menjadi air. Jadi pada baterai VRLA tidak memungkinkan untuk dilakukan penambahan air. Jenis VRLA yang paling umum adalah Gel VRLA dan AGM VRLA. Seperti ditunjukkan pada gambar 2.18 mengenai konstruksi baterai VRLA (Nasution, 2016).



Gambar 2.18 *Valve Regulated Lead Acid Battery (VRLA)*

(Sumber: Nasution, 2016)

Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

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

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

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

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

b. *Gel Cells Battery*

Baterai Gel VRLA adalah baterai VRLA dengan elektrolit *gelified* asam sulfat dicampur dengan silika, yang membuat massa yang dihasilkan menyerupai gel dan bisa bergerak. Berbeda dengan *flooded* baterai sel basah timbal asam, baterai ini tidak perlu disimpan tetap tegak. Baterai gel mengurangi penguapan elektrolit, tidak tumpah dan tanpa korosi dengan resistensi yang lebih besar untuk *shock* dan *vibrasi*. Kimia baterai gel VRLA basah baterai (*non-sealed*) sama kecuali bahwa *antimon* dalam lempeng timbal timbal digantikan oleh kalsium, dan rekombinasi gas dapat berlangsung. Baterai Gel VRLA disebutkan baterai OPzV merupakan baterai konstruksi sel tunggal dengan tegangan nominal adalah 2 Volt. Misalkan kita mengambil OPzV2-200 berarti baterai Gel OPzV tersebut mempunyai tegangan 2 Volt dan 200Ah. Baterai ini dilengkapi dengan lempeng tubular positif. Grid positif yang dibuat oleh *die-casting* teknik dengan tekanan 18 MPa dan struktur silinder lebih kompak dan memberikan ketahanan terhadap korosi baik pada kondisi ekstrim siklus usia baterai didesain lebih lama dari 20 tahun (Nasution, 2016).



Gambar 2.19 *Gel Cells Battery*
(Sumber: Nasution, 2016)

c. *Absorbent Glass Mat Battery (AGM)*

Bedanya dengan baterai VLA (aki), baterai ini tidak memiliki ventilasi gas. pada jenis baterai AGM elektrolit berada sebuah material *glass mat*, kemasannya tertutup rapi sehingga tidak ada senyawa atau bahan yang dapat keluar atau masuk baterai, oleh karena itu baterai ini tidak memerlukan perawatan lebih, tapi sekali baterainya terbuka dan isinya bocor. Kelebihan dari baterai ini adalah lebih fleksibel untuk penempatan baterai dan pengiriman, tidak memerlukan *maintenance*, memiliki ketahanan lebih pada *discharge* yang lebih tinggi, internal *resistance* lebih kecil, *self discharge* lebih rendah dan kekurangannya rentan terhadap *overcharge*, harga lebih mahal, tidak cocok di temperatur tinggi, umur lebih pendek (Nasution, 2016).

Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

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

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

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

Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

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



Gambar 2.20 Gel Cells Battery
(Sumber: Nasution, 2016)

2.6.6 Solar Charge Controller

Charge Controller atau *Solar Charge Controller* (SCC) atau *Battery Charge Regulator* (BCR) atau *Baterai Charge Unit* (BCU), adalah komponen dalam PLTS. Fungsi dari *Charge Controller* adalah sebagai berikut:

1. Charging mode

Sebagai pengatur pengisian arus searah (DC) yang masuk dari PV Array ke baterai untuk menghindari *over charging* dan *over voltage*. Dengan cara mengubah listrik DC dari PV Array dengan tegangan tertentu dan mengendalikan pengisian ke baterai. Bila baterai kondisi kosong, maka SCC akan mengisi listrik ke baterai sebanyak-banyaknya. Sebaliknya, saat tegangan pengisian di baterai telah mencapai keadaan penuh, maka SCC akan mengatur pola pengisian dengan arus sedikit untuk menjaga tegangan baterai (*floating*) dan jika sudah terisi penuh maka SCC akan menghentikan arus listrik yang masuk ke dalam baterai untuk mencegah *over charge*, dengan demikian ketahanan baterai akan jauh lebih tahan lama. Di dalam kondisi ini, listrik yang tersuplai dari PV Array akan langsung terdistribusi ke beban atau peralatan listrik dalam jumlah tertentu sesuai dengan konsumsi daya peralatan listrik (Nasution, 2016).

2. Load operation mode

Setelah baterai telah terisi penuh maka akan berubah fungsi menjadi *Load operation mode*. Baterai akan mensuplai energi listrik ke beban jika kondisi permintaan beban melebihi hasil produksi dari PV Array baik ketika malam hari, ketika cuaca buruk atau mendung yang menyebabkan terhalangnya radiasi matahari ke PV Array sehingga mengurangi produksinya. Saat baterai mensuplai beban Arus listrik DC yang berasal dari baterai tidak mungkin masuk ke panel sel surya karena biasanya ada diode



proteksi yang hanya melewatkan arus listrik DC dari panel sel surya ke baterai, bukan sebaliknya. Saat tegangan di baterai dalam keadaan hampir kosong, maka SCC berfungsi menghentikan pengambilan arus listrik dari baterai oleh beban atau peralatan listrik. Dalam kondisi tegangan tertentu (umumnya sekitar 10% sisa tegangan di baterai), maka pemutusan arus beban dilakukan oleh SCC. Hal ini menjaga baterai dan mencegah kerusakan pada sel – sel baterai. Pada kebanyakan model SCC memiliki indikator lampu akan menyala dengan warna tertentu (umumnya berwarna merah atau kuning) yang menunjukkan bahwa baterai dalam proses *charging*. Dalam kondisi ini, bila sisa arus di baterai kosong (dibawah 10%), maka pengambilan arus listrik dari baterai akan diputus oleh SCC, maka peralatan listrik atau beban tidak dapat beroperasi. Keadaan ini disebut *overdischarge* akibat beban yang dipikul cukup besar (Nasution, 2016).

3. Memonitor sistem PLTS

Pada SCC tipe-tipe tertentu dilengkapi dengan digital meter dengan indikator yang lebih lengkap, untuk memonitor berbagai macam kondisi yang terjadi pada sistem PLTS dapat terdeteksi dengan baik. Pada SCC jenis seri menonaktifkan arus lebih lanjut ke baterai ketika penuh. Sedangkan tipe SCC jenis *shunt* mengalihkan kelebihan listrik ke beban *shunt*, seperti pemanas air listrik, ketika baterai penuh. SCC teknologi *Pulse Width Modulation* (PWM) dan *Maksimum Power Point Tracker* (MPPT) merupakan SCC yang lebih canggih, menyesuaikan tingkat pengisian baterai yang tergantung pada tingkat irradiasi matahari selama 4 sampai dengan 5 jam dan ntuk memungkinkan pengisian lebih dekat dengan kapasitas maksimum. SCC juga dapat memonitor suhu baterai untuk mencegah *overheating*. Beberapa tipe SCC juga menampilkan data, mengirimkan data ke *remote displays*, dan data *logging* untuk melacak aliran listrik dari waktu ke waktu . SCC yang dipilih harus lulus test kualifikasi dan memenuhi persyaratan teknis dalam pemakaiannya. Persyaratan teknis dalam penggunaan SCC antara lain sebagai berikut :

- a. Kapasitas maksimum *input* dan *output*
- b. Mempunyai tegangan batas bawah dan batas atas terhadap pemutusan baterai
- c. Konsumsi diri yang sangat kecil
- d. Mempunyai proteksi hubung singkat dan beban lebih
- e. Tegangan jatuh yang kecil ($< 0,5$ V) pada sisi PV *Array* ke baterai dan pada sisi baterai ke beban

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

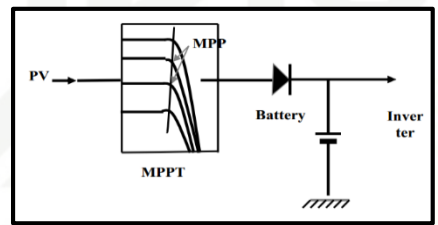
- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

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

f. Mempunyai *Blocking Diode* dan sesuai dengan kapasitas maksimum kapasitas maksimum *input* dan *output* (Nasution, 2016).

2.6.6.1 Solar Charge Control Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Rangkaian MPPT mengatur daya keluaran modul *photovoltaic* agar selalu berada pada titik daya maksimum dan sekaligus mengatur proses pengisian baterai. Kapasitas daya *photovoltaic* dapat dimanfaatkan secara optimal karena ketidaksesuaian antara tegangan *photovoltaic* dan tegangan kerja baterai dapat dihindari. Mempunyai efisiensi yang tertinggi diantara tipe-tipe regulator lainnya. Mempergunakan sistem *chooper* dengan frekuensi tinggi sehingga apabila desain dan fabrikasinya kurang baik akan menimbulkan interferensi. Teknologinya cukup rumit dan biayanya relatif mahal. Seperti ditunjukkan pada gambar 2.21 mengenai rangkaian MPPT Regulator (Nasution, 2016).



Gambar 2.21 Rangkaian MPPT Regulator (Sumber: Nasution, 2016)

2.6.6.2 Kriteria Solar Charge Controllel MPPT

Solar Charge Controllel MPPT secara signifikan dapat meningkatkan daya lebih dari 30%. Kriteria *Solar Charge Controllel* MPPT sebagai berikut:

1. Dapat dilihat pada *output* PV Array dan membandingkannya dengan tegangan baterai
2. Dapat dilihat pada *display* monitor kemampuan terbaik pada PV Array untuk dapat mengisi baterai. Ini dibutuhkan ini dan mengkonversi ke tegangan terbaik untuk mendapatkan *ampere* maksimal ke dalam baterai
3. MPPT paling modern memiliki efisiensi dalam konversi adalah sekitar 92 – 97%
4. Memiliki kualitas *Ampere*, hal merupakan yang paling penting dalam pengisian
5. Ketika MPPT menilai baterai hampir habis kemudian MPPT mengubah tegangan ekstra untuk *Ampere*

Untuk SCC MPPT memiliki monitoring temperatur baterai dan biasanya terdiri dari 1 input (2 terminal) yang terhubung dengan *output* panel sel surya, 1 *output* (2 terminal) yang terhubung dengan baterai dan 1 output (2 terminal) yang terhubung dengan beban

(load) seperti ditunjukkan pada gambar 2.22 mengenai SCC MPPT SCB 48120 (Nasution, 2016).



Gambar 2.22 Solar Charge Controllel MPPT
(Sumber: Nasution, 2016)

2.6.7 Inverter

Inverter adalah suatu alat yang berfungsi untuk mengubah arus searah (DC) menjadi arus AC. Pada PLTS, inverter berfungsi sebagai pengkondisi tenaga listrik (*Power Condition*) dan sistem kontrol yang merubah arus listrik DC yang dihasilkan oleh modul surya menjadi listrik arus bolak-balik (AC), yang kemudian akan mengontrol kualitas daya listrik yang dikeluarkan untuk dikirim ke beban atau jaringan listrik. Terdapat dua macam sistem inverter pada PLTS yaitu inverter fasa untuk *Solar Home System* (SHS) yang bebannya kecil dan inverter 3 fasa untuk sistem PLTS yang besar dan terhubung dengan jaringan PLN (Putra, 2015).



Gambar 2.23. Inverter
(Sumber: Nasution, 2016)

Berdasarkan karakteristik dari performa yang dibutuhkan, inverter untuk sistem PLTS berdiri sendiri (*Stand-Alone*) dan PLTS terhubung dengan jaringan PLN (*Grid-Connected*) memiliki karakteristik yang berbeda, yaitu:

1. Pada PLTS *Stand-Alone*, inverter harus mampu mensuplai tegangan AC yang konstan pada variasi produksi energi listrik dari modul surya dan tuntutan permintaan beban (*load demand*) yang tanggung.
2. Pada PLTS *Grid-Connected*, inverter dapat menghasilkan kembali tegangan yang sama persis dengan tegangan jaringan pada waktu yang sama, untuk mengoptimalkan dan memaksimalkan keluaran energi listrik yang dihasilkan oleh modul surya (Putra, 2015).

2.6.7.1 Jenis Inverter

Inverter terbagi dua yaitu berdasarkan bentuk gelombang dan inverter *bidirectional*.

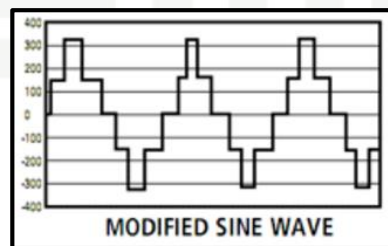
Berikut ini jenis-jenis inverter dan karakteristiknya.

1. Inverter Berdasarkan Bentuk Gelombang

a. Inverter *Modified Sine Wave*

Bentuk gelombang sinus keluarannya masih berbentuk sinus persegi, tipe inverter seperti ini harganya murah dan banyak ditemui dijual bebas dipasar. Namun inverter jenis ini efisiensinya rendah ($< 80\%$), akibatnya mengkonsumsi daya yang cukup besar. Biasanya ukuran kapasitas inverter jenis ini juga tidak terlalu besar (< 2 KW). Inverter tipe ini kurang cocok diaplikasikan ke alat-alat listrik yang menggunakan motor listrik seperti pompa, kipas angin (Nasution, 2016).

Gambar 2.24 menunjukkan mengenai bentuk gelombang inverter *Modified Sine Wave*.



Gambar 2.24 Inverter *Modified Sine Wave*
(Sumber: Nasution, 2016)

b. Inverter *Pure* atau *True Sine Wave*

Bentuk gelombang sinus keluarannya nyaris berbentuk sinus yang sempurna, tipe inverter seperti ini harganya relatif mahal dan kapasitasnya besar (> 1 KW).

Inverter jenis ini efisiensinya tinggi ($> 80\%$), sehingga konsumsi dayanya rendah.

Inverter tipe ini sangat tepat diaplikasikan ke alat-alat listrik yang menggunakan

Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

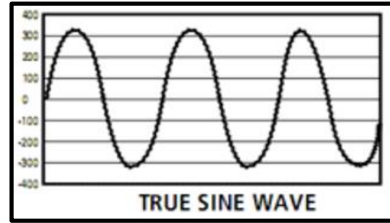
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.

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

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

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

motor listrik (Nasution, 2016). Gambar 2.25 menunjukkan mengenai bentuk gelombang inverter *Pure* atau *True Sine Wave*.



Gambar 2.25 Inverter *Pure* atau *True Sine Wave*
(Sumber:Nasution, 2016)

2. Inverter *Bidirectional*

Inverter *bidirectional* atau inverter dua arah adalah jenis inverter yang memiliki kemampuan ganda yaitu selain mengubah arus DC ke AC juga dilengkapi dengan kemampuan mengubah arus AC ke DC ini terjadi saat inverter *bidirectional* berfungsi sebagai *rectifier (charger)* yaitu terjadi pada siang hari saat daya yang dihasilkan PV Array lebih besar dari beban, inverter *bidirectional* akan mengubah tegangan AC dari *output* inverter *on-grid* (inverter satu arah) menjadi tegangan DC baterai. Sedangkan fungsi inverter terjadi saat malam hari dengan mengubah tegangan DC baterai menjadi AC untuk disalurkan ke beban (Nasution, 2016).

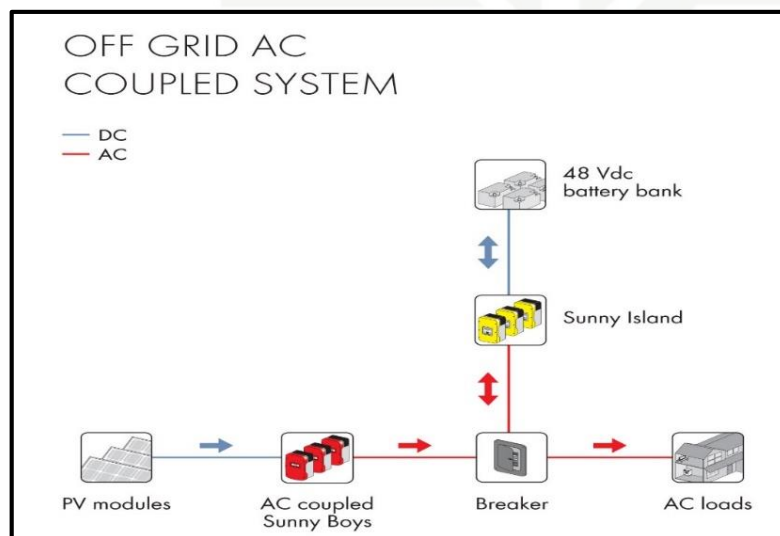
2.6.7.2 Rancangan Sistem dan Konstruksi Komponen Utama Inverter

Rancangan sistem dan konstruksi inverter pada pembangkit listrik tenaga surya Terpusat merubah tegangan DC dari modul surya, *solar charge controllel* dan baterai menjadi sistem tegangan AC dengan frekuensi 50 Hz, nilai puncak tegangan dan arus, *output voltage* faktor harmonik (THD Factor) kecil dari 3 %, serta faktor daya atau $\cos \emptyset$ yang nilainya 1 (satu). Rancangan sistem dan konstruksi yang dipilih adalah gelombang sinus murni dengan *Bidirectional* inverter. Peralatan pengaman yang diperlukan adalah rangkaian proteksi, proteksi polaritas terbalik, proteksi *overload*, proteksi sensor temperatur di atas nominal, proteksi tegangan baterai terendah dan tertinggi. Rancangan sistem daya inverter disesuaikan dengan kebutuhan dari kapasitas PLTS Terpusat. Biasanya untuk keamanan dari inverter ditambahkan 10% dari daya inverter yang sudah direncanakan. Dalam rancangan sistem yang paling umum, PV Array terhubung melalui *solar charge controllel*, baterai langsung ke inverter yang mengubah tegangan utama DC yang dihasilkan oleh PV Array menjadi tegangan AC dan tegangan AC dari inverter



yang langsung terhubung ke listrik konsumen melalui panel distribusi. Efisiensi inverter besar dari 92%, dilengkapi dengan *display*, data *logger* dan tersedia *remote monitoring* sistem yang terintegrasi. Perancangan sistem untuk tegangan inverter 220/230 volt untuk 1 (satu) fasa dan 380/400 volt untuk tegangan 3(tiga) fasa (Nasution, 2016).

Pada PLTS Terpusat dapat dipakai dua jenis inverter seperti gambar 2.26, inverter *on-grid* (merah) merupakan inverter yang terhubung dari PV Array dan inverter *off-grid* atau inverter *bidirectional* (kuning) yang terhubung dengan baterai. Kedua inverter dapat terkoneksi melalui jaringan listrik AC saja, tanpa jaringan komunikasi lain. Hal ini memungkinkan komunikasi antar inverter *on-grid* dan *off-grid* yang terpisah-pisah dengan jarak yang jauh. Dengan fitur ini, semua inverter dapat berkomunikasi hanya dengan menggunakan AC power line tanpa perlu tambahan jaringan komunikasi lainnya. Dengan mengubah frekuensi AC, inverter juga mempunyai kemampuan untuk dapat meregulasi fluktuasi beban atau *Frequency-Shift Power Control (FSPC)*. Pada siang hari, seluruh energi yang dihasilkan oleh PV Array akan dialirkan langsung oleh inverter *on-grid* langsung ke rumah-rumah pengguna atau fasilitas umum (beban). Jika beban yang dilayani lebih kecil dari energi yang dihasilkan oleh PV Array, maka kelebihan energi tersebut akan dipakai untuk mengisi (*charging*) baterai. Pada saat baterai dalam kondisi penuh, maka inverter *off-grid* akan secara otomatis menghentikan suplai ke baterai. Sebaliknya, jika beban yang dilayani lebih besar dari energi yang dihasilkan atau pada malam hari, maka inverter *off-grid* akan mengkonversi energi yang tersimpan pada baterai (*discharging*) untuk melayani beban (Nasution, 2016).



Gambar 2.26 Rancangan Sistem Dua Jenis Inverter (Sumber: Nasution, 2016)



Inverter yang digunakan juga mempunyai fleksibilitas yang memungkinkan penambahan jumlah inverter ketika ada kenaikan permintaan daya. Inverter yang digunakan juga mempunyai kemampuan untuk bisa beroperasi paralel ketika kebutuhan daya meningkat di daerah tersebut dan mempunyai kemampuan untuk ditingkatkan dari satu-fasa menjadi tiga-fasa. Inverter juga mempunyai kemampuan untuk bisa diintegrasikan (*hybrid*) dengan pembangkit listrik dengan sumber energi terbarukan lainnya seperti energi angin, energi air atau bahkan dengan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD). Hal ini dilakukan karena PLTS dapat diinterkoneksi dengan jaringan PLN setempat atau dengan jaringan yang dikelola secara swadaya oleh pemerintah daerah atau masyarakat setempat. Lokasi PLTS seluruhnya berada pada pulau-pulau terluar dan daerah terpencil, sehingga inverter diharapkan dapat beroperasi handal pada kondisi dengan jenis-jenis beban (*load*) yang berbeda-beda (Nasution, 2016).

2.6.7.3 Konsep Hubungan Inverter

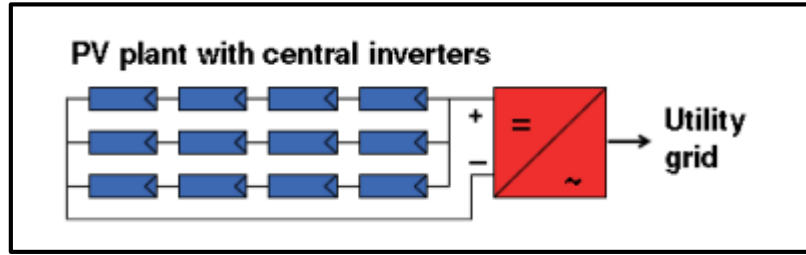
Konsep hubungan inverter menjelaskan tentang bentuk rangkaian inverter pada suatu sistem PLTS terhadap pembangkitan daya listrik oleh panel surya, dan hubungan antara inverter dengan beban atau jaringan. Secara umum ada dua kelas inverter yaitu, inverter sentral atau disebut *central inverters* dan *string inverters* (Putra, 2015).

1. Inverter Sentral (*Central Inverters*)

Inverter sentral (*central inverters*) biasanya digunakan pada berbagai sistem PLTS skala menengah dan skala besar. *Central inverters* memberikan instalasi yang lebih handal dan sederhana, namun memiliki kekurangan yaitu ketidaksepadanan rugi-rugi (*mismatch losses*) yang disebabkan variasi profil tegangan dan arus dari modul surya pada Array yang sama, dan ketiadaan dari *Maximum Power Point Tracking (MPPT)* untuk setiap string. Hal ini mungkin menyebabkan masalah pada *PV Array* yang memiliki kemiringan dan sudut orientasi beragam dan majemuk, berkaitan dengan iradiasi, bayangan atau tipe modul surya yang berbeda. *Central inverters* biasanya merupakan sistem tiga fasa dan dilengkapi transformator frekuensi jaringan (*grid frequency transformer*). Selain itu *central inverters* menggunakan konfigurasi *master slave* yaitu beberapa inverter tidak akan bekerja dan padam ketika iradiasi dalam keadaan rendah, sedangkan inverter lainnya tetap bekerja sesuai atau mendekati pembebanan yang optimal. Ketika iradiasi tinggi, semua beban dibagikan dan ditanggung oleh semua inverter (IFC, 2012).

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

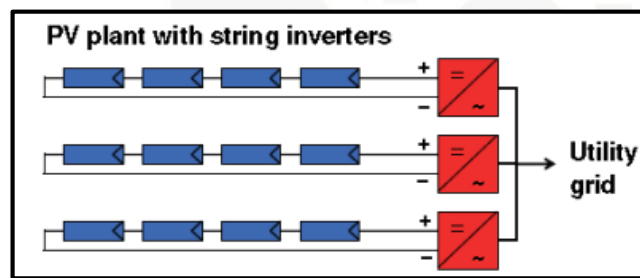
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan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



Gambar 2.27 Central Inverters
 (Sumber: IFC, 2012)

2 Inverter String

Inverter string menggunakan inverter lebih dari satu untuk string *PV Array* juga sama sebih dari satu sama bnyaknya dengan jumlah inverter`. Penggunaan inverter string sangat banyak dan meningkat karena inverter string dapat mengatasi batasan daya yang luas dan lebih murah dalam proses pabrikasinya dari pada jenis *central inverters*. Sistem ini sangat cocok untuk kondisi modul surya yang tidak bisa dipasang pada orientasi yang sama, berbeda spesifikasi, atau perbedaan iradiasi yang diterima. Sistem ini memiliki kelebihan yaitu lebih mudah dalam perbaikan dan penggantian, karena tidak diperlukan personil dan spesialis, dan waktu yang dibutuhkan tidak selama sistem sentral, jadi tidak banyak hasil produksi energi yang terbuang saat perbaikan (IFC, 2012).



Gambar 2.28 Sting Inverters
 (Sumber: IFC, 2012)

2.7 Aspek Teknis

2.7.1 Menentukan Spesifikasi Umum

Rumus –rumus dibawah ini bersumber dari standar AS/NZS 4509.2:2010, dalam menentukan spesifikasi umum PLTS Terpusat *Off-Grid System* perlu menentukan hal-hal berikut:

1. Menentukan efisiensi inverter (η_{inv})

Dalam menentukan efisiensi inverter dianjurkan menggunakan inverter dengan efisiensi yang tinggi.

2. *Design load energy* (E_{tot})

Design load energy adalah kebutuhan energi listrik total yang harus disuplai oleh pembangkit. Untuk menentukan *Design load energy* digunakan persamaan sebagai berikut:

$$E_{tot} = \frac{E}{\eta_{inv}} \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan :

E_{tot} = Total kebutuhan energi harian (Wh)

E = listrik per hari (Wh)

η_{inv} = Efisiensi inverter (%)

3. Menentukan sudut kemiringan (*tilt angle*)

Sudut kemiringan dipilih untuk memaksimalkan produksi energi dari PV *Array*. Berdasarkan AS/NZS 4509.2:2010, Sudut optimum tergantung pada derajat lintang maupun variasi radiasi matahari sepanjang tahun. Minimal *tilt angle* modul surya adalah 10°.

4. Menentukan nominal tegangan bus DC (V_{dc})

Tujuan menentukan nominal tegangan bus DC adalah sebagai referensi tegangan untuk setiap komponen yang akan terhubung ke jalur bus DC.

5. Konfigurasi sistem

Konfigurasi sistem pada perancangan PLTS Terpusat *Off-Grid System*.



2.7.2 Perancangan dan Pemilihan Komponen Utama

Perancangan dan pemilihan komponen utama PLTS Terpusat *Off-Grid System* pada tahap ini adalah melakukan perhitungan secara teoritis yang sesuai dengan rumus-rumus yang terdapat pada *Australian/New Zealand Standard* TM AS/NZS 4509.2:2010 tentang *Stand Alone Power System Part 2: System Design* bertujuan untuk menghasilkan sebuah desain PLTS Terpusat *Off-Grid System* yang optimal dan handal.

2.7.2.1 Modul Surya

Dalam melakukan perancangan dan pemilihan PV *Array*, ada beberapa hal yang menjadi variabel perhitungan sebelum menetapkan jumlah dan kapasitas modul surya yang akan digunakan. Adapun variabel-variabel yang menjadi perhitungan tersebut, yaitu:

1. *Oversupply co-efficient (fo)*
Oversupply co-efficient merupakan nilai kelebihan suplai energi listrik yang digunakan dalam mendesain kapasitas pembangkit.
2. Nominal efisiensi baterai (η_{bat})
 Pada setiap PLTS digunakan baterai jenis *lead acid*, menurut AS/NZS 4509.2:2010 baterai jenis *lead acid* memiliki efisiensi 90% sampai 95%.
3. Pemilihan modul surya
 Pemilihan modul Surya ditentukan oleh desainer sendiri karena setiap jenis modul surya memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing seperti yang telah dijelaskan diatas.
4. *Irradiation on tilted plane (H_{tilt})*
Irradiation on tilted plane adalah radiasi yang diterima pada *title angle* modul surya yang digunakan.
5. *Design load energy* setiap PV *Array* (E_{tot})
 Perancangan PLTS Terpusat *Off-Grid System* pada penelitian ini ditentukan beberapa rangkaian PV *Array* untuk menyesuaikan dengan kapasitas *Solar Charger Controllel* (SSC) yang akan dirancang.

$$Design\ load\ energy\ (E_{tot})\ setiap\ PV\ Array = \frac{E_{tot}}{Jumlah\ PV\ Array} \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan :

E_{tot} = Total kebutuhan energi harian (Wh)

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
 Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
 © 2013, All Rights Reserved. UIN Suska Riau
 Saiful Ismail, Universitas Syarif Kasim Riau

6. *Design load (Ah)*

Design load Ah adalah kebutuhan energi listrik dalam satuan *Ampere hour* (Ah). *Design load* Ah diperoleh dari pembagian dari total kebutuhan energi harian (Wh) dan tegangan bus DC.

$$Design\ load\ Ah = \frac{E_{tot}}{V_{dc}} \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan :

E_{tot} = Total kebutuhan energi harian (Wh)

V_{dc} = Tegangan bus DC (V)

7. *Required Array output*

Required Array output adalah nominal daya yang harus disuplai oleh PV Array (dalam satuan Ah) dengan memperhitungkan efisiensi baterai (η_{bat}).

$$Required\ Array\ output\ Ah = \frac{Design\ load\ Ah}{\eta_{bat}} \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan :

E_{tot} = Kebutuhan energi listrik (Ah)

η_{bat} = Efisiensi baterai (%)

8. *Daily charge output per module*

Daily charge output per module adalah energi yang dihasilkan satu modul per hari (dalam Ah). *Daily charge output per module* dalam penelitian ini sebesar:

$$Daily\ charge\ output = (1 - Toleransi\ pabrik) \times I_{T,V} \times f_{dirt} \times H_{tilt} \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan :

Toleransi pabrik = Toleransi pabrik terhadap daya keluaran (%)

$I_{T,V}$ = Arus hubung singkat di bawah temperatur operasi (NOCT) (A)

f_{dirt} = *Derating factor* karena debu (%)

H_{tilt} = Radiasi *title angle* (kWh/m²/hari)

9. *Number of parallel strings required (N_p)*

Number of parallel strings required adalah jumlah modul surya yang akan dihubungkan secara paralel.

Jumlah modul surya yang terhubung paralel adalah

$$N_p = \frac{\text{Required Array output} \times f_o}{\text{Daily charge output per module}} \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan :

Required Array output = Arus hubung singkat di bawah temperatur operasi (A)

Daily charge output = *Derating factor* karena debu (%)

f_o = *Oversupply co-efficient* 1,3 – 2

10. *Number of series modules per string (Ns)*

Number of series modules per string adalah jumlah modul surya yang akan dihubungkan secara seri. Jumlah modul surya yang terhubung seri adalah:

$$N_s = \frac{V_{dc}}{V_{oc}} \dots\dots\dots(2.7)$$

Keterangan :

V_{dc} = Nominal tegangan bus DC (V)

V_{oc} = Nominal tegangan modul (V)

11. *Total number of modules in Array (N)*

Total number of modules in Array adalah total keseluruhan modul surya yang akan digunakan. Jumlah modul surya yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

$$N = N_p \times N_s \dots\dots\dots(2.8)$$

Keterangan :

N_s = *Number of series modules per string*

N_p = *Number of parallel strings required*

12. Kapasitas setiap PV Array ($P_{PV \text{ Array}}$)

Setelah mendapatkan jumlah keseluruhan modul surya yang akan digunakan, maka kapasitas daya dari PV Array pada PLTS Terpusat *Off-Grid system* dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$P_{PV \text{ Array}} = \text{jumlah modul surya} \times \text{daya per modul surya} \dots\dots\dots(2.9)$$

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

13. Kapasitas Total PV Array ($P_{PV Array}$)

Kapasitas total daya dari seluruh PV Array pada PLTS Terpusat *Off-Grid System* dalam penelitian ini didapatkan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$N (Total) = N \times \text{Jumlah PV Array}$$

$$P_{PV Array} (Total) = N (Total) \times P_{stc} \dots\dots\dots(2.10)$$

Keterangan :

- $N (Total)$ = Total keseluruhan modul
- $P_{PV Array} (Total)$ = Kapasitas total daya dari seluruh PV Array
- P_{stc} = Kapasitas modul

2.7.2.2 Baterai

Dalam perancangan dan pemilihan baterai yang akan digunakan, ada beberapa variabel perhitungan yang harus dimasukkan, yaitu

1. *Design load Ah for battery sizing*
Design load Ah for battery sizing merupakan kebutuhan energi listrik yang akan dijadikan referensi dalam menentukan kapasitas baterai yang akan digunakan.
2. Target hari otonomi (*autonomy*) (T_{aut})
 Merupakan target jumlah hari operasi maksimum baterai tanpa masukan energi dari PV Array sebelum melebihi DoD maksimum baterai.
3. *Maximum Depth of Discharge (DoD_{max})*
 Merupakan batas pengosongan dari baterai, besarnya muatan listrik maksimum dari baterai yang diizinkan untuk digunakan.
4. Kapasitas baterai pada *nominal battery discharge rate* (C_x)
 Menurut AS/NZS 4509.2:2010, pemilihan C_x harus mempertimbangkan beban maksimum dan durasi beban, *discharge rate* 100 jam cocok digunakan untuk kebutuhan beban yang rendah dan *discharge rate* 20 jam cocok digunakan untuk beban yang tinggi.
5. Faktor koreksi temperatur
 Menurut AS/NZS 4509.2:2010, faktor koreksi temperatur untuk baterai dengan *discharge rate* 20 jam (C_{20}) adalah sebesar 98%.

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

6. Kapasitas baterai yang diperlukan

Besarnya kapasitas baterai yang diperlukan dalam PLTS Terpusat *Off-Grid system* adalah:

$$Ah = \frac{\text{Design load Ah} \times T_{\text{aut}}}{\text{DoD}_{\text{max}} \times \text{Faktor koreksi temperatur}} \dots\dots\dots(2.11)$$

Keterangan :

- Design load Ah* = Kebutuhan energi listrik (Ah)
- T_{aut} = Target hari otonomi
- DoD_{max} = Batas pengosongan dari baterai (%)

7. Pemilihan baterai

Pada Perancangan PLTS Terpusat *Off-Grid system* pemilihan baterai sesuai dengan spesifikasi dan kebutuhan sistem.

8. Jumlah baterai terhubung seri

Jumlah baterai yang dihubungkan disesuaikan dengan tegangan bus DC yang digunakan. Dengan persamaan berikut:

$$\text{Baterai terhubung seri} = \frac{V_{\text{dc}}}{V_{\text{dc}}} \dots\dots\dots(2.12)$$

Keterangan :

- V_{dc} = Nominal tegangan bus DC (V)
- V_{dc} = Nominal baterai (V)

9. Jumlah baterai terhubung paralel

Untuk meningkatkan kapasitas baterai yang digunakan sesuai kapasitas baterai. Adapun jumlah baterai yang dihubungkan paralel dalam penelitian ini yaitu:

$$\text{Baterai terhubung paralel} = \frac{\text{Kapasitas baterai diperlukan}}{\text{Kapasitas baterai pada } C_x} \dots\dots\dots(2.13)$$

10. Total jumlah baterai

Setelah mendapatkan jumlah baterai yang dihubungkan secara paralel dan seri, maka dapat ditentukan total baterai yang diperlukan dalam perancangan dengan mengalikan total baterai yang diserikan dengan jumlah blok baterai yang diparalelkan, yaitu:

$$\text{Total} = \text{Baterai terhubung seri} \times \text{Baterai terhubung paralel} \dots\dots\dots(2.14)$$

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



11. *Capacity of battery bank at nominal discharge rate*

Capacity of battery bank at nominal discharge rate adalah kapasitas baterai yang dihasilkan setelah perancangan.

$$C_x(\text{Design}) = \text{Kapasitas baterai} \times \text{jumlah string parallel} \dots \dots \dots (2.15)$$

12. *Day of autonomy for selected battery*

Waktu otonomi adalah jumlah hari yang dapat dilayani oleh baterai untuk mensuplai energi beban tanpa adanya energi dari PLTS.

$$a = \frac{\text{DoD}_{\max} \times \text{Capacity of battery} \times \text{Faktor koreksi temperatur}}{\text{Design load Ah for battery sizing}} \dots \dots \dots (2.16)$$

13. *Nominal daily DoD*

Nominal daily DoD disimbolkan dengan DoD_d , adalah besarnya discharge rata-rata harian dari baterai.

$$\text{DoD}_d = \frac{\text{Design load Ah}}{\text{Capacity of battery (Design)}} \dots \dots \dots (2.17)$$

2.7.2.3 Solar Charger Controlel (SCC)

Untuk menghindari baterai dari kerusakan karena tidak stabilnya arus yang masuk.

Dalam perancangan dan pemilihan SCC harus mengikuti beberapa tahapan, antara lain:

1. *x h rate capacity of selected cell/block*

h rate capacity of selected cell/block adalah kapasitas yang tertera pada *manufacture* baterai.

2. *x h rate capacity of battery bank*

x h rate capacity of battery bank disimbolkan dengan C_x adalah total kapasitas baterai *Design load* (Ah) yang digunakan dalam sistem PLTS.

3. *x h rate capacity of battery bank*

x h charge rate for battery bank disimbolkan dengan I_x , adalah arus maksimum yang harus dihasilkan oleh SCC (satuan dalam A).

$$I_x = \frac{\text{h rate capacity of battery bank}}{x} \dots \dots \dots (2.18)$$

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

4. *Max charge voltage at typical* (V_{bc})

V_{bc} adalah tegangan normal maksimum *charge* dari baterai charge regulator pada arus maksimum.

$$V_{bc} = \text{typically voltage per cell} \times N_s \dots \dots \dots (2.19)$$

5. *Battery charge max apperent power* (S_{bc})

Battery charge max apperent power adalah daya nyata *maximum* yang dikonsumsi oleh baterai *charger* pada kondisi saat arus *output* maksimum dan tegangan pengisian normal maksimum (VA).

$$S_{bc} = \frac{I_{bc} \times V_{bc}}{(\eta_{bc} \times pf_{bc} \times 1000)} \dots \dots \dots (2.20)$$

Keterangan :

- I_{bc} = *Output current* (A)
- V_{bc} = Tegangan normal maksimum *charge* (V)
- η_{bc} = *Nominal charge efficiency* (%)
- pf_{bc} = *Power faktor* (%)

2.7.2.4 Inverter

Menurut AS/NZS 4509.2:2010, pada tahap perancangan dan pemilihan inverter perlu memperhatikan hal-hal berikut:

1. Kapasitas daya inverter ditentukan dari daya *output* seluruh PV Array
2. Kapasitas daya inverter yang direncanakan harus dilebihkan 10% (*Safety Factor*)
3. Kualitas gelombang (direkomendasikan *pure sine wave*)
4. Efisiensi inverter
5. Rentang tegangan operasi DC
6. Tegangan dan frekuensi keluaran
7. Konfigurasi system

Dari beberapa kriteria di atas maka dalam menentukan kapasitas inverter pada penelitian ini, akan disesuaikan dengan kebutuhan dari kapasitas PLTS Terpusat *Off-Grid System*. Untuk keamanan inverter ditambahkan 10% atau dikalikan 1,1 dari daya inverter yang sudah direncanakan, sehingga kapasitas inverter yang akan digunakan, yaitu:

$$\text{Kapasitas inverter} = \text{Kapasitas PLTS} \times f_o \dots \dots \dots (2.21)$$

2.7.3 Perancangan dan Pemilihan Komponen Pendukung

2.7.3.1 Kabel

Perancangan kabel pada PLTS Terpusat *Off-Grid System* dalam penelitian ini yaitu menentukan maksimum arus sesuai dengan nilai *Safety Factor* (1,25) berdasarkan AS/NZS 4509.2:2010, sedangkan pemilihan kapasitas dan jenis kabel menggunakan Standar Perusahaan Listrik Nasional atau Standar Nasional Indonesia (SPLN/SNI). Jenis kabel terbaik yang digunakan pada PLTS yaitu NYAF (Nasution, 2016). Pengkabelan pada PLTS Terpusat *Off-Grid System* dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Kabel DC Antara Modul Surya

$$\text{Maksimum Arus} = 1,25 \times I_{sc} \dots\dots\dots(2.22)$$

Keterangan :

I_{sc} = Arus modul surya (A)

2. Kabel Modul Surya ke *Junction Box*, *Junction Box* ke SCC, dan SCC ke Panel Busbar DC.

$$\text{Maksimum Arus} = \frac{P_{Array}}{V_{dc}} \times 1,25 \dots\dots\dots(2.23)$$

Keterangan :

P_{Array} = Daya PV Array (kWp)

V_{dc} = Tegangan normal maksimum *charge* (V)

3. Kabel baterai ke Panel Baterai dan Kabel Busbar DC ke Inverter

$$\text{Maksimum Arus} = \frac{\text{Kapasitas baterai} \times N_p \text{ Baterai}}{C_x} \times 1,25 \dots\dots\dots(2.24)$$

Keterangan :

$N_p \text{ Baterai}$ = Jumlah baterai terhubung parallel

C_x = x h rate capacity of battery

4. Kabel Inverter ke Panel Distribusi

$$\text{Maksimum Arus} = \frac{P_{Inverter}}{V_{ac}} \times 1,25 \dots\dots\dots(2.25)$$

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



Keterangan :

$P_{Inverter}$ = Daya inverter (kW)

V_{ac} = Tegangan AC

2.7.3.2 Sistem Proteksi Pada Panel Box

Panel *box* pada PLTS dilengkapi dengan saklar utama/pemisah, pembatas arus *Mini Circuit Breaker* (MCB) atau *Moulded Case Circuit Breaker* (MCCB), *Earth Leak Circuit Breaker* (ELCB), saklar, terminal dan busbar. Perancangan sistem proteksi pada panel *box* pada PLTS Terpusat *Off-Grid System* dalam penelitian ini yaitu penentuan kapasitas MCCB yang disesuaikan dengan maksimum arus.

1. MCCB Pada Panel Basbar DC
2. MCCB Pada Panel Baterai
3. MCCB Pada Panel Distribusi

2.7.3.3 Mounting System

Mounting System pada komponen PLTS yang berfungsi untuk tempat meletakkan panel surya secara aman dengan mempertimbangkan arah matahari. *Mounting system* dapat diaplikasikan di berbagai tempat menyesuaikan dengan kebutuhan dan aplikasi PLTS (PT.HDP, 2016).

1. Penentuan lokasi instalasi PLTS Terpusat *Off-Grid System*
2. Rancangan sistem dan konstruksi penyangga modul surya PLTS Terpusat *Off-Grid System*

2.7.3.4 Penangkal Petir

Penangkal petir sangat diperlukan disetiap pembangkit listrik maupun PLTS Terpusat *Off-Grid System*. Alat ini berfungsi juga mengamankan dari sambaran petir atau kejutan petir sebelum mengenai peralatan sistem yang dapat berakibat fatal. Rancangan sistem dan konstruksi penangkal petir yang digunakan dalam penelitian ini menyesuaikan dengan rancangan penangkal petir PLTS Terpusat *Off-Grid System* yang dirancang pada modul rancangan teknis PLTS Terpusat *Off-Grid System* oleh kementerian ESDM (Nasution, 2016).



2.7.4 Analisa Perancangan PLTS Terpusat *Off-Grid System*

2.7.4.1 Losses

Sebuah PV *Array* memiliki beberapa *losses* yang dapat menyebabkan kerugian dalam sistem. Dengan mengetahui besar *losses* pada sistem maka kita dapat mengetahui efisiensi PLTS Terpusat *Off-Grid System*. Berikut ini akan disebutkan beberapa *losses* yang memberikan kerugian secara tahunan, yang menyebabkan berkurangnya hasil produksi energi pada PLTS (GSES, 2013).

1. Kotoran pada modul surya

Nilai *Derating factor* atau kotoran pada modul surya terdapat pada spesifikasi modul surya

2. Faktor temperatur modul surya

Untuk mengetahui besar nilai faktor temperatur modul surya dapat dilihat pada spesifikasi modul surya.

3. Toleransi Pabrik

Untuk mengetahui besar nilai toleransi pabrik terhadap daya output pada modul surya dapat dilihat pada spesifikasi modul surya.

4. Losses pada SCC

Untuk mengetahui besar nilai *losses* pada SCC didapatkan dari selisih nilai efisiensi SCC.

5. Faktor Temperatur Baterai

Untuk mengetahui besar nilai faktor temperatur baterai terdapat pada spesifikasi modul surya dan AS/NZS 4509.2:2010.

6. Losses pada inverter

Untuk mengetahui besar nilai *losses* pada inverter didapatkan dari selisih nilai efisiensi inverter tersebut.

7. Shading

Dengan melakukan perancangan kontruksi penyangga PV *Array* atau *Mounting system* maka pengaruh *shading* dapat diatasi.

Drop Tegangan

Berdasarkan AS/NZS 4509.2:2010, nilai drop tegangan pada PLTS Terpusat *Off-Grid System* yaitu sebesar 2%.

2.7.4.2 Produksi Energi PLTS Terpusat *Off-Grid System*

Salah satu yang mempengaruhi kualitas atau kehandalan PLTS Terpusat *Off-Grid System* yaitu besar nilai produksi energi listrik yang dihasilkan dari sistem. Untuk menghitung nilai produksi energi listrik PLTS Terpusat *Off-Grid System* di tahun pertama diperoleh dari persamaan berikut :

$$\text{Produksi Energi} = \text{Radiasi} \times \text{Jumlah hari pada setiap bulan} \times P_{\text{Array}} (\text{Total}) \times \text{Efisiensi} \quad (2.26)$$

Persamaan tersebut juga dapat menghitung total nilai produksi energi listrik PLTS Terpusat *Off-Grid System* selama umur proyek dengan mengganti jumlah hari selama umur proyek (GSES, 2013).

2.7.4.3 Rasio Performa (*Performance Ratio*)

Kualitas PLTS Terpusat *Off-Grid System* dapat ditentukan dari rasio performa. Rasio performa dapat menunjukkan total rugi pada PLTS Terpusat *Off-Grid System* saat mengkonversi listrik DC menjadi keluaran listrik AC (Setiawan dkk, 2014). Rasio performa PLTS Terpusat *Off-Grid System* dalam penelitian ini didapatkan dengan menggunakan persamaan dibawah ini.

$$\text{Rasio performa} = \frac{\text{Total produksi energi listrik bersih}}{\text{Produksi energi listrik tanpa losses}} \dots\dots\dots(2.27)$$

2.7.4.4 Faktor kapasitas (*Capacity Faktor*)

Faktor kapasitas atau *Capacity Faktor* PLTS Terpusat *Off-Grid System* merupakan rasio dari keluaran energi aktual dalam periode satu tahun dengan keluaran jika beroperasi pada daya nominal selama 24 jam sehari selama setahun penuh (Setiawan dkk, 2014). *Capacity Faktor* PLTS Terpusat *Off-Grid System* dalam penelitian ini didapatkan dengan menggunakan persamaan dibawah ini.

$$\text{Capacity factor} = \frac{\text{Total produksi energi listrik}}{8760} \dots\dots\dots(2.28)$$

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



2.8 Aspek Ekonomi

2.8.1 Perhitungan Biaya

Pada bagian ini menggambarkan metodologi untuk mengestimasi biaya-biaya yang mungkin timbul dari pembangunan PLTS Terpusat *Off-Grid System* adalah sebagai berikut:

2.8.1.1 Biaya Investasi Awal

Nilai investasi awal pada penelitian ini meliputi seluruh biaya modal komponen yang diperlukan untuk pembangunan PLTS Terpusat *Off-Grid System*.

2.8.1.2 Biaya Investasi Penggantian Komponen

Biaya investasi penggantian komponen pada PLTS Terpusat *Off-Grid System* meliputi biaya penggantian komponen sesuai periode dari spesifikasi.

2.8.1.3 Biaya Investasi Lahan

Biaya investasi untuk lahan diperuntukkan bagi kegiatan penyiapan lahan tempat pemasangan PV *Array*. Besarnya biaya investasi untuk penggunaan lahan, ditentukan dari luas area yang diperlukan untuk tempat pemasangan PV *Array* dan harga lahan berdasarkan harga yang berlaku di daerah tersebut. Perhitungan biaya investasi untuk penggunaan lahan dapat diketahui dengan menggunakan persamaan (Nafis, 2015):

$$\text{Total luas modul surya} = \text{luas 1 unit modul surya} \times \text{jumlah modul surya}$$

$$\text{Biaya investasi penggunaan lahan} = \text{Total luas panel surya} \times \text{harga /m}^2 \dots\dots(2.29)$$

2.8.1.4 Biaya Operasional dan Pemeliharaan (O&M)

Biaya operasional dan pemeliharaan (O&M) pertahun untuk PLTS umumnya diperhitungkan sebesar 1-2% dari total biaya investasi awal (Lazou, 2000). Adapun besar biaya pemeliharaan dan operasional per tahun untuk PLTS yang akan dikembangkan adalah sebagai berikut.

$$M = 1\% \times \text{Total biaya instalasi} \dots\dots\dots(2.30)$$

2.8.1.5 Biaya Siklus Hidup (*Life Cycle Cost*)

Biaya siklus hidup suatu sistem adalah semua biaya yang dikeluarkan oleh suatu sistem, selama kehidupannya. Pada sistem PLTS, biaya siklus hidup (LCC) ditentukan oleh nilai sekarang atau *Present Value* (PV) dan biaya total sistem PLTS yang terdiri dan biaya

investasi awal, lahan, penggantian komponen, operasional dan pemeliharaan (Foster dkk., 2010). Biaya siklus hidup (LCC) diperhitungkan dengan rumus sebagai berikut:

$$LCC = C + M_{PW} + R_{PW} \dots\dots\dots(2.31)$$

Keterangan :

LCC = Life Cycle Cost

C = Penjumlahan dari biaya investasi awal dan investasi lahan

M_{PW} = Biaya nilai sekarang untuk total biaya pemeliharaan dan operasional selama n tahun atau selama umur proyek.

R_{PW} = Biaya nilai sekarang untuk biaya penggantian yang harus dikeluarkan selama umur proyek.

Nilai sekarang (PV) biaya O&M tahunan yang akan dikeluarkan beberapa waktu mendatang (selama umur proyek) dengan jumlah pengeluaran yang tetap. Dihitung dengan rumus sebagai berikut (Halim, 2009):

$$M_{pw} = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \dots\dots\dots(2.32)$$

Keterangan :

A = Biaya O&M tahunan

i = Tingkat diskonto (%)

n = Umur proyek

Sedangkan untuk menghitung nilai sekarang (PV) dari biaya penggantian komponen untuk beberapa waktu mendatang (selama umur proyek) digunakan rumus di bawah ini namun, sebelum itu nilai diskonto untuk beberapa waktu mendatang atau *Present Worth function* (PWF) harus diketahui.

$$PWF = \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right]$$

$$R_{pw} = B \times PWF \dots\dots\dots(2.33)$$

Keterangan :

B = Biaya penggantian komponen

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

© Hak cipta milik UIN Suska Riau
 State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau



2.8.2 Analisa Biaya

Biaya energi merupakan perbandingan antara biaya total per tahun dan sistem dengan energi yang dihasilkan selama periode yang sama. Dilihat dari sisi ekonomi, biaya energi PLTS berbeda dan biaya energi untuk pembangkit konvensional (Nafeh, 2009). Hal ini karena biaya energi PLTS, dipengaruhi oleh biaya-biaya seperti:

1. Biaya awal (biaya modal) yang tinggi.
2. Tidak ada biaya untuk bahan bakar.
3. Biaya pemeliharaan dan operasional rendah.
4. Biaya penggantian rendah.

Perhitungan biaya energi listrik atau *Cost Of Energy* (COE) suatu PLTS ditentukan oleh biaya siklus hidup (LCC), faktor pemulihan modal atau *Capital Recovery Factor* (CRF) dan produksi energi tahunan PLTS. Faktor pemulihan modal adalah faktor yang digunakan untuk mengkonversikan semua arus kas biaya siklus hidup (LCC) menjadi serangkaian pembayaran atau biaya tahunan dengan jumlah yang sama (Santiari, 2011). Faktor pemulihan modal diperhitungkan dengan rumus sebagai berikut:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \dots\dots\dots(2.34)$$

Keterangan :

- CRF = Faktor diskonto
- I = Tingkat diskonto (%)
- N = Periode dalam tahun

Biaya produksi energi listrik pada PLTS dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$COE = \frac{LCC \times CRF}{Produksi\ Energi} \dots\dots\dots(2.35)$$

Keterangan :

- COE = Biaya energi listrik (Rp/kWh)
- CRF = Faktor Pemulihan modal

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

2.9 Aspek Lingkungan

Dengan menggunakan PLTS yang merupakan salah satu pembangkit yang ramah terhadap lingkungan tanpa biaya bahan bakar sehingga dapat mengurangi dampak yang timbul dari gas buang karbon dioksida (CO₂) ke udara akibat pengurangan pemakaian pembangkit listrik berbahan bakar fosil (Indralaksono, 2009).

Berdasarkan data Perusahaan Listrik Nasional (PLN) tentang pembauran energi tahun 2008 diketahui bahwa rata-rata faktor emisi CO₂ pembangkit berbahan bakar fosil adalah 0,743 ton CO₂/MWh atau 0,743 kg CO₂/kWh, artinya untuk menghasilkan energi listrik 1 kWh melalui pembangkit berbahan bakar fosil dihasilkan emisi CO₂ sebesar 0,743 kg (Indralaksono, 2009).

Pada penelitian ini diusulkan penggunaan PLTS untuk menggantikan peran dari pembangkit listrik berbahan bakar fosil dalam menyuplai beban listrik agar dapat mengurangi emisi gas CO₂.

$$eCO_2 = \text{Produksi energi} \times ef \dots\dots\dots(2.36)$$

Keterangan:

- eCO_2 = Emisi CO₂ (tCO₂)
- $A kWh$ = Produksi energi listrik pertahun (MWh)
- ef = *emission factor* (0.743 kg CO₂/kWh)

Berikut ini merupakan salah satu jenis pembangkit listrik berbahan bakar fosil yaitu:

1. Genset

Genset (Generator set) adalah perangkat kombinasi antara pembangkit listrik (generator) dan mesin penggerak yang digabung dalam satu set unit untuk menghasilkan tenaga listrik. Mesin penggerak pada genset umumnya merupakan mesin pembakaran internal berupa motor atau mesin diesel dengan bahan bakar solar dan mesin dengan bahan bakar bensin. Sedangkan generator adalah perangkat yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Prinsip kerja generator menggunakan prinsip percobaannya *faraday* yaitu memutar magnet dalam kumparan atau sebaliknya, ketika magnet digerakkan dalam kumparan maka akan terjadi perubahan fluks gaya magnet (perubahan arah penyebaran medan magnet) di dalam kumparan dan menembus tegak lurus terhadap kumparan sehingga menyebabkan beda potensial antara ujung-ujung kumparan yang menimbulkan

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

© Alfabeta Media Informatika, 2013
 Status: Islam UIN Suska Riau
 Status: Islam UIN Suska Riau
 Status: Islam UIN Suska Riau



listrik (Hardiansyah, 2014). Gambar 2.29 dibawah ini adalah salah satu jenis genset yang ada dipasaran.



Gambar 2.29 Genset
(Sumber: www.indonesiafirman.com, 2016)

Prinsip kerja genset adalah sebuah mesin pembakaran (mesin diesel atau mesin bensin) akan mengubah energi bahan bakar menjadi energi mekanik, kemudian energi mekanik tersebut diubah atau dikonversi oleh generator sehingga menghasilkan daya listrik. Generator memiliki dua tipe, yaitu generator AC atau yang biasa disebut alternator dan generator DC. Generator AC (alternator) adalah generator yang menghasilkan arus listrik bolak-balik (AC), sedangkan generator DC adalah generator yang menghasilkan arus listrik searah (DC). Sebenarnya generator AC memiliki sistem kerja yang sama dengan generator DC, yaitu menghasilkan listrik dan induksi elektromagnetik, selain itu baik generator AC maupun generator DC sebenarnya pada dasarnya sama-sama menghasilkan arus bolak-balik. Namun generator AC dan generator DC memiliki perbedaan pada desain konstruksinya. Generator DC menggunakan sebuah cincin belah (*split ring*) atau yang biasa disebut komutator yang bertindak sebagai penyearah (*rectifier*), sehingga arus yang dihasilkan generator DC adalah arus searah (DC). Sedangkan pada generator AC (*alternator*) menggunakan dua cincin seret (*slip ring*) untuk menghasilkan arus bolak-balik (Hardiansyah, 2014).

2.10 Regulasi

2.10.1 Kebijakan dan Pedoman Pemerintah RI Dalam Membangun PLTS Terpusat

Berdasarkan Peraturan Pemerintah ESDM No. 10 tahun 2015 tentang petunjuk teknis penggunaan dana alokasi khusus bidang energi pedesaan tahun anggaran 2015, bahwa dalam rangka mendorong pembangunan energi terbarukan di daerah dan pencapaian kebijakan energi nasional, diperlukan dukungan penyediaan energi berupa pembangunan instalasi pemanfaatan energi terbarukan yang dilaksanakan melalui kegiatan yang dibiayai dana alokasi khusus bidang energi pedesaan tahun anggaran 2015. Dana alokasi khusus

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



bidang energi pedesaan adalah dana yang bersumber dari pendapatan anggaran pendapatan dan belanja negara yang dialokasikan kepada daerah tertentu dengan tujuan untuk membantu mendanai kegiatan pembangunan energi terbarukan yang merupakan urusan pemerintahan yang menjadi kewenangan daerah dan sesuai dengan prioritas nasional. Pada peraturan pemerintah ini, pembangunan PLTS Terpusat merupakan salah satu dari arah kegiatan, sasaran dan perencanaan yang dirumuskan. Selain itu diatur juga kriteria lokasi rencana pembangunan PLTS Terpusat dan pedoman spesifikasi teknis pembangunan PLTS Terpusat *Off-Grid System* yaitu sebagai berikut:

1. Lokasi yang letaknya jauh dan jangkauan listrik PT.Perusahaan Listrik Negara (Persero) dan pemegang izin usaha penyediaan tenaga listrik lainnya.
2. PLTS Terpusat diprioritaskan untuk pelayanan listrik kepada masyarakat pengguna/penerima yang tinggal berkelompok atau jarak antara rumah satu dengan lainnya berdekatan.

2.10.2 Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah Kabupaten Rokan Hulu Tahun 2011-2016

Salah satu misi dari strategi dan arah kebijakan pembangunan daerah Kabupaten Rokan Hulu yaitu melanjutkan terwujudnya ketersediaan infrastruktur meliputi transportasi, kesehatan, pendidikan, ekonomi dan sosial. Dari misi tersebut terdapat salah satu strategi yaitu pemenuhan kebutuhan tenaga listrik untuk jangka pendek, menengah dan jangka panjang melalui rehabilitasi, *repowering* pembangkit yang ada dan pembangkit baru serta pengembangan diversifikasi energi dengan memanfaatkan sumber daya alam yang tersedia. Terdapat juga salah satu kebijakan untuk mewujudkan strategi tersebut yaitu penyediaan listrik pedesaan berupa PLTS atau pembangkit listrik tenaga air yang lebih sesuai sebagai upaya pemerataan pembangunan ke seluruh wilayah.