



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Surya

Energi Surya merupakan energi yang berupa panas dan cahaya yang dipancarkan matahari dan merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang paling penting. Indonesia, sebagai Negara tropis dengan rerata penyinaran matahari 12 jam per hari, mempunyai potensi energi surya yang luar biasa melimpah. Dalam catatan RUEN (Rencana Umum Energi Nasional), Indonesia diperkirakan memiliki potensi energi surya sebesar 207.898 MW (4,80 kWh/m²/hari), atau setara dengan 112.000 GWp.

Pada umumnya terdapat dua jenis sistem energi surya: pasif dan aktif. Sistem pasif tidak memerlukan peralatan, seperti ketika panas menumpuk di dalam mobil ketika diparkir di bawah sinar matahari. Sedangkan sistem yang aktif memerlukan beberapa cara untuk menyerap dan mengumpulkan radiasi matahari dan kemudian menyimpannya (stored). Pembangkit listrik termal tenaga surya adalah sistem aktif. Ada beberapa kesamaan dasar dari beberapa jenis pembangkit listrik tenaga surya yakni bahwa cermin memantulkan dan mengkonsentrasikan sinar matahari, dan penerima mengumpulkan energi matahari serta mengubahnya menjadi energi panas. Sebuah generator kemudian digunakan untuk menghasilkan listrik dari energi panas matahari tersebut.¹

2.2 Konversi Energi Surya

Matahari merupakan stasiun tenaga nuklir yang sangat dahsyat yang telah menciptakan dan mempertahankan kehidupan di atas bumi dari awal kehidupan ini. Tenaga surya hadir dalam bentuk panas dan cahaya.

Energi dalam bentuk panas bisa dipakai secara langsung maupun tidak langsung. Beberapa contoh dari pemakaian langsung adalah menghangatkan rumah, memasak dan menyediakan air panas. Sedangkan contoh Pemakaian tidak

¹ Anonim. 2016. *Sebaiknya Konsumen Tahu Tentang PLTS dan Biodiesel*. Jakarta: Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi. Hlm 28



langsung adalah pembangkit listrik tenaga surya (matahari) dan angin. Panas matahari mempengaruhi cuaca, sehingga menimbulkan angin untuk menggerakkan turbin angin dan hujan untuk menggerakkan pembangkit listrik tenaga air. Istilah lain yang digunakan untuk energi panas yang berasal dari matahari adalah Energi Thermal Matahari. Cahaya merupakan bentuk lain dari energi yang terpancar dari matahari. Kita semua tahu bahwa tanpa cahaya matahari bumi kita gelap. Kita menggunakan cahaya matahari untuk menjalankan kegiatan kita sehari-hari: ini merupakan pemakaian langsung atas cahaya yang berasal dari matahari. Ada hal yang menarik, cahaya juga bisa dikonversi menjadi tenaga listrik dengan menggunakan sel fotovoltaik.

Apabila suatu bahan semikonduktor seperti misalnya bahan silikon diletakkan dibawah penyinaran matahari, maka bahan silikon tersebut akan melepaskan sejumlah kecil listrik yang biasa disebut efek fotolistrik. Yang dimaksud efek fotolistrik adalah pelepasan elektron dari permukaan metal yang disebabkan penumbukan cahaya. Efek ini merupakan proses dasar fisis dari fotovoltaik merubah energi cahaya menjadi listrik.

Cahaya matahari terdiri dari partikel-partikel yang disebut sebagai “photons” yang mempunyai sejumlah energi yang besarnya tergantung dari panjang gelombang pada “solar spectrum”. Pada saat photons menumbuk sel surya maka cahaya tersebut akan dipantulkan atau diserap atau mungkin hanya diteruskan. Cahaya yang diserap membangkitkan listrik.⁸

2.3 Solar Cell³

Sel surya (solar cell) atau yang disebut juga (photovoltaic) adalah bahan semikonduktor yang apabila terpapar sinar matahari akan menghasilkan listrik, Photovoltaics atau Solar PV mengkonversi langsung cahaya matahari menjadi arus listrik. Bahan-bahan tertentu, seperti silikon, secara alami melepaskan

⁸ Rahmawati, Yuni, dan Sujito. 2019. Teknik Pembangkit Tenaga Listrik. Malang. Hlm 7-8

³ Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi. 2017. *Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS Off-Grid*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, Jakarta. Hlm 107

elektron ketika mereka terkena cahaya, dan elektron ini kemudian dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan arus listrik.

2.3.1 Struktur Sel Surya²

Sel surya dan juga bagian – bagiannya secara umum terdiri dari :

1. Substrat/Metal backing

Substrat adalah material yang menopang seluruh komponen sel surya. Material substrat juga harus mempunyai konduktifitas listrik yang baik karena juga berfungsi sebagai kontak terminal positif sel surya, sehingga umumnya digunakan material metal atau logam seperti aluminium atau molybdenum. Untuk sel surya dye-sensitized (DSSC) dan sel surya organik, substrat juga berfungsi sebagai tempat masuknya cahaya sehingga material yang digunakan yaitu material yang konduktif tapi juga transparan seperti indium tin oxide (ITO) dan flourine doped tin oxide (FTO).

2. Material semikonduktor

Material semikonduktor merupakan bagian inti dari sel surya yang biasanya mempunyai tebal sampai beberapa ratus mikrometer untuk sel surya generasi pertama (silikon), dan 1-3 mikrometer untuk sel surya lapisan tipis. Material semikonduktor inilah yang berfungsi menyerap cahaya dari sinar matahari. Untuk kasus gambar diatas, semikonduktor yang digunakan adalah material silikon, yang umum diaplikasikan di industri elektronik. Sedangkan untuk sel surya lapisan tipis, material semikonduktor yang umum digunakan dan telah masuk pasaran yaitu contohnya material Cu(In,Ga)(S,Se)_2 (CIGS), CdTe (kadmium telluride), dan amorphous silikon, disamping material-material semikonduktor potensial lain yang dalam sedang dalam penelitian intensif seperti $\text{Cu}_2\text{ZnSn(S,Se)}_4$ (CZTS) dan Cu_2O (copper

² Aryza dkk. (2017). *Implementasi Energi Surya Sebagai Sumber Suplai Alat Pengereng Pupuk Petani Portabel*. *IT Journal Research and Development*, 2(1), 12-18. Hlm 14

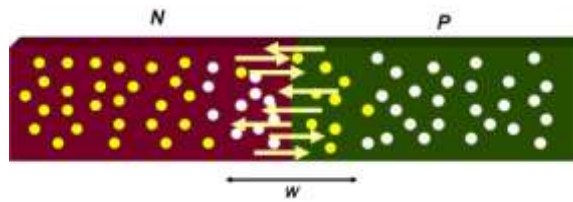
oxide). Bagian semikonduktor tersebut terdiri dari junction atau gabungan dari dua material semikonduktor yaitu semikonduktor tipe-p (material-material yang disebutkan diatas) dan tipe-n (silikon tipe-n, CdS,dll) yang membentuk p-n junction. P-n junction ini menjadi kunci dari prinsip kerja sel surya.

2.4 Prinsip Kerja Sel Surya

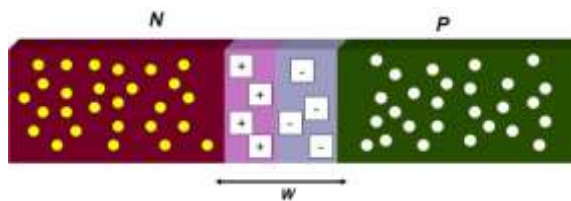
Sel surya konvensional bekerja menggunakan prinsip p-n junction, yaitu junction antara semikonduktor tipe-p dan tipe-n. Semikonduktor ini terdiri dari ikatan-ikatan atom yang dimana terdapat elektron sebagai penyusun dasar. Semikonduktor tipe-n mempunyai kelebihan elektron (muatan negatif) sedangkan semikonduktor tipe-p mempunyai kelebihan hole (muatan positif) dalam struktur atomnya. Kondisi kelebihan elektron dan hole tersebut bisa terjadi dengan mendoping material dengan atom dopant. Sebagai contoh untuk mendapatkan material silikon tipe-p, silikon didoping oleh atom boron, sedangkan untuk mendapatkan material silikon tipe-n, silikon didoping oleh atom fosfor.

Peran dari p-n junction ini adalah untuk membentuk medan listrik sehingga elektron (dan hole) bisa diekstrak oleh material kontak untuk menghasilkan listrik. Ketika semikonduktor tipe-p dan tipe-n terkontak, maka kelebihan elektron akan bergerak dari semikonduktor tipe-n ke tipe-p sehingga membentuk kutub positif pada semikonduktor tipe-n, dan sebaliknya kutub negatif pada semikonduktor tipe-p. Akibat dari aliran elektron dan hole ini maka terbentuk medan listrik yang mana ketika cahaya matahari mengenai susunan pn junction ini maka akan mendorong elektron bergerak dari semikonduktor menuju kontak negatif, yang selanjutnya dimanfaatkan sebagai listrik, dan sebaliknya hole bergerak menuju kontak positif menunggu elektron datang, seperti ditunjukkan pada gambar 2.1 dibawah.⁸

⁸ Rahmawati, Yuni, dan Sujito. 2019. Teknik Pembangkit Tenaga Listrik. Malang. Hlm 19-20

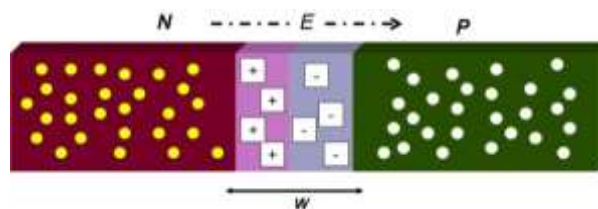


Gambar 2.1 Semikonduktor jenis p dan n disambung



Gambar 2.2 Semikonduktor jenis p dan n setelah disambung

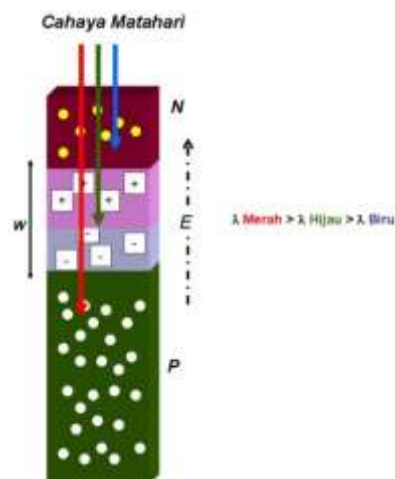
1. Daerah negatif dan positif ini disebut dengan daerah deplesi (depletion region) ditandai dengan huruf W.
2. Baik elektron maupun hole yang ada pada daerah deplesi disebut dengan pembawa muatan minoritas (minority charge carriers) karena keberadaannya di jenis semikonduktor yang berbeda.
3. Dikarenakan adanya perbedaan muatan positif dan negatif di daerah deplesi, maka timbul dengan sendirinya medan listrik internal E dari sisi positif ke sisi negatif, yang mencoba menarik kembali hole ke semikonduktor p dan elektron ke semikonduktor n. Medan listrik ini cenderung berlawanan dengan perpindahan hole maupun elektron pada awal terjadinya daerah deplesi.



Gambar 2.3 Medan listrik internal E pada semikonduktor jenis p dan n

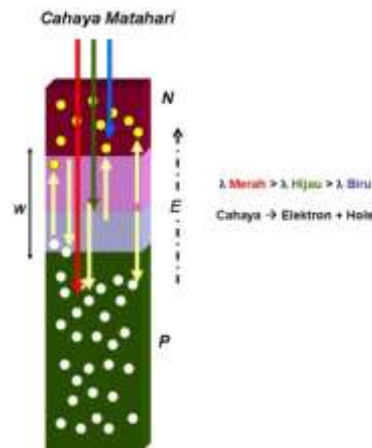
4. Adanya medan listrik mengakibatkan sambungan pn berada pada titik setimbang, yakni saat di mana jumlah hole yang berpindah dari

semikonduktor p ke n dikompensasi dengan jumlah hole yang tertarik kembali ke arah semikonduktor p akibat medan listrik E. Begitu pula dengan jumlah elektron yang berpindah dari semikonduktor n ke p, dikompensasi dengan mengalirnya kembali elektron ke semikonduktor n akibat tarikan medan listrik E. Dengan kata lain, medan listrik E mencegah seluruh elektron dan hole berpindah dari semikonduktor yang satu ke semikonduktor yang lain. Pada sambungan p-n inilah proses konversi cahaya matahari menjadi listrik terjadi. Untuk keperluan sel surya, semikonduktor n berada pada lapisan atas sambungan p yang menghadap ke arah datangnya cahaya matahari, dan dibuat jauh lebih tipis dari semikonduktor p, sehingga cahaya matahari yang jatuh ke permukaan sel surya dapat terus terserap dan masuk ke daerah deplesi dan semikonduktor p.



Gambar 2.4 Proses cahaya matahari masuk ke daerah deplesi

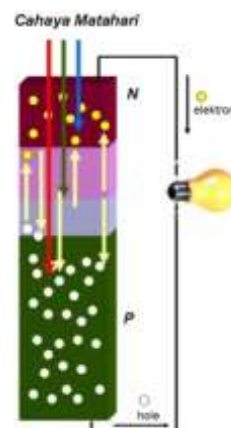
Ketika sambungan semikonduktor ini terkena cahaya matahari, maka elektron mendapat energi dari cahaya matahari untuk melepaskan dirinya dari semikonduktor n, daerah deplesi maupun semikonduktor p. Terlepasnya elektron ini meninggalkan hole pada daerah yang ditinggalkan oleh elektron yang disebut dengan fotogenerasi elektron-hole (electron-hole photogeneration) yakni, terbentuknya pasangan elektron dan hole akibat cahaya matahari.



Gambar 2.5 Terbentuknya pasangan elektron dan hole akibat cahaya matahari

Cahaya matahari dengan panjang gelombang (dilambangkan dengan simbol λ sbgm di gambar atas) yang berbeda, membuat fotogenerasi pada sambungan pn berada pada bagian sambungan pn yang berbeda pula.

Spektrum merah dari cahaya matahari yang memiliki panjang gelombang lebih panjang, mampu menembus daerah deplesi hingga terserap di semikonduktor p yang akhirnya menghasilkan proses fotogenerasi di sana. Spektrum biru dengan panjang gelombang yang jauh lebih pendek hanya terserap di daerah semikonduktor n.



Gambar 2.6 Arus listrik ini timbul akibat pergerakan elektron

Selanjutnya, dikarenakan pada sambungan pn terdapat medan listrik E, elektron hasil fotogenerasi tertarik ke arah semikonduktor n, begitu pula dengan

hole yang tertarik ke arah semikonduktor p. Apabila rangkaian kabel dihubungkan ke dua bagian semikonduktor, maka elektron akan mengalir melalui kabel. Jika sebuah lampu kecil dihubungkan ke kabel, lampu tersebut menyala dikarenakan mendapat arus listrik, dimana arus listrik ini timbul akibat pergerakan elektron.⁴

2.5 Modul Surya

Modul surya adalah sekelompok sel surya yang dirangkai dan dihubungkan secara seri maupun paralel. Modul surya dikemas dalam sebuah laminasi pelindung terhadap lingkungan. Daya modul surya dalam besaran satuan wattpeak yang dikombinasikan jumlah sel surya terpasang pada modul surya tersebut. Pada umumnya modul surya mampu bertahan 20 hingga 25 tahun, khususnya untuk modul monosingle crystalline. Sel-sel silikon itu sendiri tidak mengalami kerusakan atau degradasi bahkan setelah puluhan tahun pemakaian. Namun demikian, output modul akan mengalami penurunan dengan berjalannya waktu. Degradasi ini diakibatkan oleh dua faktor utama yaitu rusaknya lapisan atas sel Ethylene Vinyl Acetate (EVA) dan lapisan bawah (Polyvinyl Fluoride Film) secara perlahan-lahan, serta kerusakan secara alami EVA yang terjadi secara bertahap di antara lapisan gelas dan sel-sel itu sendiri. Seperti ditunjukkan pada gambar 2.7 mengenai modul surya.



Gambar 2.7 Modul Surya

⁴ Furqani, Dian, dan Mangapul Juara. (2019). *Pengaturan Tegangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) 1000 Watt*. *Jurnal Kajian Teknik Elektro*, 1(1), 79-95. Hlm 83-85

2.6 Panel Surya

Panel surya Merupakan komponen utama yang harus ada dalam sistem pembangkit listrik surya. Panel surya terdiri dari sebuah modul yang di dalamnya terangkai sel surya (sel-sel fotovoltaik) secara serie dan parallel, dimana efek fotovoltaik terjadi. Panel surya terdiri dari beberapa kelompok modul surya yang disusun diatas struktur penyangga akan membentuk bangunan blok – blok dalam satu string dan sebagai dasar pembentukan PV Array. Pada PLTS terpusat pemeliharaan rangkaian panel surya adalah pada pengkabelan antara satu modul dengan modul lainnya. Pemeriksaan berkala pengkabelan terhadap kemungkinan lepas atau kendor sangat diperlukan untuk menjaga aliran listrik tetap masuk. Pada PLTS solar home system (SHS) pemeliharaan modul sama dengan pemeliharaan pada PLTS terpusat, rangkaian modul surya agar tetap dapat berfungsi adalah menjaga rangkaian seri sel surya (string) dalam modul tidak terputus, karena apabila string dalam modul ini terputus maka arus listrik tidak dapat mengalir.³

2.7 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Off-Grid*

Berdasarkan SNI 04-6267.601-2002, Pembangkitan Tenaga Listrik adalah suatu proses, energi listriknya diperoleh dari suatu energi bentuk lain. Berdasarkan SNI 8395:2017, Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah sistem pembangkit listrik yang energinya bersumber dari radiasi matahari melalui konversi sel fotovoltaik. Sistem fotovoltaik mengubah radiasi sinar matahari menjadi listrik. Semakin tinggi intensitas radiasi (iradiasi) matahari yang mengenai sel fotovoltaik, semakin tinggi daya listrik yang dihasilkannya. Karena listrik seringkali dibutuhkan sepanjang hari, maka kelebihan daya listrik yang dihasilkan pada siang hari disimpan di dalam baterai sehingga dapat digunakan kapanpun untuk berbagai alat listrik.

³ Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi. 2017. *Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS Off-Grid*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, Jakarta. Hlm 107-108

PLTS dapat diaplikasikan melalui berbagai bentuk instalasi, dengan konfigurasi sistem terpusat ataupun tersebar, dimana masing-masing aplikasi tersebut dapat bersifat on-grid maupun off-grid. Perbedaan kedua sistem tersebut adalah sebagai berikut :

Tabel 2.1 Perbedaan kedua jenis PLTS

	PLTS off-grid	PLTS on-grid
Deskripsi	Sistem PLTS yang output daya listriknya secara mandiri menyuplai listrik ke jaringan distribusi pelanggan atau tidak terhubung dengan jaringan listrik PLN.	Bisa beroperasi tanpa baterai, karena output listriknya disalurkan ke jaringan distribusi yang telah disuplai pembangkit lainnya (mis. Jaringan PLN).
Baterai	Ya, supaya bisa memberikan suplai listrik sesuai kebutuhan beban	Tidak
Manfaat	Untuk menjangkau daerah yang belum ada jaringan listrik PLN.	Untuk berbagi beban atau mengurangi beban pembangkit lain yang terhubung pada jaringan yang sama.
PLTS terpusat	PLTS yang memiliki sistem jaringan distribusi untuk menyalurkan daya listrik ke beberapa rumah pelanggan. Keuntungan dari PLTS terpusat adalah penyaluran daya listrik dapat disesuaikan dengan kebutuhan beban yang berbeda-beda di setiap rumah pelanggan	
PLTS tersebar/ terdistribusi	PLTS yang tidak memiliki sistem jaringan distribusi, sehingga setiap rumah pelanggan memiliki sistem PLTS tersendiri. ⁷	

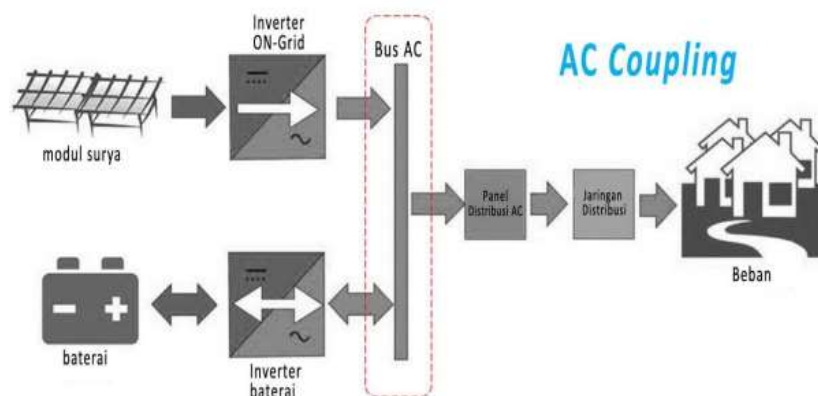
Salah satu sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid*. Suatu PLTS *off-grid* yang

⁷ Kencana, Bayuaji dkk. 2018. *Panduan Studi Kelayakan Pemabngkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terpusat*. Jakarta: Tetra Tech ES, Inc. Hlm 30-31

dikelola secara komunal atau yang sering disebut sistem PLTS berdiri sendiri (*stand-alone*), beroperasi secara independen tanpa terhubung dengan jaringan PLN. Sistem PLTS *off-grid* ini hanya mengandalkan energi matahari sebagai satu-satunya sumber energi utama dengan menggunakan rangkaian *photovoltaic module* untuk menghasilkan energi listrik sesuai kebutuhan. Sistem ini membutuhkan baterai untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan di siang hari untuk memenuhi kebutuhan listrik di malam hari.⁹

2.8 Konfigurasi PLTS (*Off-Grid*)

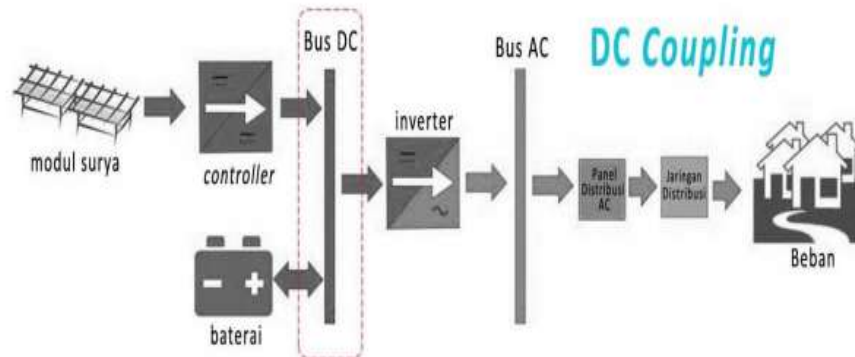
Konfigurasi kerja yang umum diimplementasikan dalam PLTS *off-grid* ada 2 (dua) sistem yaitu berbasis DC coupling dan AC coupling. Istilah coupling berdasarkan hubungan titik ke titik koneksinya. Umumnya, sistem PLTS *off-grid* terdiri dari dua bagian kelistrikan yang berbeda yaitu sisi arus bolak-balik disingkat a.b.b. (arus AC) dan sisi arus searah disingkat a.s. (arus DC). Ketika sistem PLTS *off-grid* menerapkan penggunaan fungsi cadangan baterai, ada dua titik koneksi yang dapat dibuat dari keluaran array modul surya. Array dapat terkoneksi ke sisi AC atau sisi DC dari sistem kelistrikan PLTS. Sistem AC Coupling diilustrasikan pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.8 Diagram Sistem PLTS Off-grid tipe AC Coupling

⁹ Bab 1 Ramadhani, Bagus. 2018. *Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya: Dos & Don'ts*. Jakarta : Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Hlm 3

Sedangkan, Sistem DC Coupling diilustrasikan pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.9 Diagram Sistem PLTS Off-grid tipe DC Coupling

Perbedaan DC Coupling dan AC Coupling :

2.8.1 AC Coupling

Pada sistem AC Coupling titik koneksi berada pada sisi AC. Pada jenis sistem ini, inverter grid-tied / inverter on-grid (inverter yang terhubung ke jaringan AC) bertanggungjawab dalam mengelola potensi energi yang terserap di modul surya melalui Maximum Power Point Tracking (MPPT). Keluaran dari inverter grid-tied terhubung melalui busbar ke sisi beban AC. Pada kebanyakan kasus sisi beban AC dipisah antara beban AC reguler dan beban AC kritis (beban-beban yang harus dijaga tetap menyala). Beban-beban AC kritis ini akan tetap teraliri listrik meski saat matahari tidak bersinar. Porsi sistem cadangan AC Coupling bersumber dari baterai dan inverter baterai yang mengambil alih operasi ke jaringan (grid) selama jaringan kehilangan daya. Energi yang diserap modul surya dari matahari pertama sekali dialirkan ke beban AC kritis melalui inverter gridtied baru kemudian ke baterai melalui inverter baterai (pada situasi ini, inverter baterai berfungsi sebagai charging untuk baterai).

Penting untuk diketahui bahwa inverter baterai pada aplikasi AC Coupling memiliki fungsi 2 (dua) arah sebagai berikut:

2.8.1.1 Pertama sebagai rectifier dengan melakukan charging baterai (AC ke DC).

2.8.1.2 Kedua sebagai inverter untuk baterai (DC ke AC). Hal ini menjadikan inverter baterai pada sistem AC Coupling disebut juga dengan istilah Bidirectional Inverter.

Ketika PLTS kehilangan suplai energi matahari, inverter baterai akan memutus inverter grid-tied dari sistem kelistrikan kemudian inverter baterai akan mengambil alih sinkronasi dengan menyuplai tegangan listrik AC ke utilitas. Pada situasi ini, Bidirectional Inverter menjalankan fungsi inverter untuk baterai.

2.8.2 DC Coupling

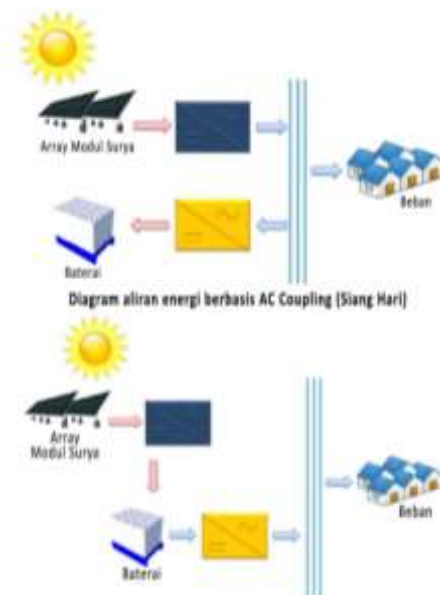
Sistem DC Coupling terkoneksi ke sisi arus searah (DC) dari sistem kelistrikan PLTS offgrid. Pada sistem ini charge controller mengatur energi matahari yang terserap oleh array modul surya melalui MPPT. Energi keluaran dari charge controller terhubung melalui busbar DC ke sistem baterai sebagai penyimpan energi. Baterai terhubung ke inverter yang bertugas mengkonversi arus searah (DC) ke arus bolak-balik (AC). Selanjutnya arus AC dialirkan dari inverter ke beban AC.

2.9 Pola Operasi PLTS (*Off-Grid*)

Terdapat 3 (tiga) pola operasi yang umum pada PLTS off-grid, yaitu:

1. Siang Hari pada saat Energi PLTS (*Off-Grid*) lebih besar dari kebutuhan beban

Besar energi yang dihasilkan oleh PLTS *off-grid* sangat tergantung kepada intensitas penyinaran matahari yang diterima oleh modul surya dan efisiensinya. Intensitas matahari maksimum mencapai 1000 Watt/m^2 , apabila efisiensi modul surya sebesar 16% maka daya ideal yang dapat dihasilkan oleh modul surya adalah sebesar 160 Watt/m^2 . Diagram aliran energi yang dihasilkan pada siang hari dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.10 Diagram Aliran Energi yang dihasilkan pada Siang Hari

Pada sistem *AC Coupling*, energi yang dihasilkan modul surya pada kondisi tersebut langsung disalurkan ke beban (konsumen) melalui inverter *grid-tied* / *inverter on-grid*, apabila beban sudah tercukupi energi berlebih yang dihasilkan modul surya digunakan untuk pengisian baterai melalui inverter baterai / *inverter bidirectional*.

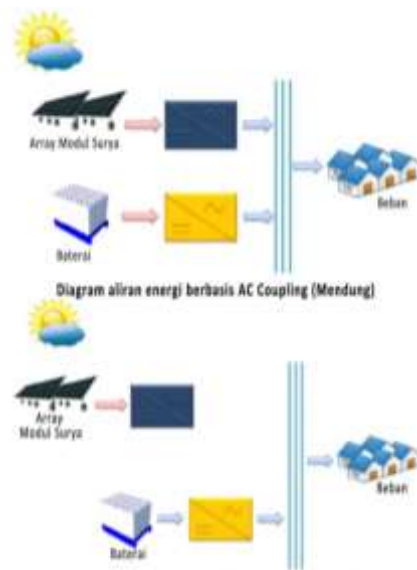
Pada sistem *DC Coupling*, energi yang dihasilkan modul surya pada kondisi tersebut digunakan untuk mengisi baterai melalui *Solar Charge Controller* (SCC) terlebih dahulu, baru kemudian disalurkan ke beban (konsumen) melalui inverter.

2. Siang Hari pada saat Energi PLTS (Off-Grid) lebih kecil dari kebutuhan beban

Kondisi ini dapat terjadi apabila :

- Saat kondisi berawan atau mendung.
- Saat sore hari menjelang matahari terbenam PLTS off-grid akan menghasilkan energi listrik dari matahari namun tidak maksimal.

Diagram aliran energi yang dihasilkan pada kondisi berawan/mendung dapat dilihat pada Gambar 2.13.

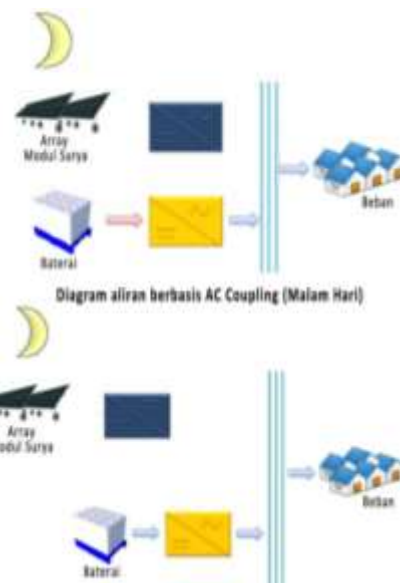


Gambar 2.11 Diagram Aliran Energi yang dihasilkan pada Kondisi Berawan

Pada sistem *AC Coupling*, energi yang dihasilkan modul surya dan energi yang tersimpan dalam baterai disalurkan secara paralel ke beban (konsumen).

Pada sistem *DC Coupling*, energi yang dihasilkan modul surya pada kondisi tersebut digunakan untuk mengisi baterai melalui *Solar Charge Controller* (SCC) terlebih dahulu, baru kemudian disalurkan ke beban (konsumen) melalui inverter.

3. Malam Hari



Gambar 2.12 Diagram Aliran Energi pada Malam Hari

Pada malam hari sumber energi matahari tidak dapat dimanfaatkan lagi, oleh karena itu beban akan disuplai oleh baterai. Energi yang tersimpan dalam baterai pada siang hari akan dipergunakan untuk menyuplai beban saat dibutuhkan melalui Inverter. Kemudian Inverter mengubah arus a.s. (DC) pada sisi baterai menjadi arus a.b.b. (AC) ke sisi beban. Diagram aliran energi pada malam hari dapat dilihat pada Gambar 2.14.³

2.10 Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan suatu kesatuan sistem yang terdiri dari beberapa komponen, baik komponen utama maupun komponen pendukung, diantaranya yaitu:

2.10.1 Solar charge controller

Solar charge controller (SCC) atau juga dikenal sebagai battery charge regulator (BCR) adalah komponen elektronik daya di PLTS untuk mengatur

³ Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi. 2017. *Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS Off-Grid*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, Jakarta. Hlm 10-14

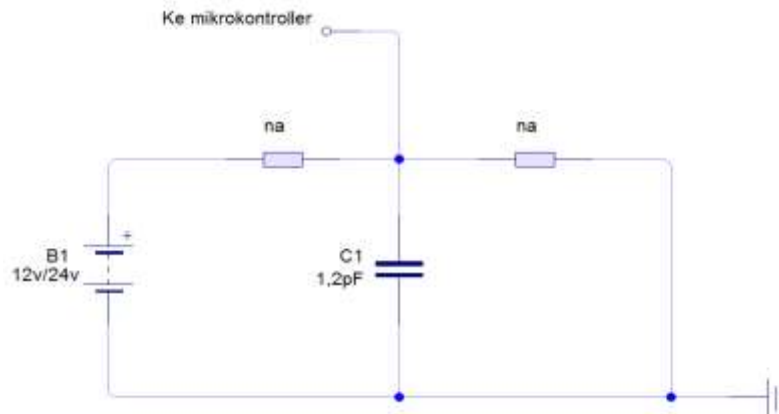
pengisian baterai dengan menggunakan modul fotovoltaik menjadi lebih optimal. Perangkat ini beroperasi dengan cara mengatur tegangan dan arus pengisian berdasarkan daya yang tersedia dari larik modul fotovoltaik dan status pengisian baterai (SoC, state of charge). Untuk mencapai arus pengisian yang lebih tinggi, beberapa SCC dapat dipasang secara paralel di bank baterai yang sama dan menggabungkan daya dari larik modul fotovoltaik.



Gambar 2.13 Solar Charge Controller (SCC)

Selain itu, SCC/SCR juga mencegah baterai agar energi listrik yang tersimpan di dalamnya tidak terkuras (discharged) sampai habis. Beberapa tipe SCC/SCR dapat secara otomatis dan terkontrol memutus tegangan suplai beban, untuk mencegah baterai dari kondisi deep discharge yang bisa memperpendek umur pakai baterai. Salah satu fitur pada SCC/SCR yang paling bermanfaat untuk charging adalah sistem MPPT (Maximum Power Point Tracker). Dengan adanya sistem ini, baterai lebih cepat terisi karena modul PV akan selalu beroperasi pada output titik daya maksimal, yang bervariasi sesuai dengan iradiasi matahari. Modul PV hanya berhenti menghasilkan daya maksimal ketika baterai sudah mendekati batas maksimum charging. Dengan menggunakan MPPT, keuntungan lainnya adalah sistem tegangan rangkaian seri modul PV tidak perlu sama dengan sistem tegangan baterai. Misal sistem tegangan baterai 24 Vdc, maka sistem tegangan modul PV bisa 36 Vdc atau lainnya. SCC/SCR dapat berupa sebuah unit alat terpisah, atau dapat pula terintegrasi dengan unit DC-AC inverter. Serta SCC/SCR berperan dalam mengukur dan memonitor tegangan, arus, dan energi

yang ditangkap dari larik modul fotovoltaik dan mengirimkannya ke bank baterai.⁹



Gambar 2.14 Rangkaian SCC

Berbagai jenis controller mengubah suplai daya ke baterai selama proses pengisian. Tahapan pengisian umum yang terjadi adalah *bulk charge*, *absorption charge*, *float charge*, dan *equalization charge*. Dengan penjelasan lebih dalam adalah sebagai berikut:

1. *Bulk charge*. Selama tahap pengisian yang berlangsung hingga +80% kondisi pengisian daya, semua daya dari modul surya disuplai langsung ke baterai.
2. *Absorption charge*. Muatan secara bertahap dikurangi (diserap) hingga baterai mencapai tingkat pengisian 100%.
3. *Float Charge*. Ketika kondisi baterai sudah penuh, tahap 'float' tercapai dan hanya cukup daya yang disuplai untuk mempertahankan muatan penuh baterai.
4. *Equalization charge*. Tahap ini hanya digunakan oleh beberapa jenis controller (umumnya ≥ 1 bulan). Pengisian singkat dengan daya tinggi

⁹ Ramadhani, Bagus. 2018. *Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya: Dos & Don'ts*. Jakarta : Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Hlm 2 Bab 4

yang bertujuan untuk mengurangi stratifikasi asam, sulfasi baterai, dan bertujuan untuk menyamakan tegangan di seluruh sel baterai.⁶

2.10.1.1 Alat Pengatur Baterai PV ARRAY

Photovoltaic array adalah solar modul dihubungkan secara seri untuk mendapatkan tegangan dan paralel untuk mendapatkan arus di Solar Charge Control. Susunan solar modul akan membentuk suatu array modul, untuk meningkatkan tegangan dan keluaran arus pada baterai dengan total daya yang tersedia. Biasanya tegangan baterai bank 48 Volt atau 120 Volt DC. Solar Charge kontrol photovoltaic array harus dipasang berdekatan dengan baterai yang ditempatkan tidak terkena sinar matahari secara langsung dan tidak terkena air hujan. Walaupun suatu photovoltaic array menghasilkan daya ketika memosisikan ke cahaya matahari, maka sejumlah komponen lain yang diperlukan dengan baik akan melakukan, kontrol, mengkonversi, mendistribusikan, dan menyimpan energi yang diproduksi oleh photovoltaic array tersebut. Beberapa pengontrol charge mempunyai metering dan datalogging kemampuan untuk menunjukkan [beban/ tugas] pengontrol adalah suatu pengatur tegangan elektronik, menggunakan di dalam parameter pengoperasian sistem off – Grid dan sistem Grid – tie dan status baterai charge. Beberapa mempunyai beban baterei rendah disconnect untuk mencegah over discharge.³

2.10.2 Inverter

Inverter jaringan atau dikenal juga sebagai inverter PV atau grid inverter adalah komponen elektronik daya yang mengonversi tegangan DC dari larik modul fotovoltaik menjadi tegangan AC baik untuk pemakaian langsung atau untuk menyimpan kelebihan daya ke dalam baterai. Serupa dengan solar charge controller (SCC), perangkat ini juga dilengkapi dengan MPPT (maximum power

⁶ Iskandar, Handoko Rusiana. 2020. *Praktis Belajar Pembangkit Listrik Tenaga Surya*. Sleman: Deepublish. Hlm 125

³ Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi. 2017. *Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS Off-Grid*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, Jakarta. Hlm 126

point tracker) untuk mengoptimalkan daya yang ditangkap dari larik modul fotovoltaik.

Karena inverter ini tidak dapat beroperasi tanpa tegangan dan frekuensi jaringan, baterai harus tetap dalam kondisi operasional dan menjaga bank baterai tetap pada state of charge baterai yang ditetapkan. Pada kasus khusus dimana tersedia tegangan jaringan, inverter akan melakukan sinkronisasi dengan tegangan dan frekuensi jaringan agar dapat bergabung dengan jaringan tersebut dan mengirimkan daya yang telah dikonversi ke jaringan AC.



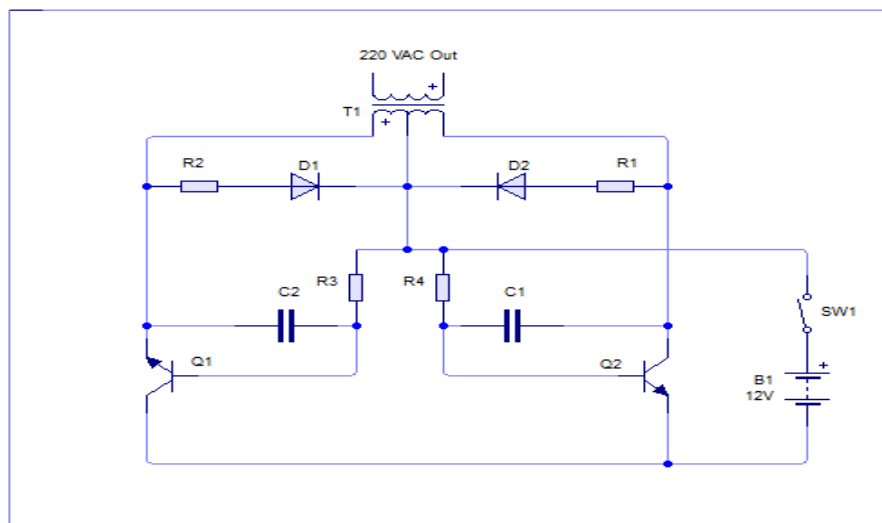
Gambar 2.15 Inverter

Pada prinsipnya, inverter jaringan dapat digunakan baik di sistem off-grid maupun on-grid. Inverter bekerja dengan cara yang sama, yaitu dengan mengikuti tegangan dan frekuensi jaringan. Dalam sistem on-grid, inverter akan terus memberikan daya selama matahari bersinar dan jaringan mampu mendistribusikan daya yang dikonversi.

Di sisi lain, jika berbicara mengenai sistem PLTS off-grid, dimana operasinya berdasarkan pada penyimpanan baterai dan beban, inverter jaringan dikendalikan oleh baterai. Baterai harus berkomunikasi dengan inverter jaringan untuk membatasi daya keluarannya jika bank baterai sudah terisi penuh dan daya yang dihasilkan modul fotovoltaik lebih tinggi dari beban. Hal ini dapat dilakukan dengan mengubah frekuensi jaringan sehingga inverter jaringan mengurangi daya keluarannya. Besarnya daya keluaran tersebut tergantung pada perubahan frekuensi dengan menggunakan kontrol droop.

Pengaturan inverter jaringan harus dikonfigurasi dengan benar ke mode off-grid. Mode off-grid akan memungkinkan inverter untuk mengatur nilai rujukan yang dikhususkan untuk aplikasi off-grid.⁹

⁹ Bab 5 Ramadhani, Bagus. 2018. *Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya: Dos & Don'ts*. Jakarta : Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).



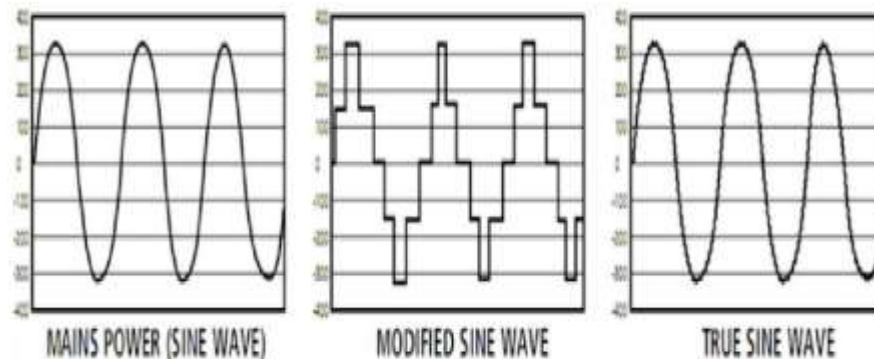
Gambar 2.16 Rangkaian Inverter

2.10.2.1 Inverter Berdasarkan Bentuk Gelombang

Berdasarkan bentuk gelombang keluaran, inverter biasanya dibagi dalam 2 (dua) golongan, meliputi :

1. 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 (pompa, kipas angin).
2. Inverter Pure/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 motor listrik. Seperti ditunjukkan pada gambar dibawah ini.³



Gambar 2.17 Bentuk Gelombang Inverter

2.10.3 Baterai

Baterai digunakan dalam sistem PLTS komunal untuk menyimpan energi yang dihasilkan oleh modul fotovoltaik di siang hari, lalu memasok ke beban di malam hari atau saat cuaca berawan. Baterai bertindak sebagai penyimpan energi sementara (buffer) untuk mengatasi perbedaan antara pasokan listrik dari modul fotovoltaik dan permintaan listrik. Saat ini, baterai merupakan cara paling praktis untuk menyimpan tenaga listrik yang dihasilkan oleh rangkaian modul fotovoltaik melalui reaksi elektrokimia. Komponen ini merupakan salah satu komponen yang penting dan sekaligus rentan dalam sistem PLTS off-grid. Desain yang kurang baik atau ukuran baterai yang tidak tepat dapat mengurangi umur pakai yang diharapkan, berkurangnya energi, kerusakan, hingga bahaya keselamatan pada pengguna. Baterai memiliki keterbatasan umur pakai yang bergantung pada perilaku penggunaan serta temperatur pengoperasian.

Baterai berfungsi sebagai suplai bagi beban dengan tegangan dan arus yang stabil melalui inverter baterai, juga dalam hal terjadi putusnya pasokan daya (intermittent) dari modul fotovoltaik, Menyediakan cadangan energi untuk digunakan di hari-hari dengan cuaca berawan atau pada kondisi darurat dan mengatasi perbedaan antara daya yang tersedia dari modul fotovoltaik dan

³ Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi. 2017. *Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS Off-Grid*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, Jakarta. Hlm 127

permintaan dari beban, serta berfungsi memasok daya ke komponen elektronika daya seperti solar charge controller dan inverter.



Gambar 2.18 Baterai

2.10.4 Panel Distribusi

Panel distribusi DC atau dikenal juga dengan DC power distribution board (DCPDB) adalah tempat terhubungnya solar charge controller (SCC), bank baterai, dan inverter baterai. Panel ini mendistribusikan daya DC yang dikonversi dari solar charge controller ke bank baterai dan dari bank baterai ke inverter baterai yang umumnya pada tegangan sistem 48 VDC. Panel distribusi DC pada umumnya terdiri dari busbar sebagai titik sambungan dan perangkat proteksi untuk melindungi bank baterai serta melindungi kabel dari SCC dan ke inverter baterai.



Gambar 2.19 Panel Distribusi

2.10.5 Automatic Transfer Switch (ATS)

Saklar pemindah secara otomatis (automatic transfer switch) di saat inverter baterai terhubung ke sumber daya lain seperti jaringan listrik eksternal atau pembangkit listrik eksternal. Jaringan listrik eksternal atau pembangkit listrik eksternal dapat digunakan sebagai cadangan ketika kondisi penyimpanan daya baterai sedang rendah.⁹



Gambar 2.20 Automatic Transfer Switch (ATS)

2.10.6 Kabel

Kabel merupakan komponen penghantar yang terisolasi yang berfungsi untuk menghubungkan antara komponen satu dengan yang lainnya pada sebuah rangkaian kelistrikan pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).³



Gambar 2.21 Kabel

⁹ Ramadhani, Bagus. 2018. *Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya: Dos & Don'ts*. Jakarta : Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Bab 6, Bab 7, Bab 8 Hlm 2

³ Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi. 2017. *Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS Off-Grid*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, Jakarta. Hlm 19

2.11 Arus dan Tegangan¹¹

Arus dan Tegangan Atom adalah partikel terkecil penyusun materi, atom terdiri dari partikel-partikel sub-atom yang tersusun atas elektron, proton, dan neutron dalam berbagai gabungan. Elektron adalah muatan listrik negatif (-) yang paling mendasar. Elektron dalam cangkang terluar suatu atom disebut elektron valensi.

Apabila energi eksternal seperti energi kalor, cahaya, atau listrik diberikan pada materi, elektron valensinya akan memperoleh energi dan dapat berpindah ke tingkat energi yang lebih tinggi. Jika energi yang diberikan telah cukup, sebagian dari elektron-elektron valensi terluar tadi akan meninggalkan atomnya dan statusnya pun berubah menjadi elektron bebas. Gerakan elektron-elektron bebas inilah yang akan menjadi arus listrik dalam konduktor logam. Gerak atau aliran elektron disebut arus (I), dengan satuan ampere. Sebagian atom kehilangan elektron dan sebagian atom lainnya memperoleh elektron. Keadaan ini akan memungkinkan terjadinya perpindahan elektron dari satu objek ke objek lain. Apabila perpindahan ini terjadi, distribusi muatan positif dan negatif dalam setiap objek tidak sama lagi. Objek dengan jumlah elektron yang berlebih akan memiliki polaritas listrik negatif (-). Objek yang kekurangan elektron akan memiliki polaritas listrik Pengaruh Perubahan Intensitas Matahari Terhadap Daya Keluaran Panel Surya positif (+). Besaran muatan listrik ditentukan oleh jumlah elektron dibandingkan dengan jumlah proton dalam suatu objek. Simbol untuk besaran muatan elektron ialah Q dan satuannya adalah coulomb. Besarnya muatan $1\text{ C} = 6,25 \times 10^{18}$ elektron. Kemampuan muatan listrik untuk mengerahkan suatu gaya dimungkinkan oleh keberadaan medan elektrostatis yang mengelilingi objek yang bermuatan tersebut. Suatu muatan listrik memiliki kemampuan untuk melakukan kerja akibat tarikan atau tolakan yang disebabkan oleh gaya medan elektrostatisnya.

¹¹ Yuliananda, Subekti, Gede Surya, dan RA Retno Hastijanti. 2015. *Pengaruh Perubahan Intensitas Matahari Terhadap Daya Keluaran Panel Surya*. *Jurnal Pengabdian LPPM Untag Surabaya*. 1(2) : 193-202. Hlm 195-196



Kemampuan melakukan kerja ini disebut potensial. Apabila satu muatan berbeda dari muatan lainnya, di antara kedua muatan ini pasti terdapat beda potensial. Satuan dasar beda potensial adalah volt (V). karena satuan inilah beda potensial V sering disebut sebagai voltage atau tegangan. Daya listrik yang dihasilkan oleh sel surya merupakan hasil perkalian dari tegangan keluaran dengan banyaknya elektron yang mengalir atau besarnya arus, hubungan tersebut ditunjukkan pada persamaan 2.1, sedangkan nilai rerata daya yang dihasilkan selama titik pengujian ditunjukkan pada persamaan 2.2.

$$P = V \times I \dots\dots\dots(2.1)$$

dengan:

P = Daya keluaran (Watt)

V = Tegangan keluaran (Volt)

I = Arus (Ampere)

$$P_{rata-rata} = \frac{p_1+p_2+\dots+p_n}{N} \dots\dots\dots(2.2)$$

dengan :

$P_{rata-rata}$ = Daya rata rata (Watt)

P_1 = Daya pada titik pengujian ke satu

P_2 = Daya pada titik pengujian ke dua

P_n = Daya pada titik pengujian ke n

2.12 Efisiensi Solar Charge Controller¹⁰

Efisiensi solar charge controller dapat dinyatakan sebagai perbandingan antara daya yang masuk ke solar charge controller dengan daya yang digunakan untuk pengisian baterai samapi ke inverter, sehingga dapat dirumuskan :

¹⁰ Suprianto, dan Muhammad Fadlan Siregar. (2020). *Analisis Efisiensi pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya. Journal of Electrical and System Control Engineering*, 4(1), 1-10. Hlm 6



$$\eta_{mppt} = P_{out} : P_{in} \times 100\% \dots \dots \dots (2.3)$$

Daya SCC dapat diketahui dari hasil penjumlahan daya input ke baterai dan daya input ke inverter yang berasal dari suply solar charge controller.

$$P_{out.SCC} = P_{in} \text{ Bat} + P_{in} \text{ Inv} \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana η_{mppt} adalah efisiensi solar charge controller, P_{out} merupakan daya keluaran dari solar charge controller yang digunakan untuk pengisian baterai dan P_{in} adalah daya masukan solar charge controller dalam hal ini PV out.

Untuk nilai efisiensi rata-rata dinyatakan dengan penjumlahan efisiensi keseluruhan dibagi jumlah total, sehingga dapat dirumuskan :

$$\bar{\eta} = \frac{(\eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_n)}{N} \dots \dots \dots (2.5)$$

2.13 Efisiensi Inverter⁵

Efisiensi inverter dapat dinyatakan sebagai perbandingan antara daya keluaran inverter dan daya masukan inverter. Daya masukan inverter berupa daya DC sedangkan daya keluarannya adalah daya AC. Efisiensi inverter dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\eta_{inv} = P_{out} : P_{in} \times 100\% \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana η_{inv} adalah efisiensi inverter, P_{out} adalah daya keluaran (AC) dan P_{in} adalah daya masukan (DC). P_{in} didapatkan dari daya yang berasal dari baterai yaitu daya DC yang masuk ke inverter yang pada saat itu digunakan untuk menghidupkan beban. Sedangkan P_{out} didapatkan dari daya yang digunakan oleh beban agar dapat bekerja.

⁵ Grahadiasto, Antonius Satya, Mujiman, dan Gatot Santoso. 2016. *Implementasi Automatic Transfer Switch PLN-PLTS serta Analisis Kemampuan Maksimal dalam Membackup Beban. Jurnal Elektrikal*. 3(1) : 50-58. Hlm 53