



BAB II

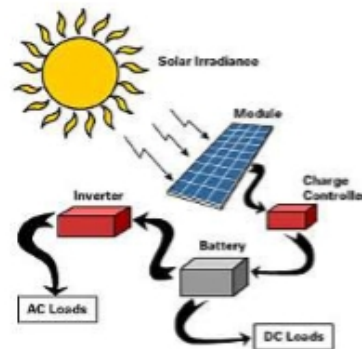
TINJAUAN PUSTAKA

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

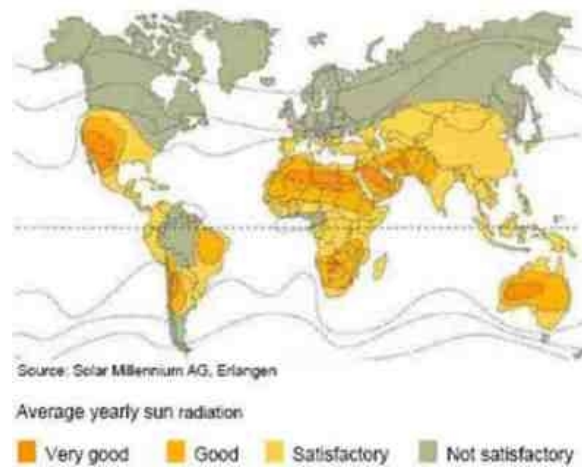
¹ Anonim. 2016. *Sebaiknya Konsumen Tahu Tentang PLTS dan Biodiesel*. Jakarta: Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi. Hlm 29



Gambar 2.1. Cara Kerja Energi Surya

2.1.1 Perkembangan Energi Surya

Perkembangan Energi Surya di Indonesia Pemanfaatan energi matahari sebagai sumber energi alternatif untuk mengatasi krisis energi, khususnya minyak bumi, yang terjadi sejak tahun 1970-an mendapat perhatian yang cukup besar dari banyak negara di dunia. Di samping jumlahnya yang tidak terbatas, pemanfaatannya juga tidak menimbulkan polusi yang dapat merusak lingkungan. Cahaya atau sinar matahari dapat dikonversi menjadi listrik dengan menggunakan teknologi sel surya atau fotovoltaik. Potensi energi surya di Indonesia sangat besar yakni sekitar 4.8 KWh/m² atau setara dengan 112.000 GWp, namun yang sudah dimanfaatkan baru sekitar 10 MWp. Saat ini pemerintah telah mengeluarkan roadmap pemanfaatan energi surya yang menargetkan kapasitas PLTS terpasang hingga tahun 2025 adalah sebesar 0.87 GW atau sekitar 50 MWp/tahun. Jumlah ini merupakan gambaran potensi pasar yang cukup besar dalam pengembangan energi surya di masa datang. Komponen utama sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dengan menggunakan teknologi fotovoltaik adalah sel surya.



Gambar 2.2. Penyebaran Sinar Matahari di Dunia

(Sumber : <https://teknologisurya.wordpress.com/tag/energi-surya/> diakses tanggal 10 juli 2021)

Gambar di atas menunjukkan potensi tenaga surya dunia. Potensi tenaga surya Indonesia secara umum berada pada tingkat satisfy (cukup) yang dapat kita jadikan sebagai salah satu patokan untuk menyusun perencanaan pembangunan sumber energi PLTS pada masa depan. Menuju pada tingkat kemampuan yang baik dalam hal supply tenaga listrik yang bersumberkan dari energi surya, kita memerlukan teknologi konversi tenaga surya menjadi tenaga listrik, bukanlah teknologi sederhana. Teknologi ini memerlukan berbagai mesin, sistem, komponen yang harus dihitung cermat dan baik agar sesuai dengan kondisi alam Indonesia. Saat ini pengembangan PLTS di Indonesia telah mempunyai basis yang cukup kuat dari aspek kebijakan. Namun pada tahap implementasi, potensi yang ada belum dimanfaatkan secara optimal. Secara teknologi, Industri Photovoltaic (PV) di Indonesia baru mampu melakukan pada tahap hilir, yaitu memproduksi modul surya dan mengintegrasikannya menjadi PLTS, sementara sel suryanya masih impor. Padahal sel surya adalah komponen utama dan yang paling mahal dalam sistem PLTS. Harga yang masih tinggi menjadi isu penting dalam perkembangan industri sel surya. Berbagai teknologi pembuatan sel surya



terus diteliti dan dikembangkan dalam rangka upaya penurunan harga produksi sel surya agar mampu bersaing dengan sumber energi lain. Mengingat ratio elektrifikasi di Indonesia baru mencapai 55-60 % dan hampir seluruh daerah yang belum dialiri listrik adalah daerah pedesaan yang jauh dari pusat pembangkit listrik, maka PLTS yang dapat dibangun hampir di semua lokasi merupakan alternatif sangat tepat untuk dikembangkan. Dalam kurun waktu tahun 2005-2025, pemerintah telah merencanakan menyediakan 1 juta Solar Home System berkapasitas 50 Wp untuk masyarakat berpendapatan rendah serta 346,5 MWp PLTS hibrid untuk daerah terpencil. Hingga tahun 2025 pemerintah merencanakan akan ada sekitar 0,87 GW kapasitas PLTS terpasang. Dengan asumsi penguasaan pasar hingga 50%, pasar energi surya di Indonesia sudah cukup besar untuk menyerap keluaran dari suatu pabrik sel surya berkapasitas hingga 25 MWp per tahun. Hal ini tentu merupakan peluang besar bagi industri lokal untuk mengembangkan bisnisnya ke pabrikan sel surya.²

2.2 Solar Cell

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 elektron ketika mereka terkena cahaya, dan elektron ini kemudian dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan arus listrik³.

2.2.1 Struktur Sel Surya

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

1. Substrat/Metal backing

² <https://teknologisurya.wordpress.com/tag/energi-surya/>

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

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 fluorine doped tin oxide (FTO).

2. Material semikonduktor

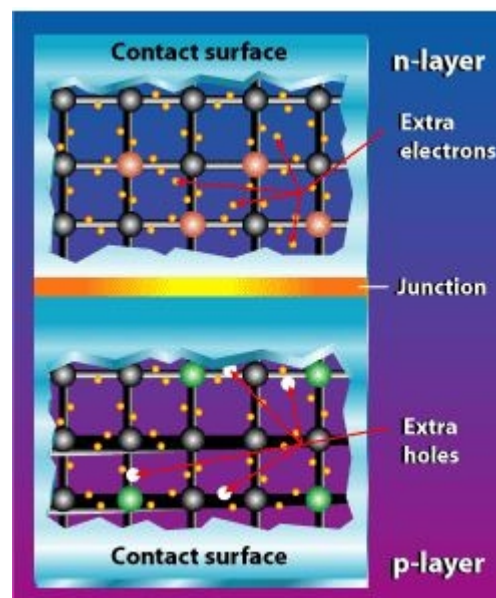
Material semikonduktor merupakan bagian inti dari sel surya yang biasanya mempunyai tebal sampai beberapa ratus mikrometer untuk sel surya generasi pertama (silikon), dan 1-3 mikrometer untuk sel surya lapisan tipis. Material semikonduktor inilah yang berfungsi menyerap cahaya dari sinar matahari. Untuk 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 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.⁴

2.3 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

⁴ 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

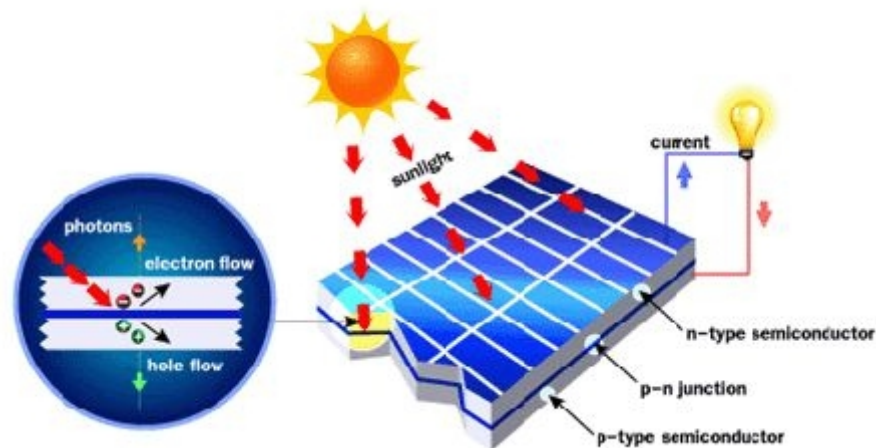
dari ikatan-ikatan atom yang dimana terdapat elektron sebagai penyusun dasar. Semikonduktor tipe-n mempunyai kelebihan elektron (muatan negatif) sedangkan semikonduktor tipe-p mempunyai kelebihan hole (muatan positif) dalam struktur atomnya. Kondisi kelebihan elektron dan hole tersebut bisa terjadi dengan 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. Ilustrasi dibawah menggambarkan junction semikonduktor tipe-p dan tipe-n.



Gambar 2.3 Junction antara semikonduktor tipe-p (kelebihan hole) dan tipe-n (kelebihan elektron). (Sumber : eere.energy.gov)

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 susuna p-n 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 diilustrasikan pada gambar dibawah.⁵



Gambar 2.4 Ilustrasi cara kerja sel surya dengan prinsip p-n junction.

(Sumber : sun-nrg.org)

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

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah suatu pembangkit listrik yang menggunakan sinar matahari melalui sel surya (*photovoltaic*) untuk mengkonversikan radiasi sinar foton matahari menjadi energi listrik. Sel surya merupakan lapisan-lapisan tipis dari bahan semikonduktor silikon (Si) murni, dan bahan semikonduktor lainnya. PLTS memanfaatkan cahaya matahari untuk menghasilkan listrik DC, yang dapat diubah menjadi listrik AC apabila diperlukan, oleh karena itu meskipun cuaca mendung, selama masih terdapat cahaya, maka PLTS tetap dapat menghasilkan listrik.

Salah satu sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid*. Suatu PLTS *off-grid* yang dikelola secara komunal atau yang sering disebut sistem PLTS berdiri sendiri

⁵ <https://teknologisurya.wordpress.com/dasar-teknologi-sel-surya/prinsip-kerja-sel-surya/>

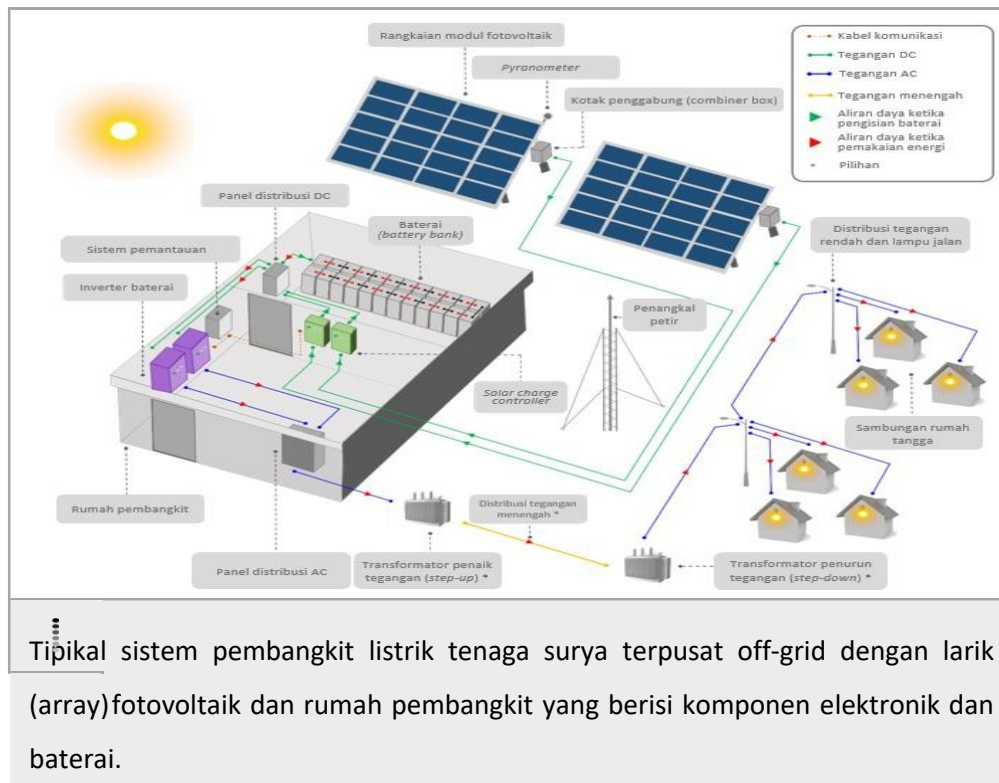
Diakses Tanggal 22 Juli 2021 Pukul 15.10

(*stand-alone*), beroperasi secara independen tanpa terhubung dengan jaringan PLN.⁵ 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.

Stand-alone PV system atau Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Terpusat (PLTS Terpusat) merupakan sistem pembangkit listrik alternatif untuk daerah-daerah terpencil/pedesaan yang tidak terjangkau oleh jaringan PLN.⁶ Suatu PLTS *off-grid* yang dikelola secara komunal atau yang sering disebut sistem PLTS berdiri sendiri (*stand-alone*), beroperasi secara independen tanpa terhubung dengan jaringan PLN. Sistem ini membutuhkan baterai untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan di siang hari untuk memenuhi kebutuhan listrik di malam hari. Ada dua konfigurasi sistem PLTS *off-grid* yang umum digunakan yang akan dijelaskan dalam bab ini, yaitu sistem penyambungan AC atau *AC-coupling* dan penyambungan DC atau *DC-coupling*.

Secara singkat, DC adalah singkatan untuk *direct current* (arus searah), sementara AC adalah singkatan untuk *alternating current* (arus bolak-balik). Penyambungan (*coupling*) mengacu pada titik penyambungan di dalam sistem. Sistem *DC-coupling* menghubungkan rangkaian modul fotovoltaik ke sisi DC sistem PLTS melalui *solar charge controller*. Sementara itu, sistem *AC-coupling* menghubungkan rangkaian modul surya dan baterai ke sisi AC melalui inverter jaringan dan inverter baterai. Jika ada kelebihan daya yang tidak digunakan oleh beban, maka kelebihan daya akan dikonversi kembali ke DC oleh inverter baterai dan energi akan disimpan dalam baterai. Gambar di bawah mengilustrasikan contoh sistem PLTS dalam konfigurasi *DC-coupling*.

⁶ 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. 193 Hal



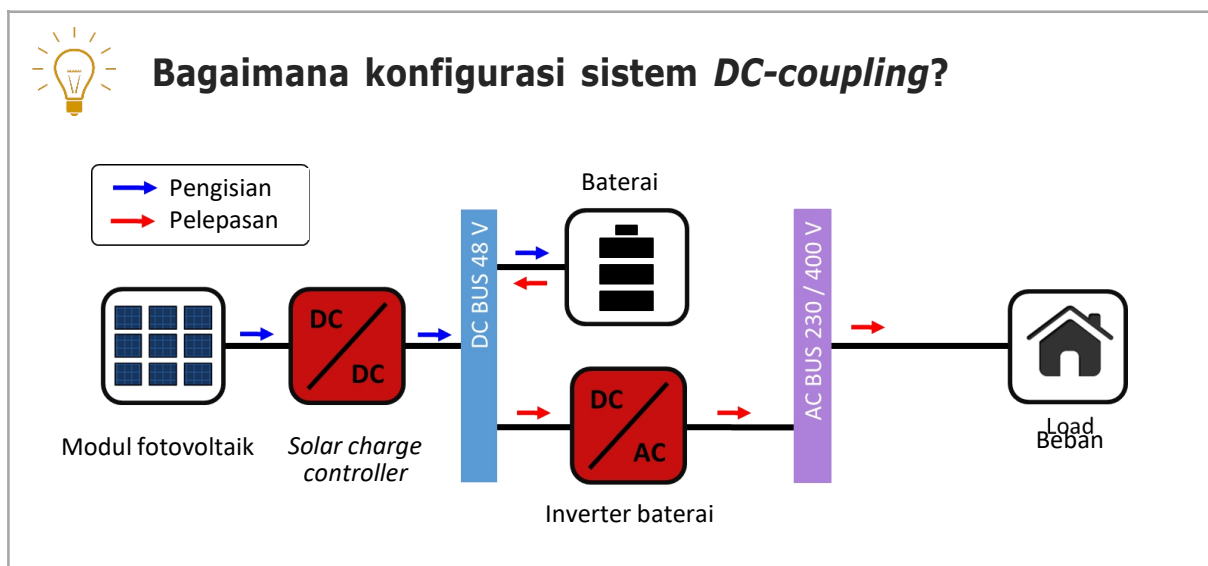
Gambar 2.5 Gambar Ilustrasi PLTS dalam Sistem DC-Coupling

Secara umum, kedua konfigurasi tersebut menggunakan komponen yang sama kecuali untuk solar charge controller (SCC), komponen yang dipasang di sisi setelah kotak penggabung (combiner box). Penggunaan SCC di dalam sistem DC-coupling diganti dengan inverter jaringan di dalam sistem AC-coupling.

2.5 Sistem DC-Coupling

Sistem dianggap memiliki konfigurasi penyambungan sistem DC (*DC-coupling*) jika komponen utamanya terhubung di bus DC. Daya listrik dibangkitkan oleh modul fotovoltaik dan digunakan untuk mengisi baterai melalui solar charge controller. SCC adalah pengonversi DC-DC untuk menurunkan tegangan modul fotovoltaik ke level tegangan baterai yang juga dilengkapi dengan *maximum power point tracker* (MPPT) untuk mengoptimalkan penangkapan energi.

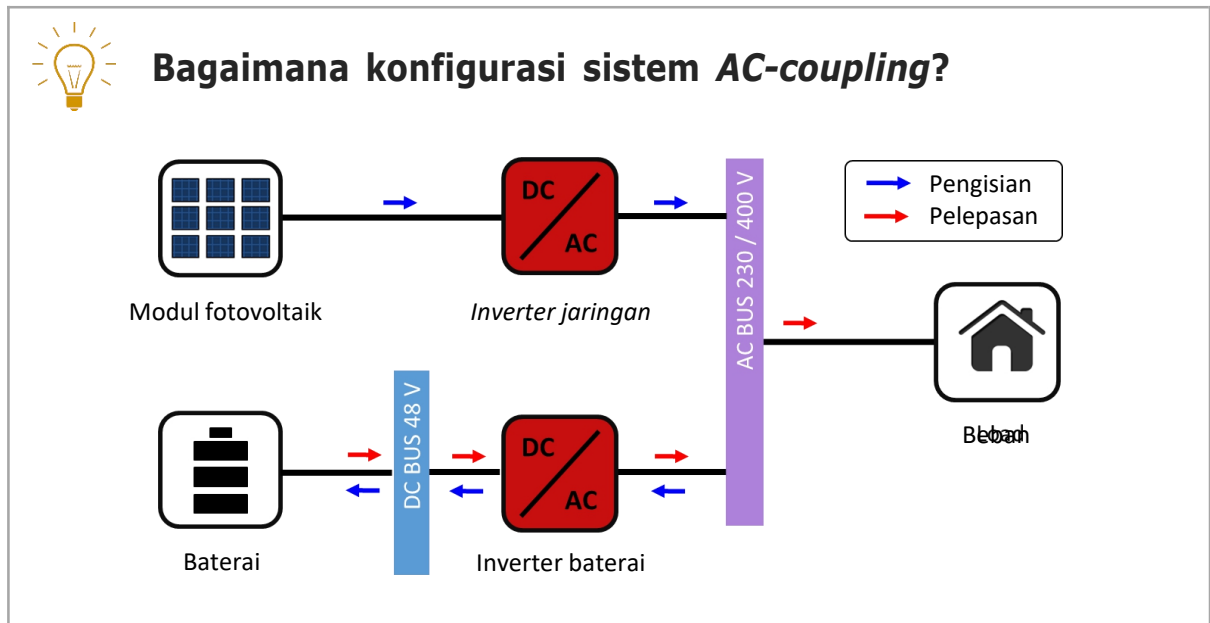
Di siang hari, dengan radiasi sinar matahari yang cukup, baterai diisi untuk mencapai kondisi pengisian (SoC, *state of charge*) yang maksimal. Seiring dengan meningkatnya permintaan listrik hingga beban melebihi daya larik fotovoltaik yang terhubung, inverter baterai akan menyalurkan energi dari baterai ke beban dan akan berhenti beroperasi ketika SoC baterai mencapai batas minimum.



Gambar 2.6 Konfigurasi sistem DC-coupling

2.6 Sistem AC-Coupling

Komponen utama yang membedakan sistem *AC-coupling* dengan *DC-coupling* adalah inverter jaringan. Dalam konfigurasi *AC-coupling*, modul fotovoltaik dan baterai dihubungkan di bus AC melalui inverter jaringan dan inverter baterai. Modul fotovoltaik terhubung ke inverter jaringan dimana tegangan diubah dari DC ke AC. Serupa dengan *charge controller*, inverter jaringan juga dilengkapi dengan perangkat MPPT untuk mengoptimalkan penangkapan energi. Daya dari rangkaian modul fotovoltaik dapat langsung digunakan oleh beban di siang hari dan kelebihanannya digunakan untuk mengisi baterai melalui inverter baterai pada saat yang sama.



Gambar 2.7 Konfigurasi sistem AC-coupling

Berbeda dengan sistem *DC-coupling*, inverter baterai dalam sistem *AC-coupling* bekerja secara dua arah (*bidirectional*). Alat ini berfungsi sebagai pengatur pengisian baterai (*charger*) ketika radiasi sinar matahari cukup, beban terpenuhi, dan baterai belum terisi penuh (SoC rendah). Ketika beban melampaui jumlah daya masukan modul fotovoltaik, biasanya pada malam hari atau saat hari sedang berawan, maka inverter baterai akan beralih menjadi inverter mengubah arus DC-AC sehingga energi dari baterai dapat digunakan untuk memenuhi permintaan beban.

Sistem konversi di sistem *AC-coupling* bekerja dalam dua cara. Hal ini menyebabkan rugi-rugi konversi yang lebih besar dibandingkan sistem *DC-coupling*. Namun demikian, sistem *AC-coupling* lebih menguntungkan jika kemungkinan beban pada siang hari lebih besar karena dalam hal ini kerugian konversi hanya akan terjadi di inverter jaringan. Disisi lain, konfigurasi AC memberi lebih banyak fleksibilitas untuk dengan mudah diperluas dengan tambahan rangkaian modul fotovoltaik atau dijalankan secara hibrida bersama dengan pembangkit listrik lainnya.

Mirip dengan sistem *DC-coupling*, inverter baterai harus bekerja secara paralel untuk mencapai keluaran daya yang lebih besar. Karena inverter baterai adalah “otak” pembentukan jaringan distribusi di dalam PLTS *off-grid*, harus ada setidaknya satu inverter yang bertindak sebagai “*master*” yang menyediakan referensi tegangan dan frekuensi, sementara inverter baterai sisanya bertindak sebagai “*slave*” yang bergabung di dalam jaringan. Konfigurasi inverter baterai dan pembuatan jaringan (*grid forming*) akan dijelaskan lebih detail pada bab inverter baterai.⁷

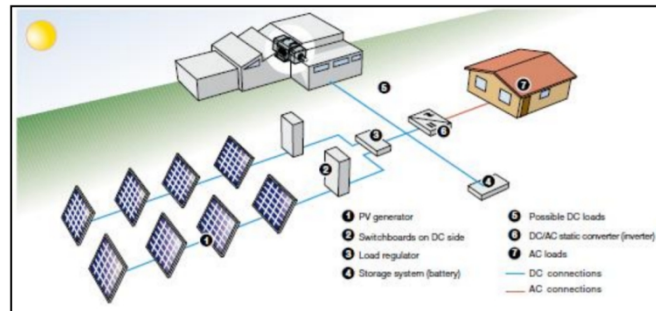
2.7 Prinsip Kerja PLTS (*Off-Grid*)

Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Off-Grid* dapat diuraikan sebagai berikut :

a. Pada PLTS sistem terpusat ini, sumber energi listrik yang dihasilkan oleh modul surya (PV) pada siang hari akan disimpan dalam baterai. Proses pengisian energi listrik dari PV ke baterai diatur oleh *Solar Charge Controller* agar tidak terjadi *over charge*. Besar energi yang dihasilkan oleh PV sangat tergantung kepada intensitas penyinaran matahari yang diterima oleh PV dan efisiensi *cell*. Intensitas matahari maksimum mencapai 1000 W/m² , dengan efisiensi *cell* 14% maka daya yang dapat dihasilkan oleh PV adalah sebesar 140 W/m² .

b. Selanjutnya energi yang tersimpan dalam baterai digunakan untuk menyuplai beban melalui inverter saat dibutuhkan. Inverter mengubah tegangan DC pada sisi baterai menjadi tegangan AC pada sisi beban.

⁷ ing. Bagus Ramadhani, M.Sc. (2018) Buku Instalasi Listrik Tenaga Surya Dos & Don'ts Hlm. 1-8



Gambar 2.8 Prinsip Kerja PLTS (*Off-Grid*)

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.

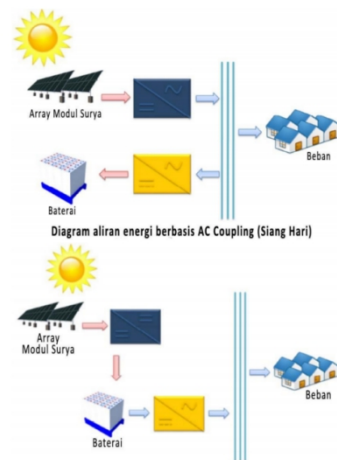
2.9 Pola Operasi PLTS (*Off-Grid*)⁸

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

a. 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/m², apabila efisiensi modul surya sebesar 16% maka daya ideal yang dapat dihasilkan oleh modul surya adalah sebesar 160 Watt/m².

⁸ (Buku Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS Off-Grid Halaman 10)



Gambar 2.9 Diagram Aliran Energi yang dihasilkan pada Siang Hari

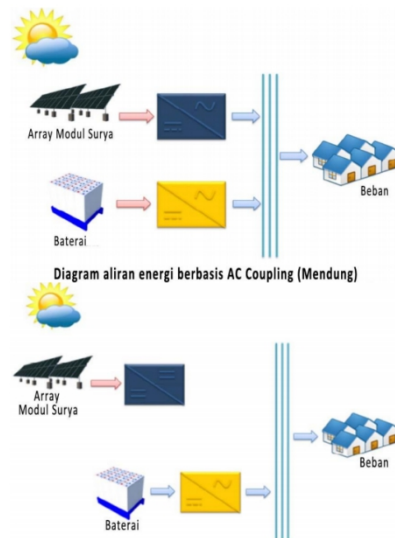
Pada sistem *AC Coupling*, energi yang dihasilkan modul surya pada kondisi tersebut langsung disalurkan ke beban (konsumen) melalui inverter *grid-tied / inverter on-grid*, apabila beban sudah tercukupi energi berlebih yang dihasilkan modul surya digunakan untuk pengisian baterai melalui inverter baterai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

b. 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.



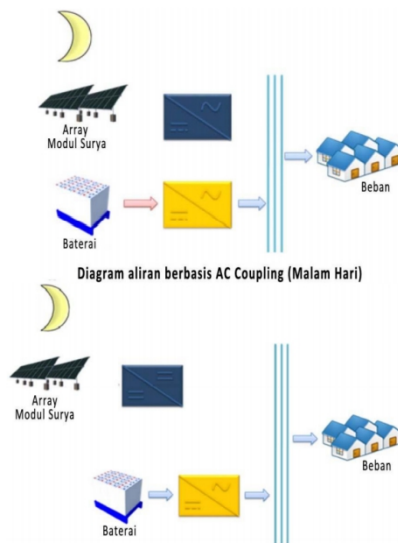
Gambar 2.10 Diagram Aliran Energi yang dihasilkan pada Kondisi Berawan/Mendung

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.

c. 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 1.4.



Gambar 2.11 Diagram Aliran Energi pada Malam Hari

2.10 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. Modul tipe ini dirancang untuk masa operasi 30 tahun pada saat perancangan dengan acuan kondisi laboratorium pengujian. 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 Vynil 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 X. mengenai modul surya.⁹



Gambar 2. 12 Modul Surya

2.11 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 kendur 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

⁹ Buku Buku Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS Off-Grid hal 107



modul ini terputus maka arus listrik tidak dapat mengalir. Pemeliharaan rangkaian modul juga ada pada junction box (kotak penghubung) dibagian bawah modul surya, didalam kotak penghubung terdapat terminal positif dan negatif untuk menyalurkan arus listrik ke beban, seperti pada gambar X. Hubungan antara Solar Cell, Modul, dan panel.¹⁰

2.12 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:

a. Penyangga dan Sistem Pelacak (*Mounting and Tracking Systems*)

Modul surya harus terpasang pada suatu struktur/kerangka, untuk menjaganya tetap terarah pada arah yang tepat, agar lebih tersusun rapi dan terlindungi. Struktur pemasangan modul surya bisa pada struktur yang tetap (*fixed*) atau dengan sistem pelacak sinar matahari, atau biasanya disebut *tracking systems*.

b. Inverter

Inverter merupakan suatu alat yang berfungsi untuk mengubah arus DC menjadi arus AC. Pada PLTS, inverter berfungsi sebagai pengkondisi tenaga listrik (power condition) dan sistem kontrol yang merubah arus listrik searah (DC) yang dihasilkan oleh solar modul menjadi listrik arus bolak-balik (AC), yang nantinya akan mengontrol kualitas daya listrik yang dikeluarkan untuk dikirim ke beban atau jaringan listrik. Terdapat dua macam sistem inverter pada PLTS yaitu:

- Inverter 1 fasa untuk sistem PLTS yang bebannya kecil.

¹⁰ Buku Buku Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS Off-Grid hal 108

- Inverter 3 fasa untuk sistem PLTS yang besar dan terhubung dengan jaringan PLN.



Gambar 2.13 Inverter

c. Solar Charge Controller (SCC)

Solar Charge Charge Controller adalah komponen di dalam sistem PLTS yang berfungsi sebagai pengatur arus listrik (*current regulator*) baik terhadap arus yang masuk dari panel PV maupun arus beban keluar/digunakan. Berfungsi untuk menjaga baterai dari pengisian yang berlebihan (*over charge*), dan mengatur tegangan serta arus dari panel surya ke baterai.



Gambar 2.14 Solar Charge Controller (SCC)

d. Baterai

Baterai merupakan salah satu komponen yang digunakan pada sistem PLTS yang dilengkapi dengan penyimpanan cadangan energi listrik. Baterai memiliki fungsi untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya dalam bentuk energi arus DC. Energi yang disimpan pada baterai berfungsi sebagai cadangan (*back up*), yang biasanya digunakan pada saat panel surya tidak menghasilkan energi listrik, contohnya pada saat malam

hari atau pada saat cuaca mendung, selain itu tegangan keluaran ke sistem cenderung lebih stabil.

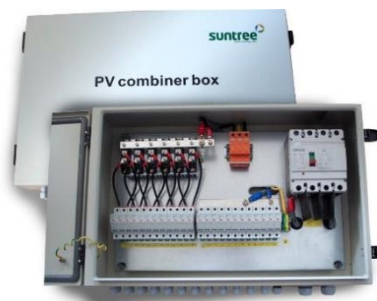


Gambar 2.15 Baterai

e. *Combiner Box*

Combiner Box berfungsi sebagai Panel listrik arus searah (DC) yang menggabungkan keluaran dari beberapa string modul surya menjadi satu.

Berfungsi juga sebagai panel isolasi dan proteksi terhadap arus/tegangan lebih dan petir.



Gambar 2.16 *Combiner Box*

f. *Sistem Monitoring*

Sistem Monitoring Mencatat, merekam, menampilkan dan memonitor data-data parameter serta informasi sistem PLTS.

Sistem monitoring dapat diakses dari jarak jauh melalui jaringan data yang ada. Alat ini lebih sering dikenal sebagai *Remote Monitoring System* (RMS).



Gambar 2.17 Sistem Monitoring

g. Panel Distribusi AC

Panel distribusi tegangan rendah 3 Phasa arus bolak-balik (AC) yang berfungsi menyalurkan daya dari pembangkit ke beban. Panel ini umumnya terdiri dari beberapa *output feeder*.



Gambar 2.18 Panel Distribusi AC

h. NODEMCU ESP32

NODEMCU adalah sebuah platform IoT yang bersifat *opensource*. Terdiri dari perangkat keras berupa *system on chip* ESP32, juga *firmware* yang menggunakan bahasa pemrograman *scripting* Lua. Istilah NODEMCU secara *default* sebenarnya mengacu pada *firmware* yang digunakan daripada perangkat keras *development kit*.



Gambar 2.19 NODEMCU ESP32

i. *Automatic Transfer Switch (ATS)*

Secara umum fungsi dari ATS adalah untuk menghubungkan beban dengan dua sumber tenaga (sumber utama & sumber cadangan) atau lebih yang terpisah yang bertujuan untuk menjaga ketersediaan dan keandalan aliran daya menuju beban. Secara sederhana fungsi ATS adalah untuk melakukan transfer daya secara otomatis ke beban, dari sebuah sumber utama (jaringan listrik) ke sumber cadangan ketika terjadi gangguan pada sumber utama. Secara luas ATS telah diaplikasikan di industri maupun perkantoran yang membutuhkan sistem kelistrikan dengan tingkat keandalan yang tinggi



Gambar 2.20 *Automatic Transfer Switch (ATS)*

j. 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). Kabel tersebut mempunyai berbagai macam ukuran penampang seperti 0,7 mm, 1 mm, 2 mm, 2,5 mm, 4 mm, 6 mm, dan lain-lain.



Gambar 2.21 Kabel

2.13. Rugi- Rugi Konduktor (Drop Tegangan)

2.13.1 Perhitungan Voltage Drop (Tegangan Jatuh) Pada Kabel -

Pada kabel konduktor pasti memiliki nilai impedansi dan sehingga setiap kali arus mengalir melalui kabel tersebut, akan ada jatuh tegangan disepanjang kabel, yang dapat diturunkan dengan Hukum Ohm (yaitu $V = IZ$). Penurunan tegangan tersebut tergantung pada dua hal, yaitu :

1. Aliran arus melalui kabel - semakin tinggi arus, semakin besar tegangan drop.
2. Impedansi konduktor - semakin besar impedansi, semakin besar tegangan drop.

2.13.2 Impedansi kabel

Impedansi kabel merupakan fungsi dari ukuran kabel (luas penampang) dan panjang kabel. Umumnya produsen kabel akan melampirkan data kabel



yang diproduksinya seperti nilai resistansi kabel dan reaktansi kabel dalam satuan Ω / km .

2.13.3 Menghitung Jatuh Tegangan (Voltage Drop)

Untuk sistem suplay tegangan AC , metode menghitung jatuh tegangan (voltage drop) adalah dengan berdasarkan faktor beban dengan mempertimbangkan arus beban penuh pada suatu sistim. Tetapi jika beban memiliki arus startup tinggi (misalnya motor) , maka tegangan drop dihitung dengan berdasarkan pada arus start up motor tersebut serta faktor daya .

- Untuk sistem tiga phasa :

$$V_3 = \sqrt{3} I (R_c \cos \phi + X_c \sin \phi) L / 1000$$

Dimana :

V_3 , Tegangan Jatuh (Voltage Drop) Tiga Phasa

I , adalah arus beban penuh atau arus nominal atau arus saat start (A)

R_c , adalah resistansi ac kabel (Ω / km)

X_c , adalah reaktansi ac kabel (Ω / km)

$\cos \phi$, adalah faktor daya beban (pu)

L , adalah panjang kabel (m)

- Untuk sistem fase tunggal :

$$V_1 = 2 I (R_c \cos \phi + X_c \sin \phi) L / 1000$$



Dimana :

V_I , Tegangan Jatuh (Voltage Drop) Satu Phasa

I , adalah arus beban penuh atau arus nominal atau arus saat start (A)

R_c , adalah resistansi ac kabel (Ω / km)

X_c , adalah reaktansi ac kabel (Ω / km)

Cos , adalah faktor daya beban (pu)

L , adalah panjang kabel (m)

- Untuk sistem DC :

$$V_{dc} = [2 I R_c L] / 1000$$

Dimana :

V_{dc} , Tegangan Jatuh (Voltage Drop) Tegangan DC

I , adalah arus beban penuh atau arus nominal atau arus saat start (A)

R_c , adalah resistansi dc kabel (Ω / km)

L , adalah panjang kabel (m)



2.13.4 Tegangan Jatuh (Voltage Drop) Maksimum

Tegangan Jatuh (Voltage Drop) Maksimum merupakan drop tegangan tertinggi yang diperbolehkan timbul sepanjang kabel yang dialiri oleh arus listrik. Bila drop tegangan yang timbul melebihi batas maksimum, maka ukuran kabel yang lebih besar harus dipilih.

Tegangan Jatuh (Voltage Drop) disepanjang kabel lebih ditentukan karena beban konsumen (misalnya peralatan) sehingga tegangan yang sampai diinput peralatan tidak melebihi batas toleransi. Ini berarti, jika tegangan pada alat tersebut lebih rendah dari tegangan minimum, maka alat tidak dapat beroperasi dengan benar.

Secara umum, sebagian besar peralatan listrik akan beroperasi normal pada tegangan serendah 80 % dari tegangan nominal. Sebagai contoh, jika tegangan nominal adalah 230VAC, maka sebagian besar peralatan dapat dijalankan pada > 184VAC. Pemilihan ukuran untuk kabel penghantar yang baik adalah ukuran yang hanya mengalami drop tegangan sebesar kisaran 5 - 10% pada beban penuh.¹¹

¹¹ <https://direktorilistrik.blogspot.com/2013/10/perhitungan-voltage-drop-tegangan-jatuh-pada-kabel.html> diakses pada tanggal 23 juli 2021 pukul 14.50



Area in "Sq. mm"	Conductor construction No. Wire/ "mm"	Conductor Dia.in "mm"	Max. DC Resistance "Ω/Km"at 20°C
0.50	16/0.20	0.94	39.0
0.75	24/0.20	1.20	26.0
1.00	32/0.20	1.34	19.5
1.50	*30/0.20	1.64	13.3
2.50	**50/0.25	2.08	7.98
4.00	56/0.30	2.61	4.95
6.00	84/0.30	3.50	3.300
10.0	140/0.30	4.60	1.910
16.0	101/0.45	6.00	1.210
25.0	158/0.45	7.60	0.078
35.0	220/0.45	8.78	0.554

Gambar 2.22 Gambar Nilai Resistansi DC Kabel