

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Listrik

Energi listrik adalah energi utama yang dibutuhkan bagi peralatan listrik/energi yang tersimpan dalam arus listrik dengan satuan ampere (A) dan tegangan listrik dengan satuan Volt (V) dengan ketentuan kebutuhan konsumsi daya listrik dengan satuan Watt (W) untuk menggerakkan motor, lampu penerangan, memanaskan, mendinginkan ataupun untuk menggerakkan kembali suatu peralatan mekanik untuk menghasilkan bentuk energi yang lain.

Agar peralatan listrik dan alat elektronik dapat digunakan, tentunya diperlukan energi tegangan listrik yang sesuai dengan kebutuhan alat tersebut. Karena apabila Energi listrik tidak sesuai dengan kebutuhan peralatan listrik dan alat elektronik dapat berdampak pada alat tersebut misalnya tidak dapat beroperasi, beroperasi tidak maksimal, atau bahkan alat tersebut bisa rusak. Kesesuaian energi listrik tersebut mencakup tipe tegangan atau arus yang diperlukan (AC atau DC) , besar kecilnya tegangan yang diperlukan, serta arus minimal atau terendah yang dibutuhkan.

Energi yang dihasilkan dapat berasal dari berbagai sumber, seperti air, minyak, batu bara, angin, panas bumi, nuklir, matahari, dan lainnya. Energi ini besarnya dari beberapa Joule sampai ribuan hingga jutaan Joule.

Melihat dari sumber energi listrik tersebut maka salah satu yang paling menarik untuk dikembangkan terutama di Indonesia ialah energi listrik dari matahari atau yang sering kita kenal dengan nama PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya). Hal ini dikarenakan cuaca di Indonesia ini yaitu beriklim tropis. Selain itu energi dari matahari ini juga sangat ramah lingkungan (https://id.wikipedia.org/wiki/Energi_listrik)



2.2 Energi Fosil

Sumber energi listrik adalah segala sesuatu di sekitar kita yang mampu menghasilkan listrik. Sumber energi listrik secara garis besar dapat dibedakan menjadi dua kelompok yaitu ; (1) energi fosil dan (2) energi terbarukan.

Energi fosil digunakan untuk konversi energi. Hasil konversi tersebut dapat berupa energi mekanik, listrik dan panas. Semua bahan bakar fosil yang dikonsumsi di dunia. Salah satu hasil konversi energinya adalah pembangkit tenaga listrik. Listrik adalah salah satu bentuk energi yang ditimbulkan akibat dari pergerakan elektron. Listrik menjadi daya hidup yang vital bagi kehidupan di dunia ini. Listrik di industri terutama digunakan sebagai sumber tenaga penggerak mesin-mesin industri. Di rumah tangga baik di kota maupun di desa. Bahan bakar fosil adalah sumber energi utama yang digunakan di dunia saat ini. Tapi jika konsumsi bahan bakar ini berlebihan dapat menyebabkan masalah lingkungan yang serius seperti polusi udara. Ketika dalam proses pembakaran, bahan bakar fosil melepaskan gas karbon dioksida, nitrogen dioksida, sulfur dioksida, karbon monoksida dan lain-lain yang dapat memiliki merugikan lingkungan. Bahan bakar ini adalah sumber-sumber energi tidak terbarukan karena berasal dari fosil prasejarah dan tidak akan tersedia lagi setelah sepenuhnya digunakan. Sumber-sumber energi ini terbatas dan terus menipis dengan tingkat yang cepat. Bentuk bahan bakar fosil terdiri dari ; (1) minyak bumi, (2) batu bara, dan (3) gas alam.

2.2.1 Minyak bumi

Minyak bumi yang merupakan cairan kental berwarna coklat gelap dan kehijauan yang mudah terbakar. Cairan ini juga sering disebut sebagai emas hitam yang berada di lapisan atas dari sebagian area yang ada di kerak bumi. Bahan kimia yang terkandung di dalam minyak bumi adalah berbagai hidrokarbon, sebagian besar dari seri alkana dengan berbagai varian penampilan, komposisi, dan kemurnian.

Minyak bumi diambil dari sumur minyak yang terdapat di lokasi sumber minyak dengan melalui berbagai macam proses, yakni proses studi geologi,



Politeknik Negeri Sriwijaya

analisis, sedimen, karakter, serta struktur sumber. Lalu minyak bumi tersebut akan diproses di pengilangan minyak yang dipisah-pisahkan berdasarkan titik didihnya sehingga menghasilkan beraneka ragam jenis minyak bumi. Bahan bakar tersebut dipergunakan untuk memproduksi berbagai material yang dibutuhkan oleh manusia.

Beberapa jenis bahan bakar minyak yang terdapat di Indonesia adalah minyak tanah rumah tangga, minyak tanah industri, pertamax, pertamax racing, pertamax plus, premium, bio premium, bio solar, solar transportasi, solar industri, minyak diesel, minyak bakar, dan Pertamina DEX.

Pembangkit listrik yang menggunakan bahan bakar minyak ini adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)

2.2.2 Batu bara

Batu bara, yakni batuan yang dapat dibakar karena terbentuk dari endapan organik sisa tumbuhan yang kemudian dibentuk dengan proses pembatubaraan. Unsur-unsur kimia yang terdapat dalam batu bara ini adalah hidrogen, oksigen, dan karbon. Pembentukan energi fosil ini mengalami proses yang sangat lama dengan mendapatkan pengaruh dari gesekan panas bumi dan tekanan udara lainnya. Jenis batu bara pun ada dua macam, yakni batu bara dengan pertambangan darat dan pertambangan terbuka. Batu bara juga merupakan bahan bakar yang bisa juga digunakan sebagai bahan bakar untuk pembangkit listrik. Contohnya yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dengan teknik peleburan logam dan industri, Pembangkit Listrik Tenaga Gas Batubara (PLTGB).

2.2.3 Gas alam

Gas alam atau yang sering disebut gas rawa. Gas alam biasanya ditemukan di bawah tanah bersama dengan minyak bumi dan batubara tapi kadang-kadang terjadi dengan itu dan dipompa melalui pipa. Setelah dipompa keluar, diangkut ke tempat penyimpanan atau untuk keperluan rumah tangga. Ini telah menjadi sumber gas domestik selama bertahun-tahun. Banyak orang menggunakan gas ini untuk memanaskan rumah mereka. Ini berisi bau yang kuat yang membuatnya



mudah untuk mencium jika ada kebocoran. Gas alam menghasilkan relatif sedikit polusi terhadap sumber bahan bakar lain. Karena, gas alam berada dalam keadaan cair, mudah untuk transportasi gas alam melalui jaringan pipa. Kelemahan utama dari bahan bakar ini adalah sangat mudah terbakar. Para produsen terbesar gas alam adalah Amerika Serikat dan Rusia. Contoh pembangkit listrik yang menggunakan gas alam ini adalah Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG), Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU).

(<https://novelaayu.wordpress.com/2014/04/19/energi-fosil/>)

2.3 Energi Terbarukan

Energi terbarukan adalah energi yang bersumber dari alam dan secara berkesinambungan dapat terus diproduksi tanpa harus menunggu waktu jutaan tahun layaknya energi berbasis fosil. Sumber alam yang dimaksud dapat berasal dari matahari, panas bumi (geothermal), angin, air (hydropower) dan berbagai bentuk dari biomassa. Sumber energi tersebut tidak dapat habis dan dapat terus. Selain dapat dipulihkan kembali, energi terbarukan diyakini lebih bersih (ramah lingkungan), aman, dan terjangkau masyarakat. Penggunaan energi terbarukan lebih ramah lingkungan karena mampu mengurangi pencemaran lingkungan dan kerusakan lingkungan di banding energi non-terbarukan.

Jenis sumber energi terbarukan (*renewable energy*) yang dimiliki Indonesia cukup banyak. Jika dikelola dan dimanfaatkan dengan baik diyakini dapat menggantikan energi fosil. Bentuk energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan terdiri dari; (1) panas bumi, (2) air, (3) angin, (4) matahari, dan (5) biomassa

2.3.1 Panas bumi

Energi panas bumi atau geothermal adalah sumber energi terbarukan berupa energi thermal (panas) yang dihasilkan dan disimpan di dalam bumi. Energi panas bumi diyakini cukup ekonomis, berlimpah, berkelanjutan, dan ramah lingkungan. Namun pemanfaatannya masih terkendala pada teknologi eksploitasi yang hanya dapat menjangkau di sekitar lempeng tektonik. Pembangkit Listrik



Politeknik Negeri Sriwijaya

Tenaga Panas Bumi (PLTP) yang dimiliki Indonesia antara lain: PLTP Sibayak di Sumatera Utara, PLTP Salak (Jawa Barat).

2.3.2 Air

Sumber energi ini didapatkan dengan memanfaatkan energi potensial dan energi kinetik yang dimiliki air. Saat ini, sekitar 20% konsumsi listrik dunia dipenuhi dari Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA).

2.3.3 Angin

Energi angin atau bayu adalah sumber energi terbarukan yang dihasilkan oleh angin. Kincir angin digunakan untuk menangkap energi angin dan diubah menjadi energi kinetik atau listrik. Pemanfaat energi angin menjadi listrik di Indonesia telah dilakukan seperti pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTBayu) Samas di Bantul, Yogyakarta.

2.3.4 Matahari

Energi matahari atau surya adalah energi terbarukan yang bersumber dari radiasi sinar dan panas yang dipancarkan matahari sebagai bahan bakar utama dengan bantuan *solarcell*, energi dari cahaya matahari dapat langsung diubah menjadi energi listrik. Pembangkit Listrik Tenaga Surya yang terdapat di Indonesia antara lain : PLTS Karangasem (Bali), PLTS Raijua, PLTS Nule, dan PLTS Solor Barat (NTT)

2.3.5 Biomassa

Biomassa adalah jenis energi terbarukan yang mengacu pada bahan biologis yang berasal dari organisme yang hidup atau belum lama mati. Sumber biomassa antara lain bahan bakar kayu, limbah dan alkohol. Pembangkit listrik biomassa di Indonesia seperti PLTBM Pulubala di Gorontalo yang memanfaatkan tongkol jagung. (<http://alamendah.org/2014/09/09/8-sumber-energi-terbarukan-di-indonesia/2/>)

Salah satu pembangkit listrik yang potensinya sangat baik dikembangkan di Indonesia ini adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Mengingat seperti yang telah dijelaskan di atas bahwa keadaan iklim di Indonesia yang beriklim tropis maka sangat baik pembangkit ini menjadi salah satu pembangkit



energi listrik alternatif yang baik untuk masa sekarang dan masa mendatang ([Http://www.elektronika123.com/pembangkit-listrik/](http://www.elektronika123.com/pembangkit-listrik/))

2.4 Energi Surya

Energi surya merujuk pada radiasi energi dalam bentuk panas dan cahaya yang dipancarkan oleh matahari. Tanpa energi yang datang dari matahari, planet kita tidak akan mampu mendukung kehidupan dan energi surya adalah bentuk energi paling berlimpah yang tersedia di planet kita. Energi surya memiliki potensi besar dan banyak teknologi surya yang berkembang dengan sangat cepat. Namun, meskipun pertumbuhan industri energi surya global berlangsung dengan cepat, masih dibutuhkan banyak waktu sebelum energi surya menjadi pesaing yang nyata untuk bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama. Hal ini karena sektor energi surya masih kalah dalam hal biaya dibandingkan bahan bakar fosil.

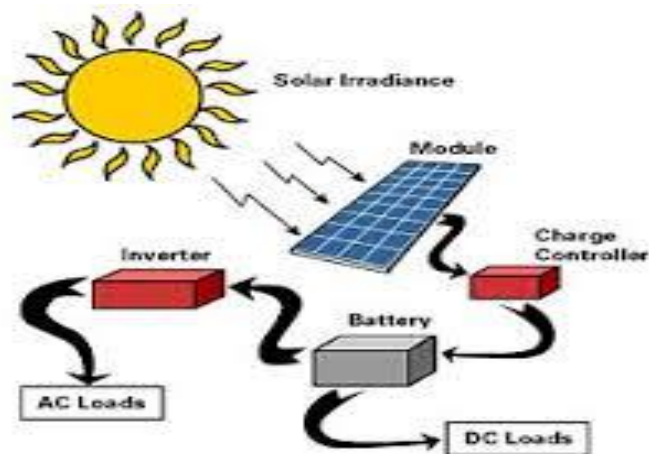
Energi surya adalah sumber energi terbarukan yang paling penting (energi angin pada dasarnya juga berasal dari energi surya), dan hanya energi panas bumi dan pasang surut yang tidak memperoleh energi mereka dari matahari. Banyak orang menggunakan istilah energi surya dan tenaga surya sebagai sinonim meskipun hal ini mengandung kesalahan karena tenaga surya mengacu pada konversi sinar matahari menjadi listrik (dalam banyak kasus menggunakan photovoltaic).

Pemanfaatan energi surya memiliki potensi masa depan yang sangat besar, tidak hanya dalam menyediakan listrik dan panas tetapi juga untuk digunakan pada proses industri serta pengembangan kendaraan surya. Meskipun energi surya adalah bentuk energi paling berlimpah yang tersedia di planet bumi, energi surya tetap bukanlah sumber energi yang sempurna. Hal ini tidak hanya merujuk pada kalahnya biaya dibandingkan bahan bakar fosil tetapi juga karena masalah *intermitten* (tidak kontinyu). Seperti yang kita ketahui, energi surya tidak tersedia pada malam hari dan karenanya membutuhkan solusi penyimpanan energi yang memadai untuk menutupi kekurangan ini. Banyak pakar energi serta ilmuwan percaya bahwa tinggal masalah waktu sebelum energi surya menjadi sumber energi yang paling penting di planet bumi, melempar bahan bakar fosil ke dalam



Politeknik Negeri Sriwijaya

buku sejarah. International Energy Agency (IEA) tahun 2011 telah mengumumkan bahwa teknologi energi surya memiliki potensi untuk memasok sepertiga energi dunia pada tahun 2060, mengingat bahwa para pemimpin dunia telah berkomitmen untuk membatasi dampak perubahan iklim. Memanfaatkan energi matahari dan tidak terus menerus menggunakan bahan bakar fosil akan memperlambat dampak perubahan iklim dan memberikan cukup waktu bagi banyak spesies untuk beradaptasi dengan perubahan iklim dan karenanya akan membantu melestarikan keanekaragaman hayati di planet bumi. Tidak hanya itu, energi surya akan meningkatkan keamanan energi dan kemandirian energi di banyak negara di dunia, serta memastikan kemajuan dalam keberlanjutan masa depan energi bersih. ([Http://www.indoenergi.com/2012/04/pengertian-energi-surya.html](http://www.indoenergi.com/2012/04/pengertian-energi-surya.html))



Gambar 2.1 Cara Kerja Energi Surya

Dari gambar di atas bisa dilihat cara kerja energi surya ini adalah dengan cara menangkap cahaya matahari menggunakan modul surya, kemudian tegangan akan mengalir melalui *charge controller* dan menuju ke batre dan kemudian karena arus yang di hasilkan adalah arus searah maka akan di ubah menjadi arus bolak balik yaitu dengan menggunakan *inverter*.

Apabila solar cell tersebut digunakan untuk penyimpanan ke baterai, maka besarnya tegangan yang dihasilkan harus diatas spesifikasi baterai tersebut.



Politeknik Negeri Sriwijaya

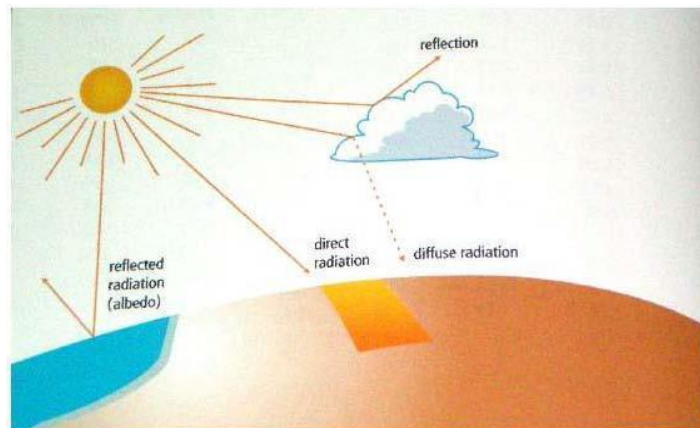
Misalnya baterai yang digunakan adalah 12 Volt, maka tegangan yang dihasilkan solar cell harus diatas 12 Volt untuk dapat melakukan pengisian.

Sebaiknya sebelum melaksanakan pengisian baterai dalam keadaan kosong karena arus yang masuk akan dapat terisi dengan maksimal. Satuan kapasitas suatu baterai adalah Ampere jam (Ah) dan biasanya karakteristik ini terdapat pada label suatu baterai. Misalnya suatu baterai dengan kapasitas 10 Ah akan terisi penuh selama 10 jam dengan arus output solar cell sebesar 1 Ampere.

2.4.1 Distribusi radiasi surya

Energi Matahari memasok energi ke bumi dalam bentuk radiasi. Tanpa radiasi dari matahari, maka kehidupan di bumi tidak akan berjalan. Setiap tahunnya ada sekitar $3,9 \times 10^{24}$ Joule = $1,08 \times 10^{18}$ kWh energi matahari yang mencapai permukaan bumi, ini berarti energi yang diterima bumi dari matahari adalah 10.000 kali lebih banyak dari permintaan energi primer secara global tiap tahunnya dan lebih banyak dari cadangan ketersediaan keseluruhan energi yang ada di bumi. Intensitas radiasi matahari diluar atmosfer bumi tergantung pada jarak antara bumi dengan matahari. Sepanjang tahun, jarak antara matahari dengan bumi bervariasi antara $1,47 \times 10^8$ km - $1,52 \times 10^8$ km. Akibatnya, irradians E_0 berfluktuasi antara 1.325 W/m^2 - 1.412 W/m^2 . Nilai rata-rata dari irradians ini disebut dengan *solar constant* (konstanta surya). Konstanta surya $E_0 = 1.367 \text{ W/m}^2$.

Nilai konstan ini bukanlah besarnya radiasi yang sampai dipermukaan bumi. Atmosfir bumi mereduksi dan mengurangi radiasi matahari tersebut melalui proses pemantulan, penyerapan (oleh ozon, uap air, oksigen dan karbondioksida) dan penghamburan (oleh molekul-molekul udara, partikel debu atau polusi). Untuk cuaca yang cerah pada siang hari, irradians yang mencapai permukaan bumi adalah 1.000 w/m^2 . Nilai ini relatif terhadap lokasi. Insolasi (energi radiasi) maksimum terjadi pada hari yang cerah namun berawan sebagian. Ini karena pemantulan radiasi matahari oleh awan sehingga insolasi (energi radiasinya) dapat mencapai 1.400 W/m^2 untuk periode yang singkat. (Ihsan 2013 : 275-763)



Gambar 2.2 Distribusi Radiasi Matahari Sampai ke Permukaan Bumi

Cahaya matahari pada permukaan bumi terdiri dari bagian yang langsung dan bagian yang baur. Radiasi langsung datang dari arah matahari dan memberikan bayangan yang kuat pada benda. Sebaliknya radiasi baur yang tersebar dari atas awan tidak memiliki arah yang jelas tergantung pada keadan awan dan hari tersebut (ketinggian matahari), baik daya pancar maupun perbandingan antara radiasi langsung dan baur.

2.4.2 Radiasi surya

Radiasi matahari yang dapat diterima oleh panel surya dibagi menjadi 3 jenis, yaitu :

- Radiasi langsung (*direct radiation* atau *beam radiation*) yaitu intensitas radiasi matahari yang langsung diterima di permukaan bumi.
- Radiasi tersebar (*diffuse radiation*) yaitu radiasi matahari yang diterima di permukaan bumi karena pantulan awan dan partikel di atmosfer bumi.
- Radiasi pantulan yaitu radiasi yang dipantulkan oleh permukaan yang berdekatan, besarnya dipengaruhi oleh reflektansi permukaan yang berdekatan. (Nugroho dkk, 2012 : 2)

Hari-hari pada saat matahari mengikuti jalur ekuator dinamakan "*equinoxes*", dan saat di antara matahari terbit dan terbenam adalah tepat 12 jam. Kecepatan di mana energi matahari mencapai kawasan bumi disebut dengan "*solar irradiance*" atau "*insolation*". *Insolation* adalah ukuran energi radiasi



Politeknik Negeri Sriwijaya

matahari yang diterima di suatu kawasan bumi pada suatu waktu. Satuan ukuran untuk irradiance adalah watt per meter persegi (W/m^2).

Nilai *irradiance* matahari maksimum digunakan dalam perancangan sistem untuk menentukan tingkat puncak input energi memasuki sistem matahari. Jika penyimpanan dimasukkan ke dalam perancangan sistem, maka penting untuk mengetahui variasi *irradiance* matahari selama periode tersebut untuk mengoptimalkan desain sistem. Lebih lanjut, kita perlu mengetahui berapa banyak tenaga surya telah tertangkap oleh modul (pengumpul) selama kurun waktu seperti hari, minggu atau tahun. Inilah yang disebut dengan radiasi matahari atau irradiation. Satuan ukuran radiasi matahari adalah joule per meter persegi (J/m^2) atau watt-jam per meter persegi (Wh/m^2).

Jumlah tenaga surya tersedia per satuan luas disebut radiasi. Jika ini terjadi selama periode waktu tertentu maka disebut iradiasi atau "*insolation*". Radiasi matahari adalah integrasi atau penjumlahan penyinaran matahari selama periode waktu. (Contaned Energy Indonesia, 2012 : 16-18)

Simbol = J

Unit kW/m^2 = atau Watt/ m^2

Mengukur device = pyranometer atau berdasarkan referensi sel surya

Nilai Puncak = $1kW/m^2$ (=1000W/ m^2)

Nilai nominal = $0.8 kW/m^2$

Energi listrik yang dihasilkan panel surya sangat dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari yang diterima oleh sistem. Intensitas cahaya matahari juga di pengaruhi oleh besarnya radiasi yang sampai pada panel surya, seperti pengaruh atmosfer yaitu debu, uap air, dan oleh gas-gas lainnya berupa bayang bayang (*shaded*) dan pengaruh kecepatan energi matahari mencapai kawasan bumi atau disebut dengan radiasi matahari.

2.4.3 Bayangan (*Shading*) pada panel surya

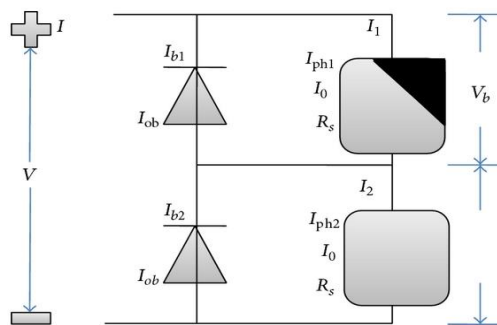
Area yang digunakan oleh modul surya pada suatu PLTS, sebagian darinya (satu atau lebih sel) mungkin dibayangi atau terhalangi. Pada kasus *shading* ini, sel surya yang tertutupi akan berhenti memproduksi energi listrik dan



Politeknik Negeri Sriwijaya

berubah menjadi beban pasif. Sel ini akan berlaku seperti diode dalam kondisi memblok arus yang diproduksi oleh sel lain dalam hubungan seri dan akan membahayakan keseluruhan produksi dari modul surya tersebut, terlebih dapat merusak modul akibat adanya panas yang berlebih.

Dalam hal ini menghindari permasalahan yang lebih besar akibat shading pada suatu string, maka diantisipasi dengan penggunaan dioda *by-pass* yang terpasang paralel pada masing-masing modul. (sumber : Technical Application Papers No.10 Photovoltaic plants hal 25)



Gambar 2.3 Pengaruh *shading* terhadap modul surya

Seperti yang di tunjukkan pada Gambar 2.3 rangkaian sederhana dengan modul PV rangkaian seri dengan dioda *bypass*. Parameter dari dua sel ini dan dioda diasumsikan konstan, dan dioda *bypass* akan menutup jika dua sel menerima iradiasi sama.

Pada Gambar 2.3 bayangan yang jatuh pada sel 1 akan mengurangi masukan energi dan akibatnya meningkatkan kehilangan energi pada sel yang berbayang, sementara sel 2 terhubung seri dengan sel 1 yang tanpa bayangan atau di bawah pencahayaan penuh, oleh karena itu I_{ph2} lebih tinggi dari I_{ph1} .

(Sun dkk, 2014 : 2)

Terdapat dua jenis bayangan yang jatuh pada panel surya, yaitu:

1. Bayangan Tetap

Bayangan tetap ini adalah seperti pepohonan, panel surya yang terpasang di dekatnya, dan bayangan tetap ini juga berasal dari fitur lanskap yang jauh seperti bukit, yang memberikan bayangan dengan tepi berbulu dikarenakan bagian darinya adalah pepohonan yang tinggi ketika matahari rendah di langit, seperti



Politeknik Negeri Sriwijaya

selama musim dingin atau di lintang yang lebih tinggi. Ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Bayangan pepohonan pada panel surya

2. Bayangan Berpindah

Bayangan berpindah adalah seperti daun yang jatuh mengenai panel surya, asap, kabut, dan awan. (<http://www.solardesign.co.uk/shading-intro.php>)

Pengaruh bayangan pada panel surya adalah apabila sebuah bayangan jatuh pada sekelompok sel akan mengurangi total output oleh dua mekanisme, yaitu :

1. dengan mengurangi input energi untuk sel.
- 2) dengan meningkatkan kerugian energi dalam sel berbayang. (R.Ramaprabha dkk, 2009 : 57)

2.5 Solar Cell

Sel surya (solar cell) atau yang disebut juga (*photovoltaic*) adalah semiconductor yang dapat mengubah energi matahari secara langsung menjadi energi listrik DC (arus searah) dengan menggunakan kristal Si (*silicon*) yang tipis. Sebuah kristal silindris Si diperoleh dengan cara memanaskan Si itu dengan tekanan yang diatur sehingga Si itu berubah menjadi penghantar. Bila kristal silindris itu dipotong setebal 0,3 mm, akan terbentuklah sel-sel silikon yang tipis atau yang disebut juga dengan sel surya (*photovoltaic*). Sel-sel silikon itu dipasang dengan posisi sejajar/seri dalam sebuah panel yang terbuat dari aluminium atau baja anti karat dan dilindungi oleh kaca atau plastik. Kemudian pada tiap-tiap sambungan sel itu diberi sambungan yang berbeda potensial yang menyatu disebut dengan daerah deplesi (*depletion region*). Bila sel-sel itu terkena sinar matahari maka pada sambungan itu akan mengalir arus listrik. Besarnya



Politeknik Negeri Sriwijaya

arus/tenaga listrik itu tergantung pada jumlah energi cahaya yang mencapai silikon itu dan luas permukaan sel itu.

(Wikipedia.org.*SolarCell*.http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell)

Modul surya adalah kumpulan dari beberapa sel surya atau disebut juga dengan devais semikonduktor dengan large area yang mengkonversi energi matahari langsung menjadi energi listrik. Modul PV individu menghasilkan arus listrik searah (DC), dan tersedia dengan ukuran 10 – 300 Watt. Daya keluaran PV ini, bergantung dari intensitas cahaya matahari (W/m^2), temperatur operasi modul, dan faktor-faktor lain. ([Http://www.rider-system.net/2011/10/modul-surya-photovoltaic.html/](http://www.rider-system.net/2011/10/modul-surya-photovoltaic.html/))

Panel surya merupakan gabungan dari beberapa modul surya dan merupakan pembangkit listrik yang mampu mengkonversi penyinaran matahari yang diubah menjadi arus listrik. Energi matahari sesungguhnya merupakan sumber energi yang menjanjikan mengingat sifatnya terus menerus serta jumlahnya yang besar dan melimpah ketersediannya. Matahari merupakan sumber energi yang diharapkan dapat mengatasi atau memecahkan permasalahan kebutuhan energi masa depan setelah berbagai sumber energi konvensional berkurang jumlahnya serta tidak ramah terhadap lingkungan. Panel surya juga memiliki kelebihan menjadi sumber energi yang praktis dan ramah lingkungan mengingat tidak membutuhkan transmisi seperti jaringan listrik konvensional, karena dapat dipasang secara modular di setiap lokasi yang membutuhkan. (Siahaan dkk, 2012 : 1-2)

Tegangan listrik yang dihasilkan oleh sebuah sel surya sangat kecil, sekitar 0,6 V tanpa beban (open circuit) atau 0,45 V dengan beban. Untuk mendapatkan tegangan listrik yang besar sesuai keinginan diperlukan beberapa sel surya yang tersusun secara seri. Jika 36 keping sel surya tersusun seri, akan menghasilkan tegangan *nominal* sekitar 16 V. Tegangan ini cukup untuk digunakan mengecaskan aki 12 V.

Untuk mendapatkan tegangan keluaran yang lebih besar lagi maka diperlukan lebih banyak lagi sel surya. Gabungan dari beberapa sel surya ini



Politeknik Negeri Sriwijaya

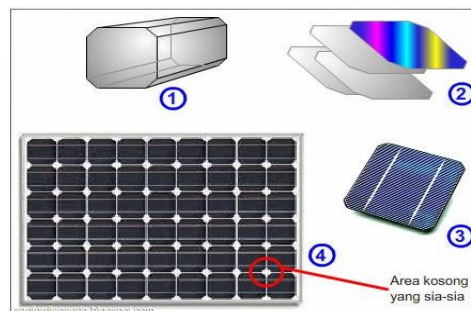
disebut modul Surya dan gabungan dari beberapa modul surya ini disebut panel surya.

2.5.1 Jenis-jenis sel surya

Jenis-jenis sel surya digolongkan berdasarkan teknologi pembuatannya. Secara garis besar sel surya dibagi dalam tiga jenis, yaitu:

a. Monocrystalline

Jenis ini terbuat dari batangan kristal silikon murni yang diiris tipis-tipis. Kristal silikon murni yang membutuhkan teknologi khusus untuk mengirisnya menjadi kepingan-kepingan kristal silikon yang tipis. Dengan teknologi seperti ini, akan dihasilkan kepingan sel surya yang identik satu sama lain dan berkinerja tinggi. Sehingga menjadi sel surya yang paling efisien dibandingkan jenis sel surya lainnya, sekitar 15% - 20%. Mahalnya harga kristal silikon murni dan teknologi yang digunakan, menyebabkan mahalnya harga jenis sel surya ini dibandingkan jenis sel surya yang lain di pasaran Kelemahannya, sel surya jenis ini jika disusun membentuk solar modul (panel surya) akan menyisakan banyak ruangan yang kosong karena sel surya seperti ini umumnya berbentuk segi enam atau bulat, tergantung dari bentuk batangan kristal silikonnya, seperti terlihat pada gambar berikut.



Gambar 2.5 Panel Surya Monocrystalline

Keterangan gambar:

1. Batangan kristal silikon murni
2. Irisan kristal silikon yang sangat tipis
3. Sebuah sel surya monocrystalline yang sudah jadi

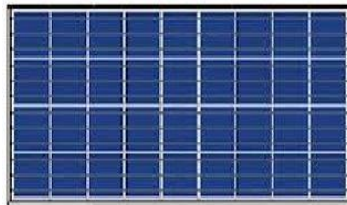


Politeknik Negeri Sriwijaya

4. Sebuah panel surya monocrystalline yang berisi susunan sel surya monocrystalline. Nampak area kosong yang tidak tertutup karena bentuk sel surya jenis ini.

b. Polycrystalline

Jenis ini terbuat dari beberapa batang kristal silikon yang dilebur / dicairkan kemudian dituangkan dalam cetakan yang berbentuk persegi. Kemurnian kristal silikonnya tidak sempurna pada sel surya monocrystalline, karenanya sel surya yang dihasilkan tidak identik satu sama lain dan efisiensinya lebih rendah, sekitar 13% - 16% . Tampilannya nampak seperti ada motif pecahan kaca di dalamnya. Bentuknya yang persegi, jika disusun membentuk panel surya, akan rapat dan tidak akan ada ruangan kosong yang sia-sia seperti susunan pada panel surya monocrystalline di atas. Proses pembuatannya lebih mudah dibanding monocrystalline, karenanya harganya lebih murah. Jenis ini paling banyak dipakai saat ini.

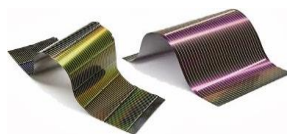


Gambar 2.6 Panel Surya Polycrystalline

c. Thin Film Solar Cell (TFSC)

Jenis sel surya ini diproduksi dengan cara menambahkan satu atau beberapa lapisan material sel surya yang tipis ke dalam lapisan dasar. Sel surya jenis ini sangat tipis karenanya sangat ringan dan fleksibel. Jenis ini dikenal juga dengan nama TFPV (*Thin Film Photovoltaic*).

(<http://sanfordlegenda.blogspot.co.id/2013/10/Solar-cells-Jenis-jenis-sel-surya.html>)

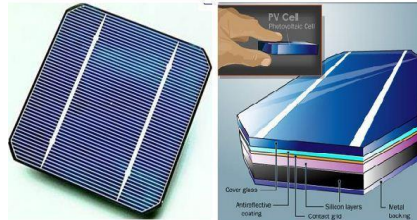


Gambar 2.7 Thin Film Solar Cell (TFSC)



2.5.2 Struktur sel surya

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



Gambar 2.8 Bagian – Bagian Sel Surya.

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 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. Pengertian semikonduktor tipe-p, tipe-n, dan juga prinsip p-n junction dan sel surya akan dibahas dibagian “cara kerja sel surya”.

3. Kontak metal / contact grid

Selain substrat sebagai kontak positif, diatas sebagian material semikonduktor biasanya dilapiskan material metal atau material konduktif transparan sebagai kontak negatif.

4.Lapisan antireflektif

Refleksi cahaya harus diminimalisir agar mengoptimalkan cahaya yang terserap oleh semikonduktor. Oleh karena itu biasanya sel surya dilapisi oleh lapisan anti-refleksi. Material anti-refleksi ini adalah lapisan tipis material dengan besar indeks refraktif optik antara semikonduktor dan udara yang menyebabkan cahaya dibelokkan ke arah semikonduktor sehingga meminimumkan cahaya yang dipantulkan kembali.

5.Enkapsulasi / cover glass

Bagian ini berfungsi sebagai enkapsulasi untuk melindungi modul surya dari hujan atau kotoran (<https://teknologisurya.wordpress.com/dasar-teknologi-sel-surya/prinsip-kerja-sel-surya/>)

2.5.3 Karakteristik Modul Surya

Kinerja sel surya yang terbaik ditunjukkan oleh karakteristik arus tegangan. Oleh karena itu, penting untuk mengetahui tegangan output (V) dan arus keluaran (I) dan bagaimana mereka bervariasi untuk hubungan satu sama lain. Daya (P) yang diproduksi oleh sel surya adalah produk dari tegangan (V) dan arus (I) untuk karakteristik operasi tertentu (PNPM Mandiri : 31).

Kinerja modul surya digambarkan dengan karakteristik kurva I-V atau kurva arus listrik (I) terhadap tegangan (V). Modul surya akan menghasilkan arus listrik maksimum apabila tidak ada komponen tahanan (R) pada rangkaian,



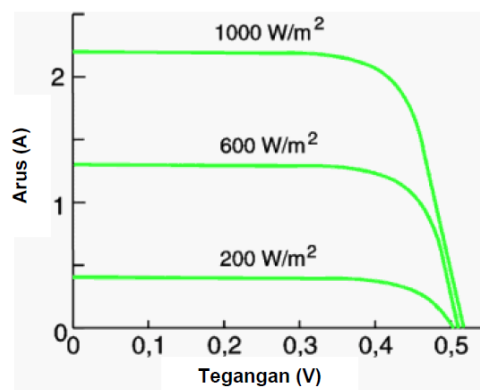
Politeknik Negeri Sriwijaya

dengan kata lain kutub positif dan kutub negatif dihubungkan. Arus maksimum biasa disebut sebagai arus hubung singkat (I_{sc}) dimana terjadi pada saat tegangan modul surya sama dengan nol ($V = 0$).

Sebaliknya tegangan maksimum dihasilkan pada saat rangkaian tidak terhubung. Tegangan ini disebut sebagai tegangan terbuka (V_{oc}), pada kondisi tahanan R sangatlah besar dan tidak ada sama sekali arus yang mengalir karena rangkaian listrik tidak terhubung atau dengan kondisi terbuka.

Besaran daya listrik dengan satuan Watt didapatkan dengan cara mengalikan tegangan dan arus listrik ($Watt = Volt \times Ampere$). Daya maksimum umumnya disebut dengan daya puncak dengan notasi mp , jadi arus listrik pada posisi maksimum dituliskan sebagai I_{mp} dan tegangan sebagai V_{mp} .

Kurva arus-tegangan setiap produk modul surya haruslah dibuat pada kondisi standar intensitas cahaya matahari dan temperatur modul surya, dikarenakan keluaran daya dari modul surya ini sangatlah tergantung kepada intensitas cahaya matahari yang jatuh di permukaan modul surya akan semakin besar arus listrik yang dihasilkan, dengan kata lain intensitas cahaya matahari berbanding lurus dengan keluaran arus listrik, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.10. Sedangkan temperatur modul surya akan berbanding terbalik dengan keluaran tegangan yang dihasilkan, jadi semakin besar temperatur modul surya, tegangannya akan semakin menurun. Standar kurva I-V suatu modul surya dibuat pada kondisi intensitas cahaya 1000 W/m^2 dan temperatur modul surya 25°C (Sudradjat, 2007 : 15).



Gambar 2.9 Pengaruh tingkat radiasi pada I-V sel surya



2.6 Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Komponen-komponen yang diperlukan untuk instalasi listrik tenaga surya, terdiri dari:

1. Panel surya / solar panel

Solar panel / panel surya mengkonversikan tenaga matahari menjadi listrik. Sel silikon (disebut juga solar cells) yang disinari matahari/ surya, membuat photon yang menghasilkan arus listrik. Sebuah solar cells menghasilkan kurang lebih memiliki tegangan 0.5 Volt. Jadi sebuah panel surya 12 Volt terdiri dari kurang lebih 36 sel (untuk menghasilkan 17 Volt tegangan maksimum).

Umumnya kita menghitung maksimum sinar matahari yang diubah menjadi tenaga listrik sepanjang hari adalah 5 jam. Tenaga listrik pada pagi – sore disimpan dalam baterai, sehingga listrik bisa digunakan pada malam hari, dimana tanpa sinar matahari.



Gambar 2.10 Panel Surya

2. Solar charge controller

Solar charge controller berfungsi mengatur lalu lintas dari solar cell ke baterai dan beban. Alat elektronik ini juga mempunyai banyak fungsi yang pada dasarnya ditujukan untuk melindungi baterai.



Gambar 2.11 Solar Charge Controller



3. Inverter

Inverter adalah perangkat elektrik yang mengkonversikan tegangan searah (DC – direct current) menjadi tegangan bolak balik (AC – alternating current).



Gambar 2.12 Inverter

4. Baterai

Baterai berfungsi menyimpan arus listrik yang dihasilkan oleh panel surya sebelum dimanfaatkan untuk menggerakkan beban. Beban dapat berupa lampu penerangan atau peralatan elektronik lainnya yang membutuhkan listrik.



Gambar 2.13 Baterai

Instalasi pembangkit listrik dengan tenaga surya membutuhkan perencanaan mengenai kebutuhan daya:

- Jumlah pemakaian
- Jumlah solar panel

([Http://energiterbarukanonline.blogspot.co.id/2013/04/komponen-sistem-listrik-tenaga-surya.html](http://energiterbarukanonline.blogspot.co.id/2013/04/komponen-sistem-listrik-tenaga-surya.html))

2.7 Konversi Energi

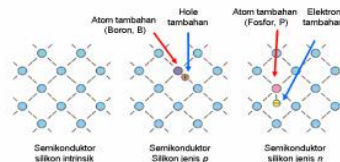
Proses pengubahan atau konversi cahaya matahari menjadi listrik ini dimungkinkan karena bahan material yang menyusun sel surya berupa



Politeknik Negeri Sriwijaya

semikonduktor. Lebih tepatnya tersusun atas *dua* jenis semikonduktor; yakni jenis *n* dan jenis *p*.

Semikonduktor jenis *n* merupakan semikonduktor yang memiliki kelebihan elektron, sehingga kelebihan muatan negatif, (*n* = negatif). Sedangkan semikonduktor jenis *p* memiliki kelebihan hole, sehingga disebut dengan *p* (*p* = positif) karena kelebihan muatan positif. Caranya, dengan menambahkan unsur lain ke dalam semikonduktor, maka kita dapat mengontrol jenis semikonduktor tersebut, sebagaimana diilustrasikan pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.14 Semikonduktor jenis p-n

Pada awalnya, pembuatan dua jenis semikonduktor ini dimaksudkan untuk meningkatkan tingkat konduktifitas atau tingkat kemampuan daya hantar listrik dan panas semikonduktor alami. Di dalam semikonduktor alami (disebut dengan semikonduktor intrinsik) ini, elektron maupun hole memiliki jumlah yang sama. Kelebihan elektron atau hole dapat meningkatkan daya hantar listrik maupun panas dari sebuah semikonduktor.

Misal semikonduktor intrinsik yang dimaksud ialah silikon (Si). Semikonduktor jenis *p*, biasanya dibuat dengan menambahkan unsur boron (B), aluminum (Al), gallium (Ga) atau Indium (In) ke dalam Si. Unsur-unsur tambahan ini akan menambah jumlah hole. Sedangkan semikonduktor jenis *n* dibuat dengan menambahkan nitrogen (N), fosfor (P) atau arsen (As) ke dalam Si. Dari sini, tambahan elektron dapat diperoleh. Sedangkan, Si intrinsik sendiri tidak mengandung unsur tambahan. Usaha menambahkan unsur tambahan ini disebut dengan *doping* yang jumlahnya tidak lebih dari 1 % dibandingkan dengan berat Si yang hendak di-*doping*.



Politeknik Negeri Sriwijaya

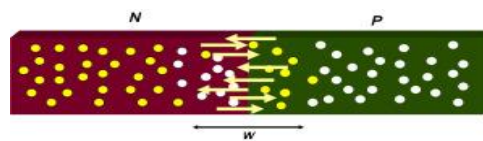
Dua jenis semikonduktor n dan p ini jika disatukan akan membentuk sambungan $p-n$ atau dioda $p-n$ (istilah lain menyebutnya dengan sambungan metalurgi / *metallurgical junction*) yang dapat digambarkan sebagai berikut.

1. Semikonduktor jenis p dan n sebelum disambung.



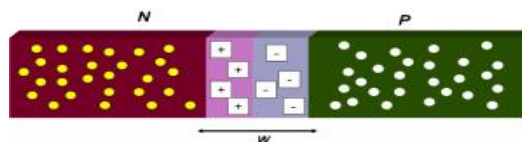
Gambar 2.15 Semikonduktor jenis p dan n

2. Sesaat setelah dua jenis semikonduktor ini disambung, terjadi perpindahan elektron-elektron dari semikonduktor n menuju semikonduktor p , dan perpindahan hole dari semikonduktor p menuju semikonduktor n . Perpindahan elektron maupun hole ini hanya sampai pada jarak tertentu dari batas sambungan awal.



Gambar 2.16 Semikonduktor jenis p dan disambung

3. Elektron dari semikonduktor n bersatu dengan hole pada semikonduktor p yang mengakibatkan jumlah hole pada semikonduktor p akan berkurang. Daerah ini akhirnya berubah menjadi lebih bermuatan positif. Pada saat yang sama, hole dari semikonduktor p bersatu dengan elektron yang ada pada semikonduktor n yang mengakibatkan jumlah elektron di daerah ini berkurang. Daerah ini akhirnya lebih bermuatan positif.

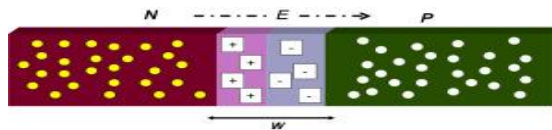


Gambar 2.17 Semikonduktor jenis p dan n setelah di sambung



Politeknik Negeri Sriwijaya

4. Daerah negatif dan positif ini disebut dengan daerah deplesi (*depletion region*) ditandai dengan huruf W.
5. Baik elektron maupun hole yang ada pada daerah deplesi disebut dengan pembawa muatan minoritas (*minority charge carriers*) karena keberadaannya di jenis semikonduktor yang berbeda.
6. 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 (nomor 1 di atas).



Gambar 2.18 Medan listrik internal E pada semikonduktor jenis p dan n

7. 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.

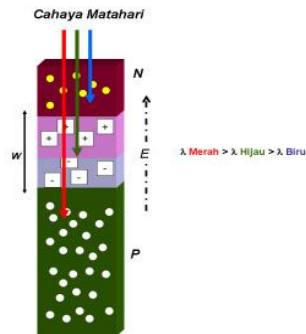
Pada sambungan $p-n$ inilah proses konversi cahaya matahari menjadi listrik terjadi.

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



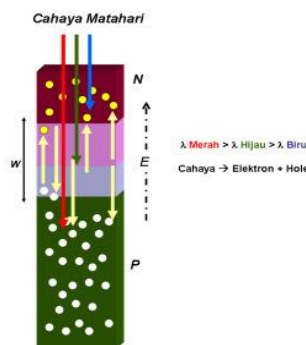
Politeknik Negeri Sriwijaya

permukaan sel surya dapat terus terserap dan masuk ke daerah deplesi dan semikonduktor p .



Gambar 2.19 Proses cahaya matahari masuk ke daerah deplesi dan semikonduktor p

Ketika sambungan semikonduktor ini terkena cahaya matahari, maka elektron mendapat energi dari cahaya matahari untuk melepaskan dirinya dari semikonduktor n , daerah deplesi maupun semikonduktor. 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 2.20 Terbentuknya pasangan elektron dan hole akibat cahaya matahari

Cahaya matahari dengan panjang gelombang (dilambangkan dengan simbol “lambda” sbgn 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

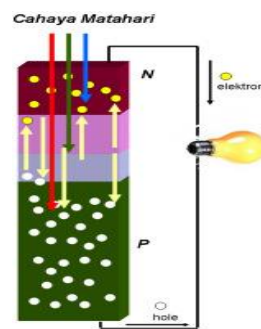


Politeknik Negeri Sriwijaya

semikonduktor p yang akhirnya menghasilkan proses fotogenerasi di sana. Spektrum biru dengan panjang gelombang yang jauh lebih pendek hanya terserap di daerah semikonduktor n .

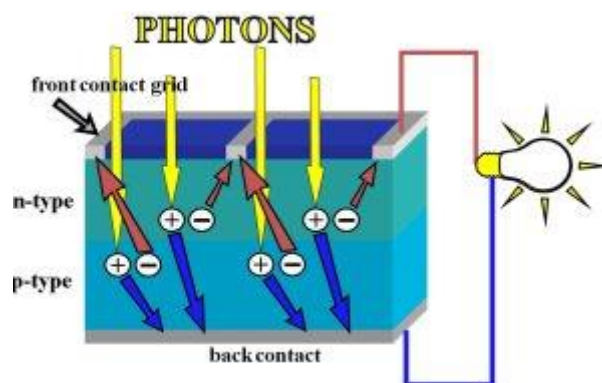
Selanjutnya, dikarenakan pada sambungan pn terdapat medan listrik E , elektron hasil fotogenerasi tertarik ke arah semikonduktor n , begitu pula dengan hole yang tertarik ke arah semikonduktor p .

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.



Gambar 2.21 Arus listrik ini timbul akibat pergerakan elektron.

Pada umumnya, untuk memperkenalkan cara kerja sel surya secara umum, ilustrasi di bawah ini menjelaskan segalanya tentang proses konversi cahaya matahari menjadi energi listrik.



Gambar 2.22 Proses konversi cahaya matahari menjadi energi listrik



Politeknik Negeri Sriwijaya

Adapun radiasi cahaya matahari itu sendiri harus diubah menjadi energi listrik.

Dibawah ini adalah satuan konversi :

$$1 \text{ Lux} = 1 \text{ Lumen/m}^2$$

$$1 \text{ Lumen} = 0,0015 \text{ Watt}$$

(<https://energisurya.wordpress.com/2008/07/10/melihat-prinsip-kerja-sel-surya-lebih-dekat/>)

Dari satuan konversi diatas maka dapat dicari berapa energi surya yang diterima oleh panel surya darisinar matahari.

2.8 Daya Pada Panel Surya

Daya listrik adalah besaran listrik yang menyatakan besarnya energi yang digunakan untuk mengaktifkan komponen atau peralatan listrik/elektronik.

Intensitas cahaya menentukan besarnya daya dari energi sumber cahaya yang sampai pada seluruh permukaan sel surya. Jika luas permukaan sel surya (A) dengan intensitas tertentu, maka daya masukan sel surya adalah :

$$P_{in} = I_r \cdot A \quad (2.1)$$

Dimana

P_{in} = daya yang diterima akibat irradiance matahari (watt)

I_r = Intensitas Cahaya (W/m^2)

A = Luas permukaan sel surya (m^2)

Besar daya keluaran sel surya (P_{out}) yaitu perkalian tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}), arus hubungan singkat (I_{sc}), dan *fill factor* (FF) yang dihasilkan oleh sel surya dapat dihubungkan dengan rumus

$$P_{out} = V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF \quad (2.2)$$

Dimana :

P_{out} = Daya yang dibangkitkan oleh sel surya (watt)

V_{oc} = Tegangan rangkaian terbuka pada sel surya (volt)

I_{sc} = Arus hubung singkat pada sel surya (ampere)

FF = *Fill Factor* (faktor pengisi)



Politeknik Negeri Sriwijaya

Faktor pengisi (*fill factor, FF*) merupakan nilai rasio tegangan dan arus pada keadaan daya maksimum dan tegangan *open circuit* (V_{oc}) dan arus *short circuit* (I_{sc})

$$FF \dots\dots = \frac{V_{OC} - I_n (V_{OC} + 0,72)}{V_{OC} + 1} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana :

V_{oc} = Tegangan rangkaian terbuka pada sel surya (volt)

2.9 Efisiensi Pada Sel Surya

Energi cahaya yang diterima oleh sel surya dapat diubah menjadi energi listrik. Semakin besar energi cahaya yang diserap maka semakin besar energi listrik yang dapat di hasilkan. Maka konversi energi inipun memiliki nilai efisiensi didalam nya. Efisiensi keluaran maksimum (η) didefinisikan sebagai presentase keluaran daya optimum terhadap energi cahaya yang digunakan, yang dituliskan sebagai berikut (Amalia, Satwiko, 2010 :160) :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana :q

η = Efisiensi sel surya (%)

P_{out} = Daya yang dibangkitkan oleh sel surya (watt)

P_{in} = daya yang di terima akibat *irradiance* matahari (watt)