

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Perkembangan Sel Surya

Efek photovoltaic pertama kali ditemukan oleh ahli Fisika berkebangsaan Perancis Alexandre Edmond Becquerel pada tahun 1839. Tahun 1876, William Grylls Adams bersama muridnya, Richard Evans Day menemukan bahwa material padat selenium dapat menghasilkan listrik ketika terkena paparan sinar. Sel surya pertama kali dikeluarkan sebagai tenaga listrik bagi pesawat ruang angkasa dan sistem komunikasi satelit diakhir 1950-an, dikarenakan perangkat ini tidak membutuhkan pemeliharaan atau perawatan selama jangka waktu (5 sampai 10 tahun). Sel surya silikon yang digunakan untuk memasok daya listrik disatelit Vanguard dan Terrestrial yang dimasukkan ke dalam orbit pada tahun 1958. Selama dua dekade sel surya menjadi primadona sebagai pemasok tenaga listrik untuk pesawat ruang angkasa. Pada tahun 1973 beberapa ilmuwan terkemuka mengatakan bahwa sel surya merupakan calon energi yang layak untuk pasokan energi nonfosil di masa depan. Saat ini pembangkit listrik tenaga surya aktif dan berkembang di Amerika Serikat, Jepang, dan negara-negara di benua Eropa. Pada Tabel 1 menunjukkan pertumbuhan yang cepat dari kapasitas instalasi surya, terlepas dari wilayah geografis dan kondisi iklim. Selanjutnya, data menunjukkan bahwa tiga negara, Amerika Serikat, Jerman, dan Jepang menyumbang 90 persen dari kapasitas instalasi surya di seluruh dunia pada tahun 2005.

Tabel 1. Kapasitas Instalasi Solar PV di Dunia Pada Tahun 2005

| Negara | Tahun Pemasangan | Kapasitas (MW) | Persentase dari penggunaan di dunia(%) |
|-----------------|------------------|----------------|--|
| Amerika Serikat | 2004 | 480 | 12,9 |
| Jerman | 1999 | 1,43 | 38,6 |
| Jepang | 1994 | 1,425 | 38,4 |
| Australia | 2002 | 59 | 1,6 |
| Spanyol | 2003 | 59 | 1,6 |
| Belanda | 2004 | 52 | 1,6 |

Sumber : Jha, 2010.

Dimulai pada pertengahan 1990-an, Jepang dan Jerman mulai berinvestasi dalam program energi terbarukan. Akibatnya, di Jerman saat ini industri energi terbarukan telah menjadi sumber terbesar kedua di negara tersebut dan mempekerjakan lebih dari 200.000 insinyur dan ilmuwan yang terlibat dalam kegiatan penelitian dan pengembangan dengan fokus utama pada program energi surya (Jha, 2010).

2.2. Energi dan Daya

Energi merupakan suatu kemampuan untuk melakukan usaha. Kemampuan tersebut diukur dengan variabel waktu dan besarnya usaha yang dilakukan. Sistem Satuan Internasional (SI) pada energi adalah joule (J). Konversi satuan energi dapat dilakukan melalui ketentuan bahwa 1 kalori = 4.2 Joule dan 1 joule = 1 watt sekon. Energi listrik diperoleh karena adanya perbedaan muatan antara dua buah titik penghantar. Energi listrik mampu diperoleh dari perubahan berbagai sumber energi, salah satunya adalah cahaya yang diperoleh berdasarkan reaksi pada permukaan fotovoltaiik sehingga menyebabkan perbedaan muatan dan menghasilkan listrik.

Daya listrik diartikan sebagai laju hantaran energi listrik dalam rangkaian listrik. Satuan SI daya listrik adalah watt yang menyatakan banyaknya tenaga listrik yang mengalir per satuan waktu (joule/detik). Arus listrik yang mengalir dalam rangkaian dengan hambatan listrik menimbulkan kerja. Peranti mengkonversi kerja ini ke dalam berbagai bentuk energi yang berguna, seperti panas (pada pemanas listrik), cahaya (pada bola lampu), energi kinetik (motor listrik), dan suara (loudspeaker). Listrik dapat diperoleh dari pembangkit listrik atau penyimpan energi (baterai). Daya listrik, seperti daya mekanik, dilambangkan oleh huruf P dalam persamaan listrik. Pada rangkaian arus DC, daya listrik sesaat dihitung menggunakan Hukum Joule yang menunjukkan bahwa energi listrik dapat berubah menjadi energi mekanik, dan sebaliknya.

$$P = VI \quad (1)$$

P adalah daya (watt atau W)

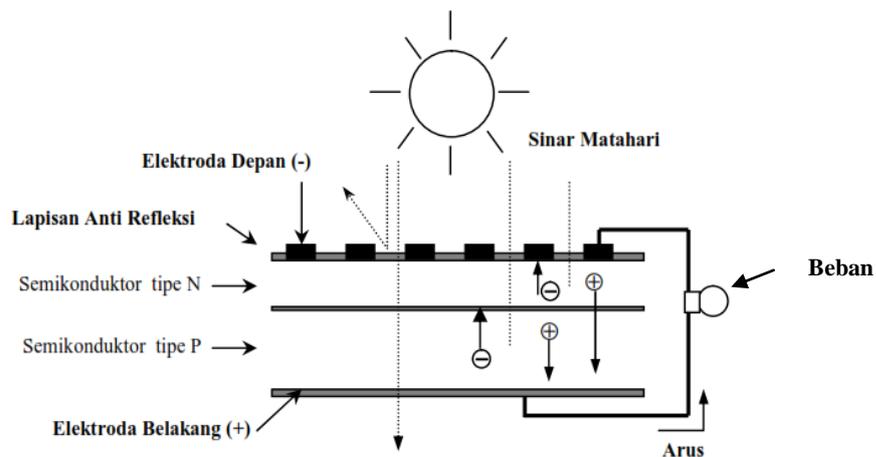
I adalah arus (ampere atau A)

V adalah perbedaan potensial (volt atau V)

Daya listrik mengalir di manapun medan listrik dan magnet berada di tempat yang sama (Wikipedia, 2014).

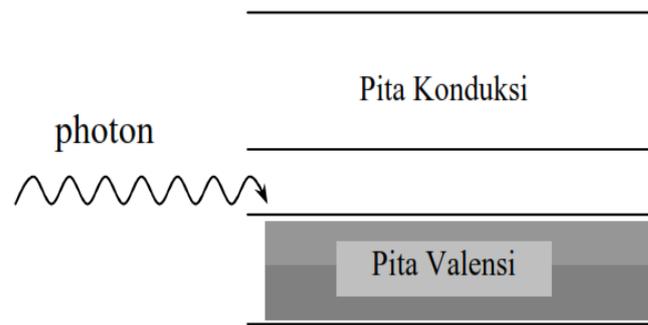
2.3. Sel Surya

Secara sederhana sel surya terdiri dari persambungan bahan semikonduktor bertipe p dan n (*p-n junction semiconductor*) yang jika terkena sinar matahari maka akan terjadi aliran elektron, aliran elektron inilah yang disebut sebagai aliran arus listrik. Proses pengubahan energi matahari menjadi energi listrik ditunjukkan dalam Gambar 1.



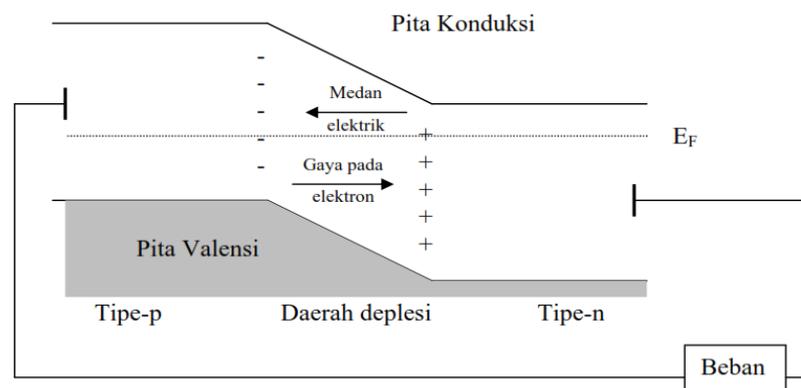
Gambar 1. Proses Pengubahan Energi Matahari Menjadi Energi Listrik Pada Sel Surya

Bagian utama pengubah energi sinar matahari menjadi listrik adalah penyerap (*absorber*), meskipun demikian masing-masing lapisan juga sangat berpengaruh terhadap efisiensi dari sel surya. Semikonduktor adalah bahan yang memiliki struktur seperti isolator akan tetapi memiliki celah energi kecil (1 eV atau kurang) sehingga memungkinkan elektron bisa melompat dari pita konduksi ke pita valensi. Hal tersebut dapat dijelaskan dengan pita-pita energi seperti Gambar 2.



Gambar 2. Struktur Pita Sebuah Semikonduktor

Elektron dari pita konduksi dapat meloncat ke pita valensi ketika sambungan tersebut dikenai photon dengan energi tertentu. Tingkat energi yang dihasilkan diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Tingkat Energi yang Dihasilkan Oleh Sambungan p-n semikonduktor

Ketika sinar matahari yang terdiri dari foton-foton jatuh pada permukaan bahan sel surya (*absorber*), akan diserap, dipantulkan, atau dilewatkan begitu saja seperti terlihat pada Gambar 1, dan hanya foton dengan tingkat energi tertentu yang akan membebaskan elektron dari ikatan atomnya, sehingga mengalir arus listrik. Tingkat energi ini disebut energi *band-gap* yang didefinisikan sebagai sejumlah energi yang dibutuhkan untuk mengeluarkan elektron dari ikatan kovalennya sehingga terjadilah aliran arus listrik. Elektron dari pita valensi akan tereksitasi ke

pita konduksi. Elektron menjadi pembawa n dan meninggalkan hole. Pembawa p akan bergerak menuju persambungan demikian juga pembawa n akan bergerak ke persambungan. Perpindahan tersebut menghasilkan beda potensial. Arus dan daya yang dihasilkan fotovoltaik ini dapat dialirkan ke rangkaian luar. Untuk membebaskan elektron dari ikatan kovalennya, energi foton (hc) harus sedikit lebih besar atau diatas dari pada energi *band-gap*. Jika energi foton terlalu besar dari pada energi *band-gap*, maka ekstra energi tersebut akan diubah dalam bentuk panas pada sel surya. Oleh karena itu, sangatlah penting pada sel surya untuk mengatur bahan yang digunakan, yaitu dengan memodifikasi struktur molekul dari semikonduktor yang dipergunakan. Agar efisiensi sel surya bisa tinggi maka foton yang berasal dari sinar matahari harus bisa diserap sebanyak-banyaknya, kemudian memperkecil refleksi dan rekombinasi serta memperbesar konduktivitas dari bahannya. Agar foton bisa diserap sebanyak-banyaknya, maka penyerap harus memiliki energi *band-gap* dengan jangkauan yang lebar, sehingga memungkinkan untuk bisa menyerap sinar matahari yang mempunyai energi sangat bermacam-macam tersebut (Rusminto, 2003).

Untuk mendapatkan keluaran yang besar maka perlu penggabungan dari beberapa sel surya menjadi panel surya. Pada panel, sel surya dihubungkan secara seri atau parallel untuk menghasilkan tegangan, arus, atau daya yang tinggi. Permukaan panel ditutup dengan kaca atau materi transparan lain untuk proteksi terhadap lingkungan. Panel surya merupakan komponen utama dalam membuat suatu kesatuan sistem pembangkit listrik tenaga surya (Syamsudin, 2012).

2.4. Jenis-Jenis Panel Surya

a. Polikristal (*Poly-crystalline*)

Merupakan panel surya yang memiliki susunan kristal acak karena dipabrikasi dengan proses pengecoran. Tipe ini memerlukan luas permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan jenis monokristal untuk menghasilkan daya listrik yang sama. Panel surya jenis ini memiliki efisiensi lebih rendah dibandingkan tipe monokristal, sehingga memiliki harga yang cenderung lebih murah.

b. Monokristal (*Mono-crystalline*)

Merupakan panel yang paling efisien, menghasilkan daya listrik persatuan luas yang paling tinggi. Monokristal memiliki efisiensi sampai dengan 15%.

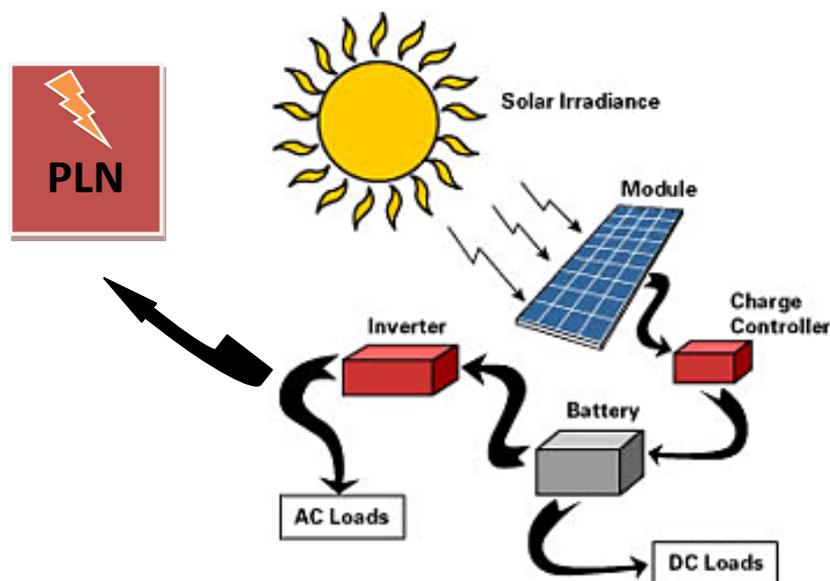
Kelemahan dari panel jenis ini adalah tidak dapat bekerja optimal ditempat dengan cahaya matahari kurang (teduh), efisiensinya akan turun drastis dalam cuaca berawan.

c. Amorphous

Silikon Amorf (a-Si) telah digunakan sebagai bahan sel photovoltaic untuk beberapa waktu. Silikon Amorf mempunyai kinerja yang lebih rendah dibandingkan sel surya tradisional c-Si. Pembuatan solar sel bertipe a-Si dalam produksi skala besar tidak efisien dikarenakan biaya produksi yang terlalu mahal. Panel tipe a-Si menggunakan sekitar 1% dari silikon yang dibutuhkan untuk sel c-Si, dan biaya silikon adalah faktor terbesar dalam besarnya biaya pembuatan sel (Anonim^b, 2015).

2.5. Cara Kerja Panel Surya

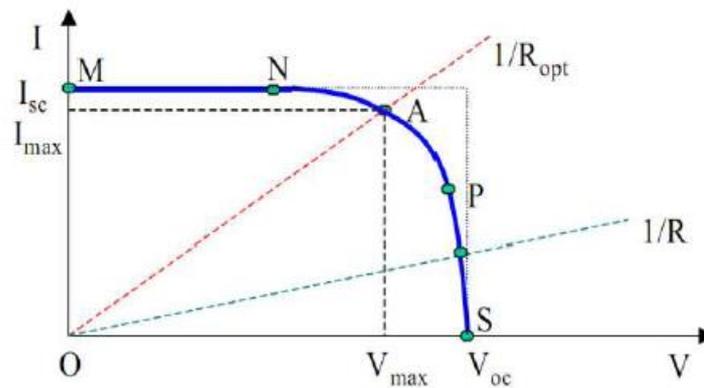
Secara umum cara kerja listrik tenaga surya adalah cahaya matahari yang datang ditangkap oleh panel surya kemudian arus listrik DC yang dihasilkan oleh panel surya melalui *controller* yang kemudian disimpan di aki atau baterai. Untuk menghasilkan tegangan bolak-balik, dibutuhkan *inverter*. Kelebihan listrik dapat dialirkan ke jaringan listrik utama (grid PLN). Cara kerja sederhana panel surya dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Cara Kerja Sederhana Panel Surya

2.6. Karakteristik Sel Fotovoltaik

Sifat elektrik dari sel fotovoltaik dalam menghasilkan energi listrik dapat diamati dari karakteristik listrik sel tersebut, yaitu berdasarkan arus dan tegangan yang dihasilkan sel fotovoltaik pada kondisi cahaya dan beban yang berbeda-beda. Kurva I-V menggambarkan sifat dari sel surya secara lengkap yang dapat dilihat pada Gambar 5.

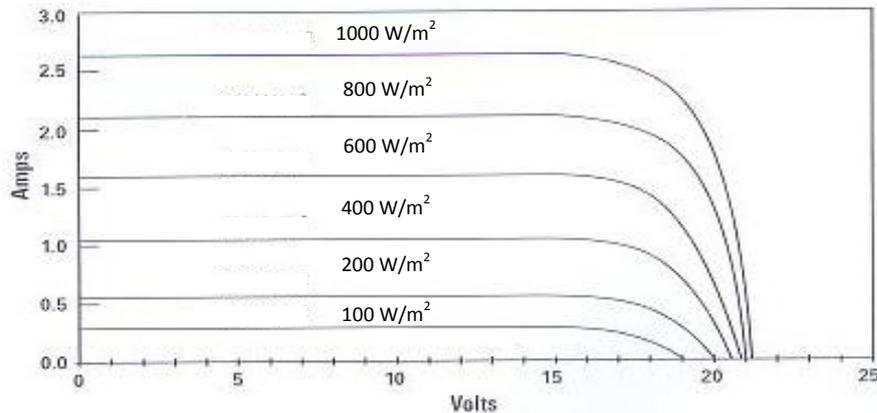


Gambar 5. Karakteristik Arus Tegangan (I-V) Terhadap Daya (P)

Pada Gambar 5 menunjukkan bahwa ketika sel dihubungkan dengan beban (R). Beban kemudian memberi hambatan sebagai garis linear dengan garis $I/V = 1/R$. Hal tersebut menunjukkan daya yang didapat bergantung pada nilai resistensi. Jika resistensi kecil maka sel beroperasi pada daerah kurva MN, dimana sel beroperasi sebagai sumber arus yang konstan atau *short circuit*. Pada keadaan lain, jika resistensi besar, sel akan beroperasi pada kurva PS, dimana sel beroperasi sebagai tegangan yang konstan atau *open-circuit*. Jika dihubungkan dengan hambatan optimal atau R_{opt} berarti sel surya menghasilkan daya dengan tegangan maksimal dan arus maksimal. Daya maksimum (P_{max}) pada Gambar 5 dapat dilihat pada titik merah (P_{max}) saat V_{max} dan I_{max} (Hansen dkk, 2000).

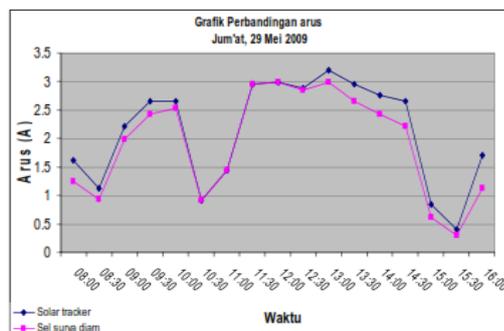
Semakin besar intensitas cahaya matahari secara proposional akan menghasilkan arus yang besar. Effisiensi paling tinggi adalah saat sel surya beroperasi dekat pada titik maksimum tegangan baterai harus mendekati tegangan V_{max} . Apabila tegangan baterai menurun di bawah V_{max} , atau meningkat di atas V_{max} , maka effisiensi berkurang. Jika tingkatan cahaya matahari menurun, bentuk dari kurva I-V menunjukkan hal yang sama, tetapi bergerak ke bawah yang mengindikasikan

menurunnya arus dan daya, sedangkan tegangan tidak berubah oleh intensitas cahaya matahari (Anonim^b, 2014). Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Pengaruh Penyinaran Terhadap Arus Sel Surya

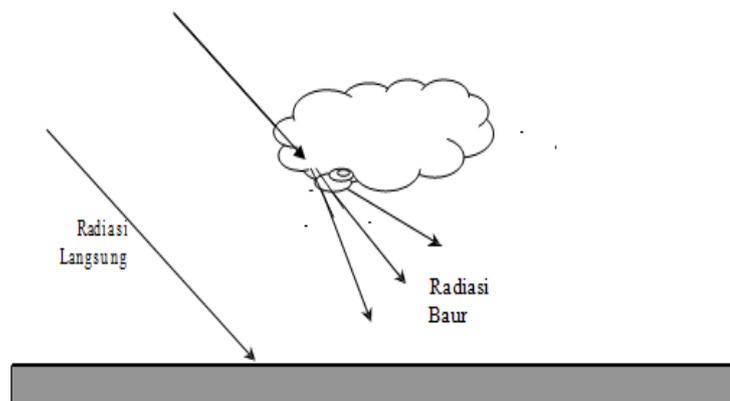
Daya yang dihasilkan oleh sel surya berbeda-beda. Hal ini sejalan dengan data yang diperoleh dalam sebuah penelitian yang dilakukan oleh Syafaruddin (2010) yang menyatakan bahwa secara umum pada kondisi cuaca cerah sepanjang hari, arus yang dihasilkan sel surya dalam posisi diam (horizontal) akan mencapai puncak saat tengah hari sekitar pukul 13.00 WIB. Hal ini disebabkan intensitas cahaya matahari saat tengah hari lebih besar dari pada saat pagi atau sore hari. Penurunan arus pada sistem solar dapat terjadi karena intensitas matahari yang diterima sel surya mulai melemah. Dengan menurunnya arus sel surya, akan menyebabkan daya dari sel surya akan ikut berkurang hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Pengaruh Penyinaran (Cuaca) Terhadap Arus

2.7. Radiasi Harian Matahari pada Permukaan Bumi

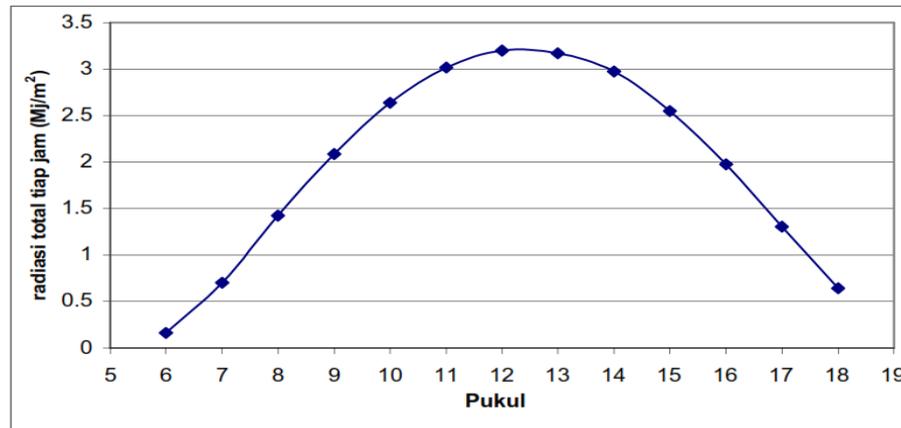
Radiasi matahari yang tersedia di luar atmosfer bumi atau sering disebut konstanta radiasi matahari sebesar 1353 W/m^2 . Intensitasnya berkurang oleh penyerapan dan pemantulan oleh atmosfer sebelum mencapai permukaan bumi, sehingga radiasi yang sampai ke bumi sebesar 1000 W/m^2 . Ozon di atmosfer menyerap radiasi dengan panjang-gelombang pendek (ultraviolet) sedangkan karbon dioksida dan uap air menyerap sebagian radiasi dengan panjang gelombang yang lebih panjang (inframerah). Selain pengurangan radiasi bumi yang langsung, masih ada radiasi yang dipancarkan oleh molekul-molekul gas, debu, dan uap air dalam atmosfer sebelum mencapai bumi yang disebut sebagai radiasi baur (*diffuse*) seperti terlihat pada Gambar 8 (Jansen,1995).



Gambar 8. Radiasi Langsung dan Radiasi yang Mengenai Permukaan Bumi

Dengan adanya faktor-faktor di atas menyebabkan radiasi yang diterima permukaan bumi memiliki intensitas yang berbeda-beda setiap saat. Besarnya radiasi harian yang diterima permukaan bumi pada cuaca cerah ditunjukkan grafik pada Gambar 9. Pada waktu pagi dan sore radiasi sampai permukaan bumi intensitasnya kecil. Hal ini disebabkan arah sinar matahari tidak lurus dengan

permukaan bumi (membentuk sudut tertentu) sehingga sinar matahari mengalami difusi oleh atmosfer bumi.



Gambar 9. Grafik Besar Radiasi Harian Matahari yang Mengenai Permukaan Bumi Pada Atmosfer Cerah (Jansen, 1995)

2.8. Arus Bolak-Balik (AC) dan Arus Searah (DC)

Magnet yang digerakkan terus-menerus dalam suatu kumparan akan menyebabkan terjadinya arus listrik induksi yang arahnya berubah-ubah. Arus yang berubah-ubah tersebut disebut dengan arus AC (*alternating current*) atau arus bolak balik. Sumber listrik AC banyak dipakai untuk keperluan sehari-hari. Prinsip kerja dari arus AC banyak digunakan dalam generator.

Berbeda dengan arus AC, arus DC (*direct current*) merupakan arus listrik searah. Arus DC disebut arus searah karena arus yang mengalir hanya searah, bisa negatif (-), bisa juga positif (+) maka dari itu arus DC ditandai dengan arus negatif dan positif. Prinsip DC ini lebih banyak dihasilkan oleh sel listrik/baterai (Anggraeni, 2010).

2.9. Pengaruh Jenis Beban (AC/DC) Terhadap Efisiensi Kinerja

Tegangan DC memiliki polaritas yang tetap yakni positif (+), nol (0), dan negatif (-). Tegangan DC tidak memiliki *phase* dan arus yang mengalir pun selalu dari polaritas yang lebih tinggi ke polaritas yang lebih rendah yakni dari positif ke negatif, dari positif ke nol, atau dari nol ke negatif karena polaritas nol lebih tinggi dari polaritas negatif. Berbeda dengan tegangan DC, tegangan AC memiliki dua polaritas yang berubah-ubah dari polaritas yang lebih tinggi ke polaritas yang lebih rendah dalam satuan waktu. Dengan demikian tegangan AC memiliki *phase* dan frekuensi misalnya 50-60 Hz, polaritas tersebut diukur dari titik netral. Jenis arus berupa AC dan DC mempengaruhi efisiensi kinerja dan juga daya yang dihasilkan. Arus bolak-balik yang dihasilkan AC dapat diperbesar atau diperkecil dengan menggunakan trafo, hal ini memungkinkan untuk energi listrik tegangan tinggi serta pendistribusian daya listrik sesuai tegangan yang dikehendaki. Arus searah yang dihasilkan DC dapat disalurkan langsung ke dalam suatu beban (Syamsudin, 2012).

Sumber arus listrik DC mudah untuk dibawa kemana-mana sehingga listrik DC lebih banyak digunakan untuk peralatan elektronika, sedangkan arus AC berasal dari PLN sehingga tidak mudah dipindah-pindah. Dalam Pembangkit Listrik Tenaga Surya *inverter* atau konverter yang digunakan oleh DC dapat mempengaruhi keluaran daya AC. Kualitas arus keluaran dari suatu sistem merupakan hal yang penting dijaga, dimana salah satunya dengan cara menjaga kestabilan kualitas arus keluaran dari *inverter*. Arus keluaran inverter mengalami gangguan akibat timbulnya *ripple* (riak) ketika penyearahan gelombang DC

menjadi gelombang bulak-balik pada AC, sehingga mempengaruhi arus keluaran dari sistem. Gangguan ini mengakibatkan gelombang arus keluaran terdistorsi (menyimpang) disebabkan timbulnya *ripple* di dalam tegangan masukan inverter tersebut (Riawan, 2010).