

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Sebelumnya

Penelitian sebelumnya telah dilakukan mengenai CPV dilakukan oleh **Hermenean, dkk (2009)**. Penelitian ini menggunakan metode numerik yaitu mengenai CPV-*mirror system* dengan cermin datar sebagai optiknya. Penelitian ini menggunakan metode numerik mengenai pemodelan geometric pada CPV-*mirror system* dengan variasi sudut antara cermin datar dengan *photovoltaic (inclination angle)*, sudut datang sinar matahari dengan bidang datar *photovoltaic (incidence angle)*, ratio L2/L1 dan *tracking system* yang menghasilkan kesimpulan bahwa dari ketiga variasi di atas yang paling berpengaruh pada peningkatan kinerja *photovoltaic* adalah *inclination angle* yaitu antara 50°-65°.

Pada tahun 2010 penelitian sebelumnya oleh Hermenean dilanjutkan dengan variasi lebar cermin sebesar 1 dan ½ dari lebar bidang *photovoltaic* diletakkan pada kedua sisi bidang *photovoltaic* dengan variasi kemiringan bidang cermin terhadap *photovoltaic* sebesar 50°;60°;65°, serta *incidence angle* sebesar 15°;7,5°;3,75°. Sistem *photovoltaic* di sini juga menggunakan *tracking system* untuk mengikuti arah gerak matahari. Metode yang digunakanpun sama dan menghasilkan kesimpulan bahwa kemiringan bidang cermin datar terhadap bidang *photovoltaic* yang paling bagus dengan variasi dan kondisi variabel diatas yaitu sebesar 65°. Pada tahun 2012 Bahrrudin melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi ratio lebar cermin terhadap efisiensi *photovoltaic mirror system* dimana variasi lebar cermin yang digunakan adalah 0.75;1;1,25 dengan sudut cermin 65°. Dari penelitian tersebut diperoleh variasi dengan efisiensi tertinggi adalah ratio lebar cermin 1.25.

#### 2.2 Matahari

Matahari adalah salah satu benda langit berupa gumpalan gas yang sangat panas dengan diameter  $1,39 \times 10^9$  m dan berjarak rata-rata dengan bumi sekitar  $1,5 \times 10^{11}$  m. Temperatur permukaan matahari sebesar 5777 K, sedangkan temperatur bagian inti matahari mencapai  $8 \times 10^6$  sampai  $40 \times 10^6$  K dan densitasnya 100 kali lebih besar dari air. Matahari memancarkan energi berupa gelombang elektromagnetik yaitu cahaya dan panas yang dihasilkan oleh reaksi fusi yang terjadi di inti matahari. Reaksi fusi terjadi akibat gaya grafitasi matahari yang begitu besar di dalam inti sehingga mampu

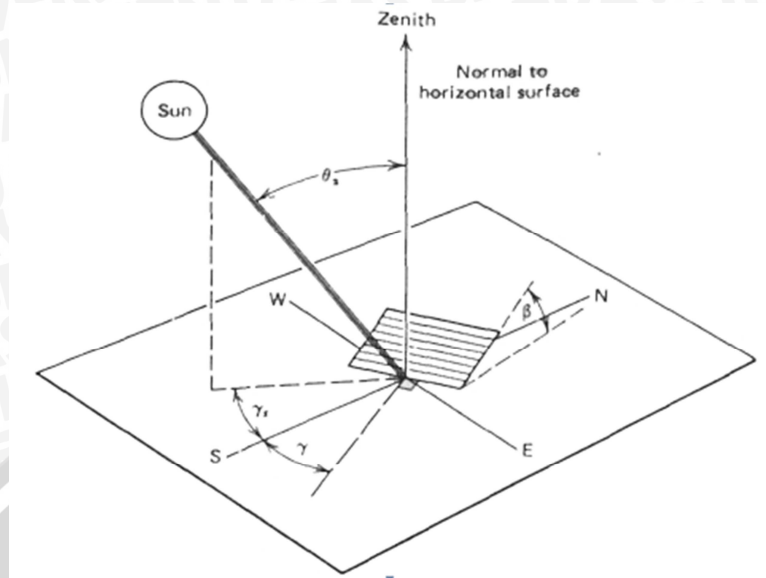
membuat 2 atom hidrogen berfusi menjadi 1 atom helium dan melepaskan energi yang begitu besar. (Duffie & Beckman,1991)

Cahaya adalah energi berbentuk gelombang elektromagnetik yang kasat mata dengan panjang gelombang sekitar 380–750 nm. Pada bidang fisika, cahaya adalah radiasi elektromagnetik, baik dengan panjang gelombang kasat mata maupun yang tidak. Cahaya adalah paket partikel yang disebut *Photon* yang mengandung energi. Radiasi cahaya matahari yang sampai kebumi merupakan sumber energi bagi kehidupan di bumi.

Akibat dari kondisi atmosfer bumi, cahaya matahari yang sampai ke bumi terbagi menjadi radiasi langsung dan radiasi baur. Radiasi langsung (*beam radiation*) merupakan cahaya yang diterima langsung dari matahari tanpa tersebar oleh atmosfer. Sedangkan radiasi baur (*diffuse radiation*) adalah radiasi cahaya matahari yang arah datangnya telah dibelokkan oleh atmosfer. Dan gabungan dari radiasi langsung dan radiasi baur disebut *total radiation* (Duffie & Beckman,1991).

Hubungan antara arah sinar matahari langsung dengan suatu bidang datar dapat dijelaskan pada beberapa pengertian berikut:

- *Latitude angle* ( $\phi$ ), posisi lintang utara dan selatan di bumi, dalam hal ini utara bernilai positif;  $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ .
- *Declination angle* ( $\delta$ ), sudut arah sinar matahari saat tengah hari pada bidang equator ;  $(-23,45^\circ < \delta < +23,45^\circ)$
- *Slope angle* ( $\beta$ ), sudut kemiringan bidang datar terhadap bidang horizontal;  $(0^\circ < \beta < 180^\circ)$ .
- *Hour angle* ( $\omega$ ), sudut lintasan sinar matahari langsung setiap saat terhadap meridian lokasi, ini berubah  $15^\circ$  per jam; pagi +, sore -.
- *Angle of incidence* ( $\theta$ ), sudut sinar datang matahari langsung, terhadap garis tegak lurus bidang normal.
- *Zenith angle*  $\theta_z$ , sudut antara garis vertical terhadap garis arah datang matahari atau sudut datang radiasi langsung terhadap bidang horizontal.
- *Solar altitude angle* ( $\alpha_s$ ), sudut antara garis horizontal terhadap terhadap matahari, kebalikan dari *Zenith angle*.



Gambar 2.1 Konfigurasi sudut datang radiasi pada bidang kolektor  
 Sumber: Duffie & Beckman (1991:14)

Dalam menangkap radiasi matahari tersebut diperlukan pengetahuan mengenai sudut datang sinar matahari yang mana selalu berubah berdasarkan pergerakan matahari. Agar penangkapan lebih efektif maka kolektor harus tepat menghadap sinar matahari. Pada kolektor yang digerakkan poros horizontal utara-selatan dan secara berkelanjutan mengikuti peredaran matahari maka harus menentukan *slope angle* seperti pada persamaan 2-1. Berikut langkah untuk mencari *slope angle* dan *hours angle*.

$$\sin(\alpha) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \quad \text{(Kalogirou, 2009:58) (2-2)}$$

Keterangan:

- $\alpha$  = Solar altitude angle
- $L$  = Latitude angle
- $\delta$  = Declination angle
- $h$  = Hours angle

dimana

$$\delta = 23,5 \sin\left(360 \frac{284 + N}{365}\right) \quad \text{(Kalogirou, 2009:58) (2-3)}$$

Keterangan :

- $\delta$  = Declination angle
- $N$  = Day number

Selanjutnya menggunakan persamaan berikut

$$\phi + \alpha = 90^\circ \quad \text{(Kalogirou, 2009:58) (2-4)}$$



Keterangan :

$\Phi$  = Solar zenith angle

Setelah didapatkan *solar azimuth angle* maka dengan menggunakan prinsip *full tracking* akan didapat *slope angle*. Selain itu jika ingin menggunakan *hours angle* maka kita dapat menghitungnya dengan persamaan 2-5.

$$H = (AST - 12)15 \quad (\text{Kalogirou, 2009:57}) \quad (2-5)$$

Keterangan:

AST = Apparent solar time

Selanjutnya untuk memperoleh nilai azimuth angle dapat dipergunakan persamaan 2-6.

$$\sin(z) = \frac{\cos(\delta) \sin(h)}{\cos(\alpha)} \quad (\text{Kalogirou, 2009:58}) \quad (2-6)$$

Keterangan :

$z$  = Azimuth angle [ $^{\circ}$ ]

*Incident Angle* ( $\theta$ ) atau sudut datang sinar matahari adalah sudut antara sinar matahari dan normal pada permukaan. Persamaan untuk *Incident Angle* ini adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(L)\sin(\delta)\cos(\beta) - \cos(L)\sin(\delta)\cos(Zs) \\ & + \cos(L)\cos(\delta)\cos(\beta) + \sin(L)\cos(\delta)\cos(h)\sin(\beta)\cos(Zs) \\ & + \cos(\delta)\sin(h)\sin(\beta)\sin(Zs) \quad (\text{Kalogirou, 2009:64}) \quad (2-7) \end{aligned}$$

Keterangan

$\beta$  = Slope angle

$Zs$  = Azimuth Angle

$h$  = Hour Angle

$L$  = Local Latitude

$\delta$  = Local Degree

Dalam perhitungan waktu yang berdasarkan gerakan matahari dikenal dengan nama *solar time* yaitu waktu berdasarkan posisi matahari relatif terhadap suatu lokasi di bumi, dimana pada jam 12.00 posisi matahari persis melewati meridian lokasi (garis *zenith*). Perhitungan solar time dapat dicari melalui persamaan 2-7.

$$AST = LST + ET \pm 4(SL - LL) - DS \quad (\text{Kalogirou, 2009:51}) \quad (2-8)$$

Keterangan :

AST = Apparent solar time

LST = Local standard time

- ET = Equation of time
- SL = Standard longitude
- LL = Local longitude
- DS = Daily Saving

Jika lokasi berada pada bujur timur grenwich maka pada Persamaan waktu (E) dapat kita hitung berdasarkan hari ke-n dalam satu tahun seperti pada persamaan 2-8.

$$ET = 9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B) \quad (\text{Kalogirou, 2009:50}) \quad (2-9)$$

Dimana

$$B = (N - 81) \frac{360}{364} \quad (\text{Kalogirou, 2009:51}) \quad (2-10)$$

Keterangan:

N = Day number

Sedangkan nilai hari ke-N dapat kita ketahui melalui perhitungan hari keberapa dalam satu tahun yaitu  $1 \leq n \leq 365$ , seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.1.

Sedangkan nilai hari ke-n dapat kita ketahui melalui perhitungan hari keberapa dalam satu tahun yaitu  $1 \leq n \leq 365$ , seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel 2.1 Keterangan hari ke-n selama satu tahun serta sudut arah sinar matahari saat tengah hari pada bidang ekuator

Month	Day number	Average day of the month		
		Date	N	$\delta$ (deg.)
January	$i$	17	17	-20.92
February	$31 + i$	16	47	-12.95
March	$59 + i$	16	75	-2.42
April	$90 + i$	15	105	9.41
May	$120 + i$	15	135	18.79
June	$151 + i$	11	162	23.09
July	$181 + i$	17	198	21.18
August	$212 + i$	16	228	13.45
September	$243 + i$	15	258	2.22
October	$273 + i$	15	288	-9.60
November	$304 + i$	14	318	-18.91
December	$334 + i$	10	344	-23.05

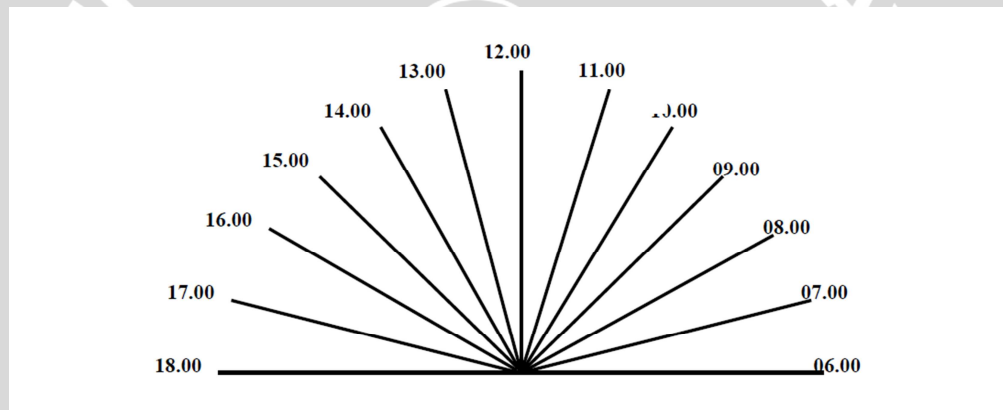
Sumber: Kalogirou (2009:60)

### 2.2.1 Bumi terhadap matahari

Bersamaan dengan revolusi bumi bumi pun berputar mengelilingi sumbunya (porosnya). Perputaran bumi pada porosnya disebut rotasi. Posisi matahari berubah setiap saat karena rotasi bumi. Bumi berotasi sebesar  $360^\circ$  dari timur menuju barat dengan periode rotasi 24 jam. Dari data tersebut dapat diambil suatu ketetapan dalam satuan waktu bahwa setiap  $1^\circ$  busur ditempuh dalam waktu :

$$\times(24 \times 60) = 4 \text{ menit}$$

Dari persamaan diatas dapat diketahui bahwa setelah menyelesaikan sekali rotasi, tempat tempat di bumi telah menjalani  $360^\circ$  bujur. Oleh karena  $360^\circ$  itu ditempuh dalam selama 24 jam, tiap satu derajat ditempuh selama empat menit. Maka setiap bumi berotasi sebesar  $15^\circ$  bujur akan ditempuh dalam waktu 1 jam



Gambar 2.2 : Timing waktu setiap  $15^\circ$

Sumber : Steven (1997:18)

### 2.2.2 Sifat-sifat Cahaya

Karena cahaya merupakan sebuah gelombang, maka cahaya mempunyai sifat-sifat sebuah gelombang sebagai berikut:

1. Memiliki arah rambat yang tegak lurus arah getar (transversal)
2. Memiliki energi dalam bentuk *photon*
3. Dipancarkan dalam bentuk energi.
4. Dapat mengalami pemantulan, pembiasan, interferensi, difraksi dan polarisasi.

Dalam penelitian ini memanfaatkan sifat cahaya matahari yaitu sebagai *photon* yang mengandung energi. Energi cahaya matahari tergantung pada panjang gelombang cahaya itu sendiri dan dapat dirumuskan sebagai berikut:



$$E_{\lambda} = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{Luque \& Hegedus, 2003:61}) (2-11)$$

Keterangan:

- E = Energi radiasi cahaya matahari [J]  
 h = Konstanta *Plank* [6,626068 X 10<sup>-23</sup> m<sup>2</sup> kg/s]  
 c = Kecepatan cahaya [m/s]  
 λ = Panjang gelombang [m]

Untuk menyatakan kandungan energy radiasi cahaya matahari yang terpancar tiap satuan waktu pada luasan tertentu lebih dikenal dengan daya persatuan luas (W/m<sup>2</sup>). Beberapa alat digunakan untuk mengukur radiasi cahaya matahari yang sampai di permukaan bumi diantaranya *pyrheliometer*, *lux meter* dan *pyranometer*. Yang paling umum digunakan adalah *pyranometer* dengan keluaran nilai radiasi cahaya matahari pada satuan W/m<sup>2</sup>.

Pada penelitian ini dilakukan eksperimen mengenai pemanfaatan energi cahaya matahari untuk dikonversikan ke listrik menggunakan *photovoltaic* dan bantuan cermin datar untuk mengoptimalkan kinerja *photovoltaic*.

### 2.2.3 Cermin

Salah satu sifat cahaya adalah dapat dipantulkan. Sifat ini banyak diaplikasikan untuk membantu pekerjaan manusia untuk memantulkan bayangan ataupun sinar. Cermin sendiri merupakan permukaan yang licin dan dapat menciptakan pantulan cahaya. Kebanyakan cermin modern terdiri dari lapisan tipis aluminium disalut dengan kepingan kaca. Cermin ini disebut *back silvered*, di mana permukaan pemantul dilihat melalui kepingan kaca. Pelapisan cermin dengan kaca membuat cermin tahan lama, tetapi mengurangi kualitas cermin karena tambahan biasan permukaan depan kaca. Cermin seperti ini membalikkan sekitar 80% dari cahaya yang datang. Bagian belakang cermin sering dicat hitam sepenuhnya untuk melindungi logam dari pengikisan.

Cermin sepuh depan memantulkan 90% hingga 95% dari cahaya datang. Karena logam berkarat dengan adanya oksigen dan kelembapan. Cermin sepuh depan perlu diganti permukaannya secara berulang untuk mempertahankan kualitas. Cara lain adalah menggunakan tempat vakum untuk menaruh cermin ini.

Permukaan cermin kadang diberikan pelapisan tambahan (*overcoating*) untuk mengurangi degradasi permukaan dan meningkatkan kepantulan pada bagian-bagian *spektrum* yang akan digunakan. Misalnya, cermin *aluminum* biasanya dilapisi dengan

*magnesium florida*. Pemantulan sebagai fungsi panjang gelombang bergantung kepada ketebalan pelapisan dan bagaimana lapisan tersebut diletakkan.

Cermin dapat bekerja dengan prinsip pemantulan cahaya. Ada tiga macam jenis cermin, yaitu ada cermin datar, cermin cekung, dan cermin cembung (Sari, 2007). Pada penelitian saya kali ini saya menggunakan menggunakan cermin datar.

➤ Cermin Datar

Cermin datar adalah sebuah cermin yang permukaannya pantulnya berupa sebuah bidang datar. Cermin datar memiliki sifat-sifat sebagai berikut.

- jarak bayangan ke cermin sama dengan jarak benda ke cermin
- tinggi bayangan yang berbentuk sama dengan tinggi bendanya
- bayangan bersifat maya.

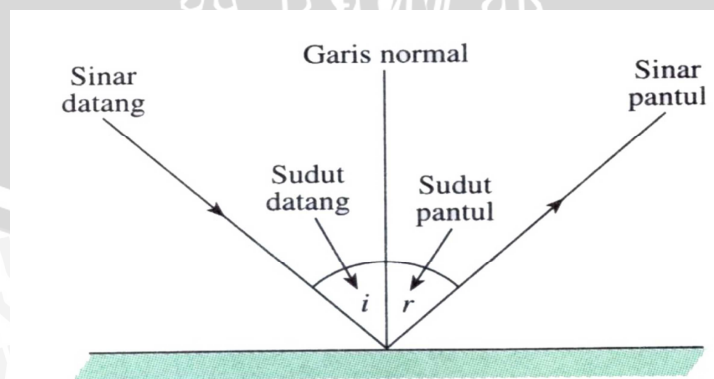
Di dalam cermin datar terdapat empat sifat bayangan, yaitu :

- maya
- sama besar dengan bidangnya
- sama tegak dan menghadap berlawanan arah terhadap bendanya
- jarak benda terhadap cermin sama dengan jarak bayangan terhadap cermin

Sinar yang datang mengenai cermin datar disebut dengan sinar datang. Sinar yang dipantulkan oleh cermin datar disebut sinar pantul. Sedangkan garis yang tegak lurus cermin disebut garis normal. Bunyi hukum pemantulan cahaya adalah sebagai berikut :

1. Sinar datang, sinar pantul, dan garis normal berpotongan pada satu titik dan terletak pada satu bidang datar
2. Sudut datang sama dengan sudut pantul

Sifat-sifat pemantulan cahaya pada cermin datar dapat dilihat pada gambar 2.3.

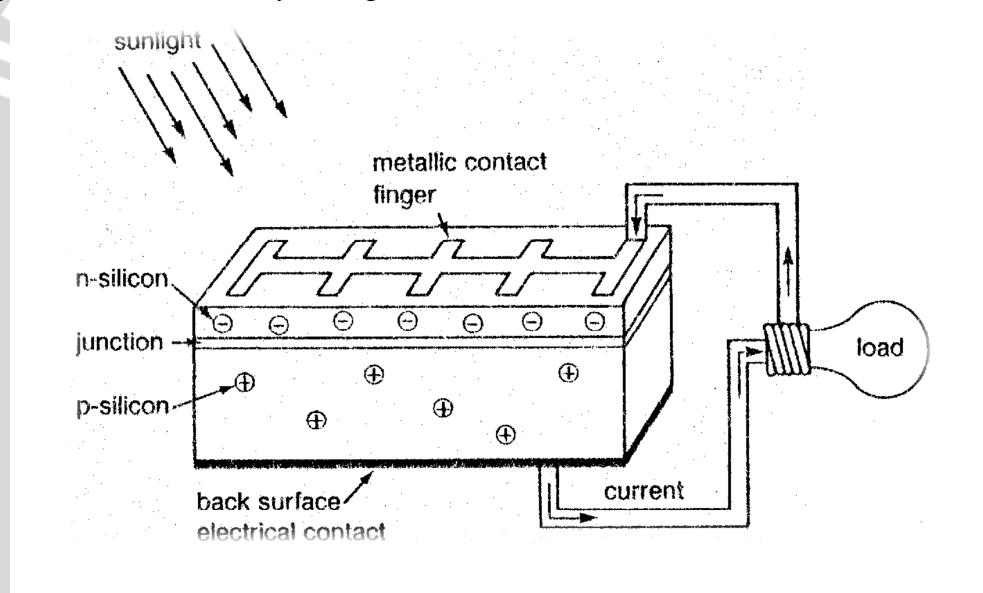


Gambar 2.3 Gambar sifat pemantulan cahaya pada cermin datar  
Sumber: Sari (2007:5)



### 2.3 Photovoltaic

.*Photovoltaics* adalah sebuah alat semikonduktor yang terdiri dari sebuah dioda P-N, di mana saat sel ini terkena cahaya matahari (*photon*) mampu menciptakan energi listrik. Perubahan ini disebut efek *photovoltaic*. Efek *photovoltaic* adalah fenomena dimana suatu sel *photovoltaic* dapat menyerap energi cahaya dan merubahnya menjadi energi listrik. efek *photovoltaic* didefinisikan sebagai suatu fenomena munculnya voltase listrik akibat dua kontak elektroda yang dihubungkan dengan sistem padatan atau cairan saat diexpose dibawah energi cahaya. energi solar atau radiasi cahaya biasanya terdiri dari *foton foton* yang memiliki tingkat energi. perbedaan tingkat energi dari *foton* cahaya inilah yang akan menentukan panjang gelombang dari spektrum cahaya. ketika *foton* mengenai permukaan suatu sel pv, maka *foton* tersebut dapat dibiarkan, diserap, ataupun diteruskan menembus sel pv. *foton* yang terserap oleh sel pv inilah yang akan memicu timbulnya energi listrik.



Gambar 2.4 Cara kerja *photovoltaic*

Sumber: Steven (1997:18)

Sel pv adalah suatu perangkat yang mengkonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik. Sistem sel pv pada dasarnya terdiri dari pn junction atau ikatan antara sisi positif dan negatif didalam sebuah sistem semikonduktor. Sel pv juga dikenal dengan nama *solar cell* atau sel surya. Pada dasarnya mekanisme konversi energi cahaya menjadi listrik terjadi akibat adanya perpindahan elektron bebas didalam suatu atom. konduktivitas elektron atau kemampuan transfer elektron dari suatu material

terletak pada banyaknya elektron valensi dari suatu material sel surya pada umumnya menggunakan material semikonduktor sebagai penghasil elektron bebas.

Material semikonduktor adalah suatu padatan (solid) dan seperti logam, konduktivitas elektriknya juga ditentukan oleh elektron valensinya. Namun berbeda dengan logam yang konduktivitasnya menurun dengan kenaikan temperatur, material semikonduktor konduktivitasnya akan meningkat secara signifikan. Ketika foton dari suatu sumber cahaya menumbuk suatu elektron valensi dari atom semikonduktor, hal ini mengakibatkan suatu energi yang cukup besar untuk memisahkan elektron tersebut terlepas dari struktur atomnya. Elektron yang terlepas tersebut menjadi bebas bergerak dalam bidang kristal dan elektron tersebut menjadi bermuatan negatif dan berada pada daerah pita konduksi dari material semikonduktor.

Sementara itu akibat hilangnya elektron mengakibatkan terbentuknya suatu kekosongan pada struktur kristal yang disebut hole dan bermuatan positif. Daerah semikonduktor dengan elektron bebas bersifat negatif bertindak sebagai donor elektron. Daerah ini disebut negatif type (n-type). Sedangkan daerah semikonduktor dengan hole, bersifat positif dan bertindak sebagai penerima (acceptor) elektron. Daerah ini disebut dengan positif type (p-type). Ikatan dari kedua sisi positif dan negatif (p-n junction) menghasilkan energi listrik internal yang akan mendorong elektron bebas dan hole untuk bergerak ke arah yang berlawanan. Elektron akan bergerak menjauhi sisi negatif, sedangkan hole bergerak menjauhi sisi positif. Ketika p-n junction ini dihubungkan dengan sebuah beban (lampu) maka tercipta sebuah arus listrik

dihubungkan dengan *inverter* untuk diubah arusnya menjadi AC sesuai kebutuhan rumah tangga. Beberapa keunggulan *photovoltaic* diantaranya yaitu:

1. Sumber energinya sangat luas dan tidak terbatas
2. Tidak menghasilkan emisi dan radiasi yang berbahaya (tidak ikut menyumbang pengaruh pada pemanasan global)
3. Biaya operasi yang murah
4. Tidak membutuhkan sistem mekanik yang rumit
5. Tidak berbahaya dan tahan lama

Sekarang telah banyak jenis *photovoltaic* yang beredar. Tipe arus dan penjelasan mengenai *photovoltaic* yang sedang diteliti dan dikembangkan, diantaranya sebagai berikut.



➤ *Monocrystalline silicon cells*

*Photovoltaic* ini tiap *cell*-nya terbuat dari *monocrystalline silicon*. Di dalam *cell*, tersusun atom-atom silikon kristal tunggal yang berkelanjutan tanpa cacat dan terjaga kemurniannya. Keuntungan utama dari tipe ini adalah efisiensinya yang tinggi sekitar 15%. Dan kelemahan dari *photovoltaic* ini adalah proses manufakturnya rumit dan membutuhkan biaya tinggi dibanding teknologi lain.

➤ *Multicrystalline silicon cells*

*Multicrystalline cells* diproduksi menggunakan banyak butir dari *monocrystalline silicon*. Pada proses manufakturnya, leburan *polycrystalline silicon* di cetak menjadi ingot, sesudah itu dipotong menjadi *wafer* yang tipis dan dirakit menjadi modul *photovoltaic*. *Multicrystalline silicon cells* lebih murah dibanding dengan memproduksi *monocrystalline* karena proses manufakturnya yang mudah. Meskipun begitu efisiensinya lebih rendah sekitar 12%.

➤ *Amorphous silicon*

Pada umumnya yang membedakan *amorphous silicon* dengan tipe sebelumnya adalah pada struktur kristalnya, *amorphous silicon cells* terbentuk dari layer homogen yang tipis. *Cell* ini menyerap cahaya lebih efektif dari pada *crystalline silicon*. Keuntungan paling besar dari *amorphous silicon* adalah dapat tempatkan pada jangkauan yang luas pada bagian modul, strukturnya rigid dan fleksibel. Kekurangan dari *cell* ini adalah efisiensinya yang rendah sekitar 6%.

➤ *Thermophotovoltaic*

*Photovoltaic* jenis ini memanfaatkan radiasi inframerah dan juga radiasi panas. *Thermophotovoltaic* (TPV) yang lengkap terdiri dari bahan bakar, tempat pembakaran, radiator, sebuah mekanisme penangkap panjang gelombang *photon*, PV *cell*, sistem pembalik panas. Peralatan TPV menkonversikan radiasi menggunakan cara yang sama dengan *photovoltaic* lain. Perbedaannya ada pada temperatur radiator dan geometri dari sistem. Pada sistem *photovoltaic* secara umum memanfaatkan radiasi matahari pada temperatur 6000K dengan jarak  $15 \times 10^6$  km. Pada TPV radiasi diterima pada jarak yang dekat hanya beberapa centimeter dengan temperatur yang lebih rendah 1300-1800 K. Meskipun begitu energi yang diterima oleh *non-concentrator photovoltaic* hanya sekitar  $0,1 \text{ W/m}^2$  sedangkan TPV bisa mencapai  $5-30 \text{ W/m}^2$  tergantung temperatur radiator.

Tiap tipe *photovoltaic* mempunyai efisiensi yang berbeda-beda yang dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari yang sampai pada permukaan *photovoltaic*



dan juga jenis *photovoltaic* itu sendiri. Efisiensi *photovoltaic* dapat dicari dengan persamaan 2-6 seperti berikut.

$$\eta_{\max} = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{I_{\max} V_{\max}}{AG_t} \quad (\text{Kalogirou, 2009: 498}) \quad (2-12)$$

Keterangan:

$\eta_{\max}$  = Efisiensi maksimum *photovoltaic*

$P_{\max}$  = Daya listrik maksimum *photovoltaic* [Watt]

$P_{in}$  = Daya radiasi matahari [Watt]

$I_{\max}$  = Arus listrik maksimum *photovoltaic* [Ampere]

$V_{\max}$  = Tegangan listrik maksimum *photovoltaic* [Volt]

$A$  = Luas bidang *photovoltaic* [m<sup>2</sup>]

$G_t$  = Radiasi matahari [W/m<sup>2</sup>]

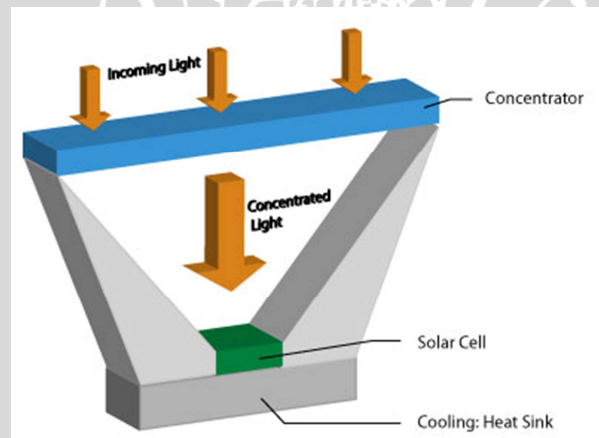
Teknologi *photovoltaic* masih perlu dikembangkan karena masih menyimpan potensi peningkatan efisiensi yang tinggi. Salah satu cara untuk meningkatkan kinerja *photovoltaic* yaitu dengan prinsip *Concentrating Solar Power*. *Concentrating Solar Power* atau biasa disebut CSP adalah sistem yang menggunakan bantuan optik untuk mengumpulkan sinar matahari, atau energi panas matahari, ke titik tertentu. Listrik dihasilkan ketika cahaya terkonsentrasi diubah menjadi panas yang mendorong mesin panas (biasanya turbin uap) yang terhubung ke generator tenaga listrik. CSP digunakan untuk menghasilkan listrik disebut juga *solar thermoelectricity*, biasanya dihasilkan melalui uap yang dihasilkan oleh pemanasan terpusat oleh CSP. Konsentrator surya yang digunakan dalam sistem CSP dapat juga digunakan untuk menyediakan pemanasan atau pendinginan pada proses industri.

Teknologi CSP ada dalam empat bentuk umum, yaitu parabola, *stirlings disc*, linier reflektor fresnel, dan menara tenaga surya. Meskipun sederhana, teknologi teknologi CSP mampu meningkatkan efisiensi jauh dari teoritis tanpa CSP. Contohnya, konsentrasi melalui sistem parabola sekitar 1/3 dari maksimum teoritis untuk sudut penerimaan yang sama yaitu, untuk toleransi sama untuk keseluruhan sistem. Mendekati maksimum teoritis dapat dicapai dengan menggunakan konsentrator lebih rumit berdasarkan pada peralatan optik yang digunakan. Berbagai jenis konsentrator menghasilkan daya puncak yang berbeda dan bervariasi karena perbedaan dalam cara mengikuti arah gerak matahari dan cahaya fokus.

Teknologi CSP juga digunakan untuk meningkatkan efisiensi *photovoltaic* dengan memperbanyak radiasi sinar matahari yang mengenai *photovoltaic*, sistem ini biasa disebut *Concentrating Photovoltaics* (CPV). Prinsip kerja CPV adalah memfokuskan sinar matahari ke *photovoltaic* dengan bantuan sebuah perangkat optik, dengan terkonsentrasinya sinar matahari ke fokusnya maka jumlah flux yang diterima oleh *photovoltaic* bisa meningkat. Teknologi ini memiliki tiga keunggulan kompetitif:

- Membutuhkan sedikit material *photovoltaic* yang harus dipasang untuk menangkap sejumlah sinar matahari yang digunakan untuk *photovoltaic* yang tidak terkonsentrasi.
- Menambah efisiensi tiap *cell photovoltaic* yang dipakai sampai 30%, sekaligus membutuhkan ruangan yang tidak terlalu lebar.
- Sistem optik ini dapat mengurangi *standart* material yang digunakan untuk membuat sel *photovoltaic*. Selain itu, optik yang digunakan jauh lebih murah dari pada sel *photovoltaic*.

CPV lebih menggunakan radiasi langsung dari pada radiasi baur. Oleh karena itu tetap diperlukan sistem pelacakan posisi matahari sehingga sistem ini dapat menangkap sinar langsung secara optimal.



Gambar 2.5 *Concentrating Photovoltaics*(CPV)

Sumber : [Anonymous b, \(2012\)](#)

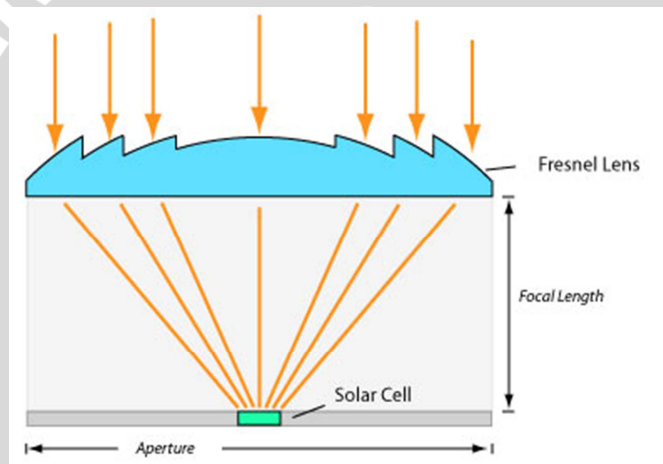
Berikut adalah beberapa contoh teknologi CPV. Sebagian besar konsentrator memakai teknologi ini atau meniru konsep dasar yang diterapkan pada konsentrator ini.

### 1. Lensa Fresnel

Sebuah lensa Fresnel, dinamakan berdasarkan seorang fisikawan Perancis, terdiri dari beberapa bagian dengan sudut yang berbeda, sehingga mengurangi berat dan ketebalan dibandingkan dengan lensa standar. Dengan lensa fresnel, memungkinkan sistem CPV mencapai panjang fokus yang pendek dan aperture besar sementara menjaga cahaya lensa tetap terfokus.

Lensa fresnel dapat dibangun dalam bentuk lingkaran untuk menyediakan titik fokus dengan *concentration ratio* sekitar 500, atau dalam bentuk silinder untuk memberikan fokus sejalan dengan rasio konsentrasi yang lebih rendah.

Dengan rasio konsentrasi tinggi dalam focus lensa fresnel, memungkinkan kita untuk menggunakan *multi-junction sel photovoltaic* dengan efisiensi maksimum. Dalam CPV lebih umum untuk menggunakan *silikon* efisiensi tinggi.



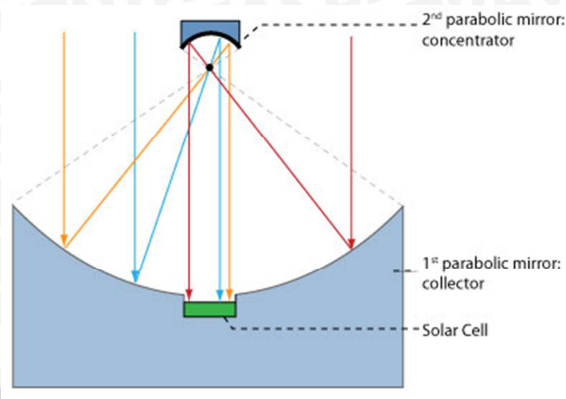
Gambar 2.6 CPV tipe lensa fresnel  
Sumber : [Anonymous b, \(2012\)](#)

### 2. Cermin Parabolic

Di sini, semua cahaya paralel sampai pada *photovoltaic* melalui dua cermin pengkonstrasi. Cermin pertama sebagai kolektor menampung sebanyak mungkin sinar matahari dan mengkonstrasikannya pada cermin kedua. Cermin kedua sebagai konsentrator yang jauh lebih kecil, juga merupakan cermin parabola dengan titik fokus yang sama dan kemudian meneruskan cahaya ke *photovoltaic* yang berada pada tengah cermin pertama.

Keuntungan dari konfigurasi ini adalah bahwa hal itu tidak memerlukan lensa optik. *Parabolic mirror* telah mencapai *concentration ratio* sebesar 500.





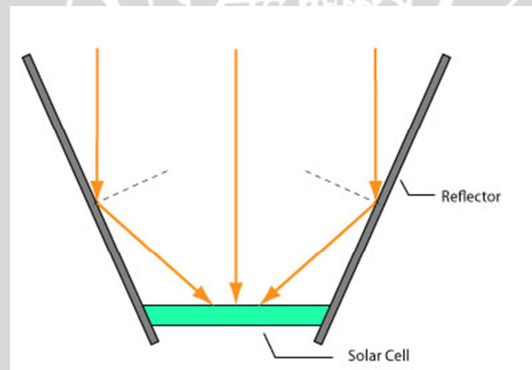
Gambar 2.7 CPV tipe cermin parabolik

Sumber : [Anonymous b, \(2012\)](#)

### 3. Reflektor (*mirror sistem*)

Modul reflektor merupakan *low concentration photovoltaic* dimana menggunakan cermin untuk mengkonsentrasikan sinar matahari ke sel surya. Seringkali, cermin ini dibuat dengan silikon tertutup logam.

Sudut cermin tergantung pada sudut kemiringan dan lintang serta desain modul *concentrating ratio* berkisar 1,5-2,5. *Low concentration photovoltaic* biasanya terbuat dari *silikon monocrystalline*. Pendinginan tidak diperlukan pada sistem ini karena panas yang dihasilkan masih sangat rendah.



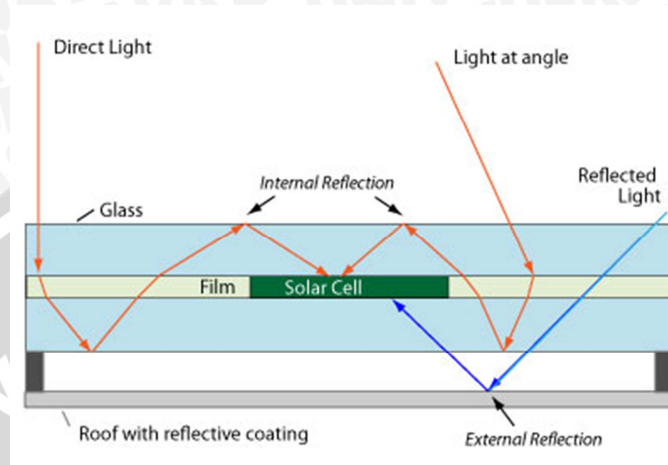
Gambar 2.8 CPV tipe reflektor

Sumber : [Anonymous b, \(2012\)](#)

### 4. *Luminescent Concentrators*

Dalam *luminescent concentrators*, cahaya dibiaskan dalam film bercahaya dan kemudian disalurkan ke bahan *photovoltaic*. Ini adalah teknologi yang sangat menjanjikan, karena tidak memerlukan lensa optik atau cermin. Selain itu, juga bekerja dengan cahaya difus dan karenanya tidak perlu pelacakan. *Concentrating ratio* yang dihasilkan sekitar 3.

Selanjutnya, konsentrator ini tidak membutuhkan pendingin apapun. Lapisan film dapat dibuat sedemikian rupa sehingga *wavelengths* yang tidak dapat dikonversi oleh *photovoltaic*nya akan melewatinya. Oleh karena itu, *wavelengths* yang tidak diinginkan akan hilang.

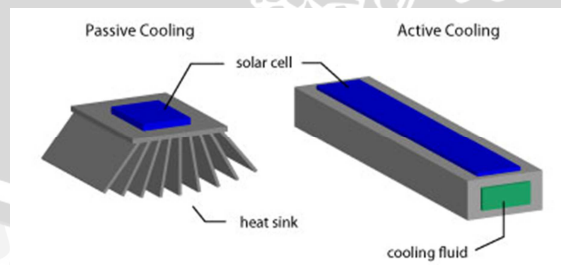


Gambar 2.9 CPV tipe *luminescent concentrators*  
Sumber : [Anonymous b, \(2012\)](#)

## 5. Sistem Pendinginan

Kebanyakan sistem CPV memerlukan pendinginan.

- Pendinginan pasif  
Di sini sel ditempatkan pada *cladded cermaic substrate* dengan konduktivitas termal yang tinggi.
- Pendingin aktif  
Pada pendingin ini menggunakan *cooling fluid* sebagai cairan pendingin, mampu pendinginan dari 1.700° C sampai 100° C



Gambar 2.10 Sistem pendinginan *photovoltaic*  
Sumber : [Anonymous b, \(2012\)](#)

Dengan terintegrasinya *photovoltaic* dan cermin pada desain geometri yang tepat akan menambah radiasi cahaya matahari yang jatuh pada bidang *photovoltaic*,

dengan begitu akan meningkatkan arus listrik DC yang dihasilkan *photovoltaic* dibandingkan dengan *photovoltaic* tanpa tambahan cermin.

Peningkatan jumlah radiasi matahari yang diterima oleh sistem CPV juga dipengaruhi oleh proses penyerapan radiasi matahari oleh *photovoltaic* yang akan dijelaskan pada subbab selanjutnya.

### 2.3.1 Penyerapan Radiasi Matahari

Faktor utama yang mempengaruhi output dari sistem *photovoltaic* adalah penyerapan radiasi matahari yang jatuh pada permukaan *photovoltaic*. Proses penyerapan radiasi matahari oleh kolektor juga dipengaruhi beberapa faktor yaitu *incident radiation*, *air mass*, dan *incident angle*. Pada proses penyerapan radiasi matahari pada *photovoltaic* meliputi penyerapan *beam radiation*, *diffuse radiation* dan *ground-reflected radiation* seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.13.

$$S = (\tau\alpha)_n M \left\{ G_B R_B K_{\theta,B} + G_D K_{\theta,D} \left[ \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right] + G_{pG} K_{\theta,G} \left[ \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right] \right\}$$

...(Kalogirou, 2009: 498) (2-13)

Keterangan:

- M = *Air mass modifier*
- ( $\tau\alpha$ )<sub>n</sub> = *Normal incident*
- G<sub>B</sub> = *Beam solar radiation*[W/m<sup>2</sup>]
- R<sub>B</sub> = *Tilt surface*(*beam radiation*)
- K<sub>θ,β</sub> = *Incidence angle modifier*(*beam radiation*)
- G<sub>D</sub> = *Diffuse solar radiation*[W/m<sup>2</sup>]
- K<sub>θ,β</sub> = *Incidence angle modifier*(*diffuse radiation*)
- G<sub>pG</sub> = *Ground reflectan solar radiation*[W/m<sup>2</sup>]
- K<sub>θ,G</sub> = *Incidence angle modifier*(*Ground reflectan*)
- β = *Slope angle*

Sedangkan *air mass modifier* dapat diperoleh dengan hubungan antara air mass dan nilai konstanta α<sub>i</sub> seperti pada persamaan 2-14.

$$M = \alpha_0 + \alpha_1 m + \alpha_2 m^2 + \alpha_3 m^3 + \alpha_4 m^4$$

(Kalogirou, 2009: 498) (2-14)



$\alpha_i$  = Konstanta bahan dari *photovoltaic*

$m$  = Air mass

Konstanta  $\alpha_i$  tergantung dari material *photovoltaic* dan digunakan untuk zenith angle dibawah  $70^\circ$ . Tabel 2.1 menyajikan konstanta  $\alpha_i$  yang telah di uji di *National Institute of Standar and Technology* (NIST).

Table 2.2 Nilai konstanta  $\alpha_i$  dari berbagai panel *photovoltaic* yang diuji di NIST

Cell type	Silicon thin film	Monocrystalline	Polycrystalline	Three-juntion amorphous
$\alpha_0$	0,938110	0,935823	0,918093	1,10044085
$\alpha_1$	0,062191	0,054289	0,086257	-0,06142323
$\alpha_2$	-0,015021	-0,008677	-0,0244569	-0,00442732
$\alpha_3$	0,001217	0,000527	0,002816	0,000631504
$\alpha_4$	-0,000034	-0,000011	-0,000126	-1,9184 x 10 <sup>-5</sup>

Sumber: Kalogirou (2009:498)

Dengan meningkatnya jumlah energi radiasi matahari yang terserap oleh *photovoltaic* maka akan meningkatkan output arus listrik yang dihasilkan *photovoltaic*. Penjelasan mengenai arus listrik akan dijelaskan pada subbab berikut.

#### 2.4 Arus Listrik

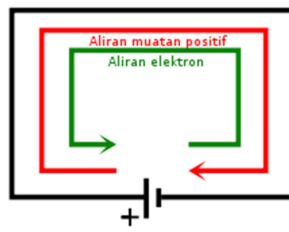
Materi tersusun atas partikel-partikel yang sangat kecil yang disebut atom. Atom sendiri terdiri atas partikel sub-atom yang tersusun atas elektron, proton dan neutron dalam berbagai gabungan. Elektron merupakan partikel sub-atom yang bermuatan negatif (-) listrik yang paling mendasar. Elektron-elektron dalam cangkang terluar atom disebut elektron valensi. Apabila energi eksternal seperti kalor, cahaya, atau listrik diberi pada sebuah materi maka elektron-elektron valensi akan mendapat energi dan akan berpindah ke tingkat energi yang lebih tinggi. Jika elektron mendapat energi yang cukup maka elektron valensi tersebut akan keluar dari atomnya dan statusnya menjadi elektron bebas. Pergerakan dari elektron-elektron bebas membawa muatan-muatan listrik dan hal inilah yang menjadi arus listrik dalam konduktor logam (Gussow; 2004).

Arus listrik adalah banyaknya muatan listrik yang disebabkan dari pergerakan elektron-elektron yang mengalir melalui suatu titik dalam sirkuit listrik tiap satuan waktu. Arus listrik dapat diukur dalam satuan Coulomb/detik (C/det) atau Ampere (I)(Blocher; 2004). Seperti yang dijelaskan pada rumus berikut:

$$I = \frac{Q}{t} \quad \text{(Blocher, 2004: 8) \quad (2- 15)}$$

Keterangan :

- $I$  = Arus listrik [A]
- $Q$  = Banyaknya muatan listrik [C]
- $t$  = Waktu [s]



Gambar 2.11 Arah aliran electron dan muatan positif pada rangkaian listrik DC  
Sumber: Gussow (2004:6)

Arus listrik sendiri dibangkitkan oleh dua kutub sumber listrik yang mempunyai beda potensial. Satuan dasar beda potensial *volt* (V), karena satuan inilah beda potensial V sering disebut *voltase* (Gussow; 2004).

Berdasarkan perubahan *voltase* terhadap waktu arus listrik dibedakan menjadi dua tipe yaitu arus Direct Current (DC, Arus Searah) dan Alternating Current (AC, Arus Bolak-balik).

### 2.4.1 Arus Searah (DC)

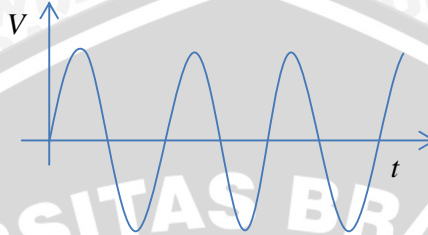
Arus searah (DC) adalah arus listrik yang nilai polaritas tegangannya bernilai tetap terhadap waktu. Aliran arus satu arah dihasilkan oleh sumber tegangan arus searah (DC) yang tidak mengubah polaritas tegangan keluarannya.



Gambar 2.12 Voltase DC  
Sumber: [Bishop \(2011:21\)](#)

### 2.4.2 Arus Bolak-balik (AC)

Pada arus AC nilai dari polaritas tegangan berubah-ubah sepanjang waktu membentuk seperti membentuk gelombang sinusoida seperti pada gambar 2.12. Arus listrik AC sering digunakan untuk aplikasi rumah tangga karena kemudahan pendistribusiannya.



Gambar 2.13 Voltase AC  
Sumber: [Bishop \(2011:21\)](#)

Pada sumber arus yang menghasilkan arus DC dan ingin digunakan di peralatan rumah tangga, maka arus di DC tersebut harus dihubungkan terlebih dahulu ke inverter. Inverter merupakan alat elektronik yang mengubah arus DC menjadi arus AC. Pada penelitian ini, *photovoltaic* yang digunakan menghasilkan arus DC sehingga secara teori arus keluarannya akan mengikuti persamaan-persamaan pada arus DC diantaranya hukum Ohm dan daya pada arus DC seperti yang akan dijelaskan pada subbab berikut.

### 2.4.3 Hukum Ohm dan Daya dalam Rangkaian Listrik DC

Hukum Ohm mendefinisikan hubungan antara Arus( $I$ ), Tegangan ( $V$ ), dan Resistensi ( $R$ ). Cara untuk menyatakan hukum Ohm dalam matematis seperti berikut:

$$V = I \cdot R \quad (\text{Gussow, 2004:13}) \quad (2-16)$$

Keterangan:

$V$  = Tegangan listrik [Volt]

$I$  = Arus listrik [Ampere]

$R$  = Resistensi [Ohm]

Daya listrik yang digunakan dalam sebarang bagian dalam rangkaian DC sama dengan perkalian antara arus yang mengalir dengan voltase rangkaian. Secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$P = V \cdot I \quad (\text{Gussow, 2004:13}) \quad (2-17)$$

Keterangan:

$P$  = Daya listrik [Watt]



$I$  = Arus listrik [A]

$V$  = Tegangan listrik [V]

Hukum Ohm dapat menjelaskan hubungan antara daya dengan resistensi seperti ditunjukkan pada rumus berikut:

$$P = V.I = \{I.R\} I = I^2 .R \quad (\text{Gussow, 2004:13}) \quad (2-18)$$

Keterangan:

$P$  = Daya listrik [Watt]

$I$  = Arus listrik [A]

$V$  = Tegangan listrik [V]

$R$  = Resistensi [ $\Omega$ ]

## 2.5 Hipotesis

Pada sebuah sistem *concentrating photovoltaic-mirror sistem*, efisiensi daya konversi energi dari radiasi sinar matahari menjadi listrik dipengaruhi oleh variasi *Inclanation Angle* dan ratio lebar cermin. Semakin kecil nilai *Inclanation Angle* dan semakin besar ratio lebar cermin, maka jumlah pantulan radiasi cahaya matahari semakin banyak yang sampai pada bidang *photovoltaic* sehingga energi yang dikonversi ke listrik bisa lebih tinggi.