

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Penelitian sebelumnya mengenai CPV-*mirror system* telah dilakukan oleh Hermenean, et all (2009). Penelitian ini menggunakan metode numerik dengan cermin datar sebagai optik yang bertujuan mencari nilai optimal dari pemodelan geometric pada CPV-*mirror system* seperti pada gambar 1.2. Beberapa variabel yang digunakan adalah sudut antara cermin dengan *photovoltaic (inclination angle)*, sudut datang sinar matahari dengan bidang *photovoltaic (incidence angle)*, perbandingan lebar cermin dengan lebar *photovoltaic* ($L2/L1=\epsilon$) dan *tracking system*. Dari penelitian ini dihasilkan kesimpulan bahwa dari ketiga variasi di atas yang paling berpengaruh pada peningkatan kinerja *photovoltaic* adalah *inclination angle* yaitu antara 50° - 65° (Hermenean, 2009).

Penelitian pada tahun 2010 kemudian dilanjutkan menggunakan variasi lebar cermin sebesar 1 dan $\frac{1}{2}$ dari lebar *photovoltaic* dengan variasi kemiringan bidang cermin terhadap *photovoltaic* sebesar $50^{\circ};55^{\circ};60^{\circ};65^{\circ}$, serta *incidence angle* sebesar $15^{\circ};7.5^{\circ};3.75^{\circ}$. Sistem *photovoltaic* di sini juga menggunakan *tracking system* untuk mengikuti arah gerak matahari. Metode yang digunakanpun sama dan menghasilkan kesimpulan bahwa kemiringan bidang cermin terhadap bidang *photovoltaic* yang paling bagus dengan variasi dan kondisi variabel diatas yaitu sebesar 65° (Hermenean, 2010).

2.2 Matahari

Matahari adalah salah satu benda langit berupa gumpalan gas yang sangat panas dengan diameter 1.39×10^9 m dan berjarak rata-rata dengan bumi sekitar 1.5×10^{11} m. Temperatur permukaan matahari sebesar 5777 K, sedangkan temperatur bagian inti matahari mencapai 8×10^6 sampai 40×10^6 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 gravitasi 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, 1991:3)

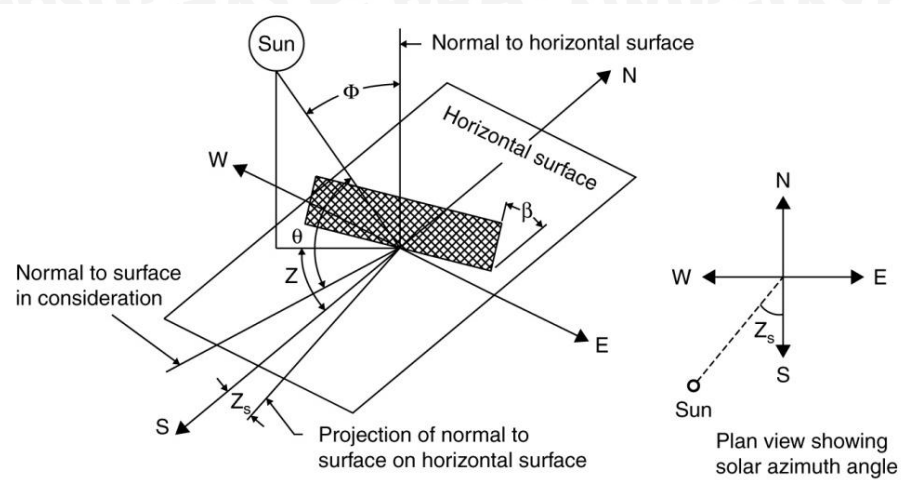
Radiasi cahaya matahari adalah energi berbentuk gelombang elektromagnetik yang kasat mata dengan panjang gelombang (λ) sekitar 0.2-4.0 μm . Pada bidang fisika,

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 ke bumi 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 tersebar oleh atmosfer. Dan gabungan dari radiasi langsung dan radiasi baur disebut *total radiation* (Duffie & Beckman, 1991:10).

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

- *Latitude angle (L)*, posisi lintang utara dan selatan di bumi, dalam hal ini utara bernilai positif; $-90^{\circ} \leq \phi \leq 90^{\circ}$.
- *Local longitude angle (LL)*, sudut garis bujur lokasi
- *Declination angle (δ)*, sudut arah sinar matahari saat tengah hari pada bidang equator ; $(-23,45^{\circ} < \delta < +23,45^{\circ})$
- *Slope angle (β)*, sudut kemiringan bidang datar terhadap bidang horizontal; $(0^{\circ} < \beta < 180^{\circ})$.
- *Hour angle (H)*, sudut lintasan sinar matahari langsung setiap saat terhadap meridian lokasi, ini berubah 15° per jam; pagi +, sore -.
- *Angle of incidence (θ)*, sudut sinar datang matahari langsung, terhadap garis tegak lurus bidang normal.
- *Zenith angle (Φ)*, sudut antara garis vertikal terhadap garis arah datang matahari atau sudut datang radiasi langsung terhadap bidang horizontal.
- *Solar altitude angle (α)*, sudut antara garis horizontal terhadap terhadap matahari, kebalikan dari *zenith angle*.
- *Solar azimuth angle (z)*, sudut deviasi yang merupakan proyeksi dari arah datang sinar matahari di permukaan horizontal bidang datar dengan meridian kolektor.



Gambar 2.1 Konfigurasi sudut datang radiasi pada bidang kolektor
 Sumber: Kalogirou (2009:61)

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 menggunakan prinsip *full tracking* atau secara berkelanjutan mengikuti peredaran matahari maka harus menentukan *slope angle* atau *hours angle* dan *solar azimuth angle*. Untuk kolektor yang menggunakan prinsip *full tracking* maka nilai dari *slope angle* (β) sama dengan *solar zenith angle* (Φ) dan *surface azimuth angle* (z) sama dengan *solar azimuth angle* (z_s) (Kalogirou, 2009:63). Selain itu, dikarenakan mekanisme *full tracking* menjadikan kolektor tegak lurus arah datang radiasi matahari maka setiap waktu nilai dari *incidence angle beam radiation* (θ) bernilai 0 seperti pada persamaan 2-1 (Kalogirou, 2009:62).

$$\cos(\theta) = 1 \quad \text{(Kalogirou, 2009:58) (2-1)}$$

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:

α = *Solar altitude angle*

L = *Latitude angle*

δ = *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 :

δ = Declination angle

N = Day number

Selanjutnya menggunakan persamaan berikut

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

Keterangan :

Φ = 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 [°]

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.

$$AST = LST + ET \pm 4(SL - LL) - DS \quad (\text{Kalogirou, 2009:51}) \quad (2-7)$$

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.

$$ET = 9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B) \quad (\text{Kalogirou, 2009:50}) \quad (2-8)$$

Dimana

$$B = (N - 81) \frac{360}{364} \quad (\text{Kalogirou, 2009:51}) \quad (2-9)$$

Keterangan:

$$N = \text{Day number}$$

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.

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	δ (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 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 dengan persamaan 2-10.

$$E_{\lambda} = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{Luque \& Hegedus, 2003:61}) \quad (2-10)$$

Keterangan :

- E = Energi radiasi cahaya matahari [J]
 h = Konstanta *Plank* [$6,626068 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg/s}$]
 c = Kecepatan cahaya [m/s]
 λ = Panjang gelombang [m]

Untuk menyatakan kandungan energi radiasi cahaya matahari yang terpancar tiap satuan waktu pada luasan tertentu lebih dikenal dengan daya persatuan luas (W/m^2). 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^2 .

Pada penelitian ini dilakukan eksperimen mengenai pemanfaatan energi cahaya matahari untuk dikonversikan ke listrik menggunakan *photovoltaic* dan bantuan cermin datar untuk mengoptimalkan kinerja *photovoltaic*. Pada bagian selanjutnya dijelaskan mengenai cermin yang menjadi alat bantu meningkatkan kinerja *photovoltaic*.

2.2.2 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.

Teleskop dan peralatan optik yang lain menggunakan cermin *front silvered*, di mana permukaan pemantul diletakan di permukaan kaca, yang memberikan kualitas bayangan lebih baik. Kadang perak digunakan, tetapi kebanyakan cermin ini menggunakan aluminium yang memantulkan gelombang pendek lebih baik dari perak.

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 (Anonymous_b, 2012).

Cermin dapat bekerja dengan prinsip pemantulan cahaya. Ada tiga macam jenis cermin, yaitu ada cermin datar, cermin cekung, dan cermin cembung.

A. Cermin Datar

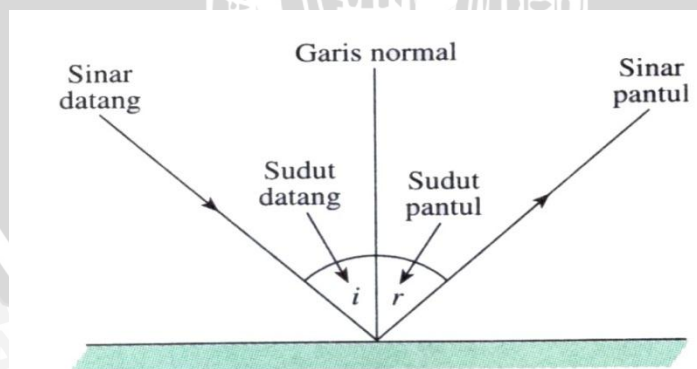
Cermin datar adalah sebuah cermin yang permukaan pantulnya berupa sebuah bidang datar. Cermin datar memiliki sifat-sifat sebagai berikut.

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

Di dalam cermin datar terdapat empat sifat bayangan, yaitu :

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

Sifat-sifat pemantulan cahaya pada cermin datar dapat dilihat pada gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 Sifat pemantulan cahaya pada cermin datar
Sumber: Sari (2007:5)

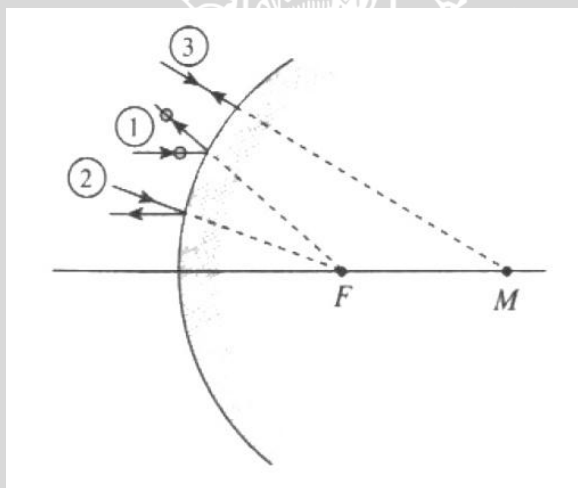
B. Cermin Cembung (Cermin Konveks)

Cermin cembung, bagian mukanya berbentuk seperti kulit bola, tetapi bagian muka cermin cembung melengkung ke luar. Titik fokus cermin cembung berada di belakang cermin sehingga bersifat maya dan bernilai negatif.

Sinar-sinar pantul pada cermin cembung seolah-olah berasal dari titik fokus menyebar ke luar. Pada cermin cembung berlaku sinar-sinar istimewa sebagai berikut:

1. Sinar datang sejajar dengan sumbu utama akan dipantulkan seolah-olah dari titik fokus.
2. Sinar datang seolah-olah menuju titik fokus akan dipantulkan sejajar sumbu utama.
3. Sinar datang menuju titik M ($2F$) akan dipantulkan seolah-olah dari titik itu juga.

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



Gambar 2.3 Sifat pemantulan cahaya pada cermin cembung
Sumber: Sari (2007:11)

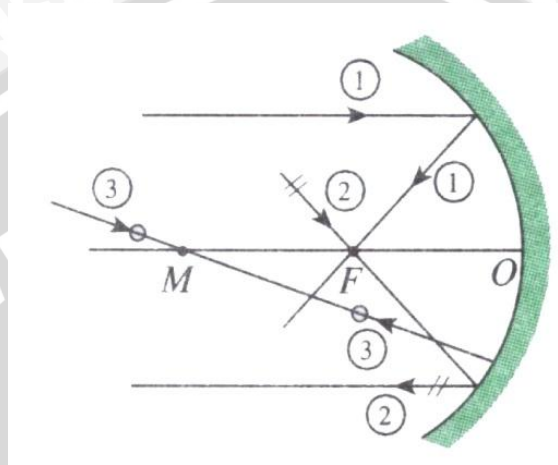
C. Cermin Cekung (Cermin Konkaf)

Cermin cekung memiliki permukaan pemantul yang bentuknya melengkung atau membentuk cekungan. Garis normal pada cermin cekung adalah garis yang melalui pusat kelengkungan, yaitu di titik M atau $2F$. Sinar yang melalui titik ini akan dipantulkan ke titik itu juga.

Cermin cekung bersifat mengumpulkan sinar pantul atau konvergen. Titik perpotongan tersebut dinamakan titik api atau titik fokus (F). Pada cermin cekung berlaku sinar-sinar istimewa sebagai berikut.

1. Sinar datang sejajar dengan sumbu utama akan dipantulkan melalui titik fokus.
2. Sinar datang melalui titik fokus akan dipantulkan sejajar sumbu utama.
3. Sinar datang melalui titik pusat kelengkungan cermin akan dipantulkan ke titik itu juga.

Sifat-sifat pemantulan cahaya pada cermin cekung dapat dilihat pada gambar 2.4 berikut.



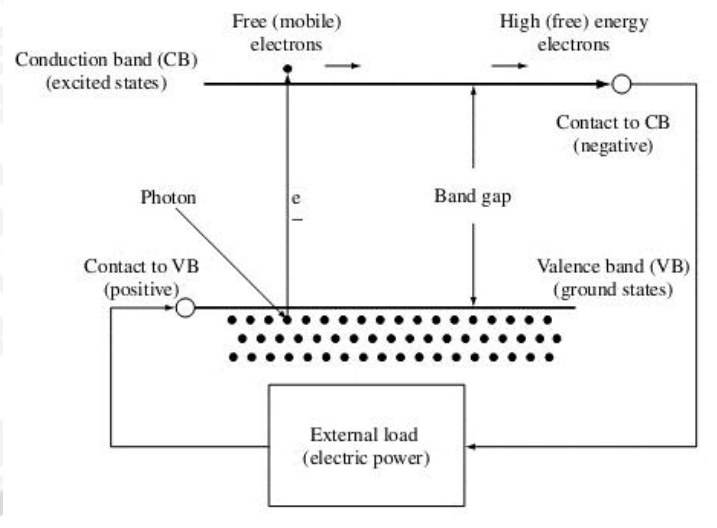
Gambar 2.4 Sifat pemantulan cahaya pada cermin cekung
Sumber: Sari (2007:10)

Pada penelitian ini menggunakan CPV model reflektor dengan menggunakan cermin datar sebagai optiknya. Penjelasan mengenai *photovoltaic* dapat dilihat pada subbab berikut.

2.3 Photovoltaic

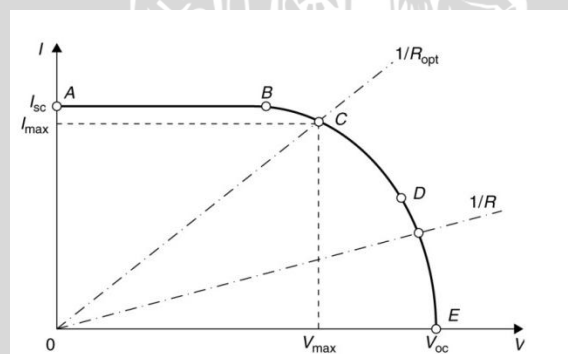
Semikonduktor merupakan pemanfaatan teknologi mikro yang memanfaatkan bahan –bahan konduktor dan isolator listrik yang berukuran atom untuk mendapatkan perilaku hasil gabungan yang diinginkan seperti transistor, *processor* dan *photovoltaic*. *Photovoltaic* sendiri adalah sebuah alat semikonduktor yang terdiri dari sebuah dioda P-N, di mana saat sel ini terkena cahaya matahari (*photon*) mampu menciptakan energi listrik. Perubahan ini disebut efek *photovoltaic*. Bidang riset yang berhubungan dengan *photovoltaic* dikenal sebagai *photovoltaics*.

Energi cahaya matahari yang dapat dikonversikan menjadi energi listrik oleh *photovoltaic* harus mampu meloncatkan elektron bebas melewati *band gap* pada struktur atom *photovoltaic*. *Band gap* merupakan jarak antara dioda tipe P dan tipe N. Cara kerja *photovoltaic* dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Cara kerja *photovoltaic*
 Sumber: Luque & Hegedus (2003:4)

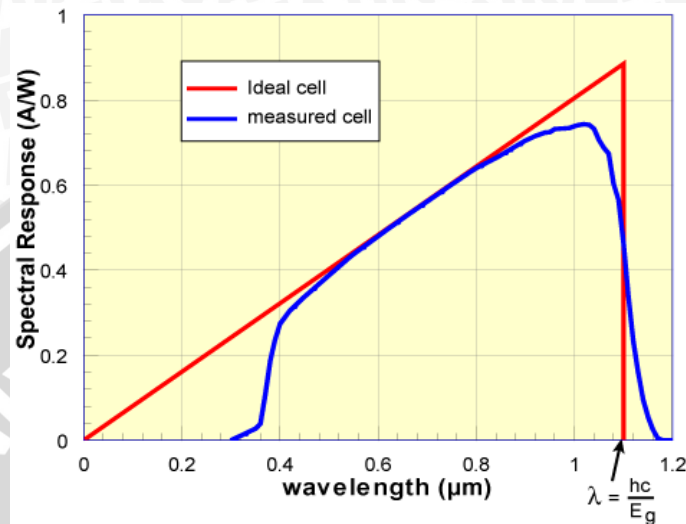
Photovoltaic memiliki banyak aplikasi, terutama sangat cocok digunakan pada lokasi-lokasi yang tidak terdapat sumber listrik dari pembangkit namun tersedia cahaya matahari yang cukup, seperti di wilayah terpencil, satelit pengorbit bumi, kalkulator dan telepon genggam. *Photovoltaic* (dalam bentuk modul atau panel surya) dapat dipasang di atap gedung dan menghasilkan arus listrik DC. Untuk penggunaan di rumah yang menggunakan arus listrik AC maka keluaran pada *photovoltaic* dihubungkan dengan *inverter* untuk diubah arusnya menjadi AC sesuai kebutuhan rumah tangga. Berikut gambar yang menunjukkan daya yang dapat dihasilkan *photovoltaic*.



Gambar 2.6 Grafik arus dan tegangan yang dihasilkan *photovoltaic*
 Sumber: Kalogirou (2009:477)

Gambar 2.6 menjelaskan bahwa *photovoltaic* menghasilkan arus maksimum pada rangkaian tertutup dan menghasilkan voltase maksimum pada rangkaian terbuka. Sedangkan daya maksimum yang dapat dihasilkan *photovoltaic* didapatkan dengan menggunakan *resistive load* $1/R_{opt}$ sehingga *photovoltaic* mengeluarkan arus dan tegangan maksimum. Disamping itu jika *load resistance* kecil, maka *photovoltaic* akan

berkerja pada daerah AB. Namun jika *load resistance* besar, maka *photovoltaic* akan bekerja pada daerah DE. Selain pengaruh dari *load resistance*, daya listrik yang dihasilkan *photovoltaic* juga dipengaruhi oleh spektrum (*spectral*) cahaya matahari yang berhubungan dengan panjang gelombang. Hubungan tersebut dapat dilihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 *Spectral respon photovoltaic*
Sumber : Honsberg & Bowden (2012)

Photovoltaic merupakan alat konversi energi masa depan yang mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan dengan mesin konversi energi lainnya, 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*. Atom-atom penyusun *cell* tersusun teratur dan terjaga kemurniannya. Efisiensinya *cukup* tinggi sikitar 15% namun proses manufakturnya rumit dan membutuhkan biaya tinggi dibanding teknologi lain.

➤ *Multicrystalline silicon cells*

Multicrystalline cells terbuat dari *monocrystallin silicon* yang tersusun secara acak.. *Multicrystalline silicon cells* lebih murah dibanding dengan *monocrystallin* karena proses manufakturnya yang mudah. Meskipun begitu efisiensinya lebih rendah sekitar 12%. *Multicrystallin silicon cells* merupakan tipe *photovoltaic* yang akan digunakan dalam penelitian ini.

➤ *Amorphous silicon*

Pada umumnya yang membedakan *amorphous silicon* dengan tipe sebelumnya adalah pada struktur cristalnya, *amorphous silicon cells* terbentuk dari lapisan homogen yang tipis. *Amorphous silicon* dapat di tempatkan pada jangkauan yang luas pada modul karena strukturnya rigid namun fleksibel. Efisiensinya dari *cell* ini 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*, dan sistem pengatur panas. Peralatan TPV mengkonversikan 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 15×10^6 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 W/m^2 sedangkan TPV bisa mencapai $5-30 \text{ W/m}^2$ tergantung temperatur pembakaran bahan bakar (Kalogirou, 2009: 486).

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 2-11 seperti berikut.

$$\eta_{\max} = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{I_{\max} V_{\max}}{AG_t} \quad (\text{Kalogirou, 2009: 480}) \quad (2-11)$$

Keterangan:

η_{\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^2]
 G_t = Radiasi matahari yang tersedia [W/m^2]

Efisiensi *photovoltaic* cukup rendah karena sebagian dari radiasi matahari tidak sepenuhnya terkonversi menjadi listrik melainkan panas. Hal tersebut dapat di jelaskan secara matematik pada persamaan 2-12.

$$(\tau\alpha)G_t = \eta_e G_t + U_L(T_c - T_a) \quad (\text{Kalogirou, 2009:504}) \quad (2-12)$$

Keterangan:

- $(\tau\alpha)$ = *Transmittance*
 G_t = *Total solar radiation* [W/m^2]
 η_e = Efisiensi
 U_L = *Heat loss coefficient* [W/m^2C]
 T_c = Temperatur aktual *photovoltaic* [$^{\circ}C$]
 T_a = *Ambient temperature* [$^{\circ}C$]

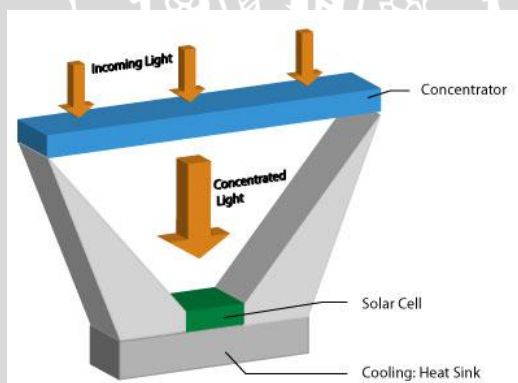
Teknologi *photovoltaic* masih perlu dikembangkan karena masih menyimpan potensi peningkatan efisiensi yang tinggi. Salah satu cara untuk meningkatkan kinerja *photovoltaic* yaitu dengan prinsip *Concentrating Solar Power*. *Concentrating Solar Power* atau biasa disebut CSP adalah sistem yang menggunakan 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. 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:

- a. Membutuhkan sedikit material *photovoltaic* dibandingkan *photovoltaic* yang tidak terkonsentrasi.
- b. Menambah efisiensi tiap *cell photovoltaic* yang dipakai sampai 30%.
- c. 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 2.8 *Concentrating Photovoltaics* (CPV)
Sumber : Anonymous_a (2011)

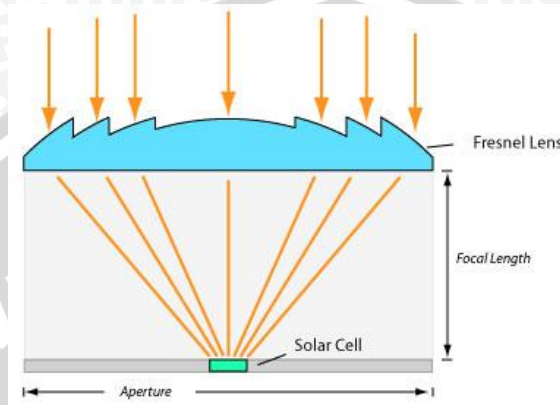
Berikut adalah beberapa contoh teknologi CPV. Sebagian besar konsentrator memakai teknologi ini atau meniru konsep dasar yang diterapkan pada konsentrator ini.

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 *cell photovoltaic* efisiensi tinggi.

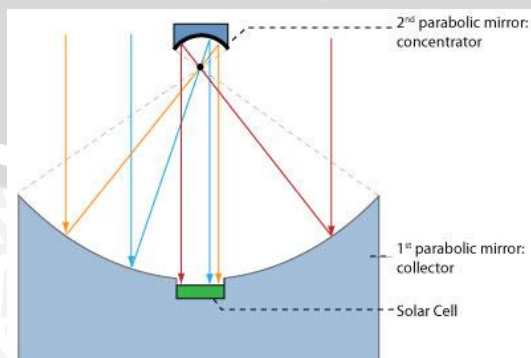


Gambar 2.9 CPV tipe lensa fresnel
Sumber : Anonymous_a (2011)

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 konstrator 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.

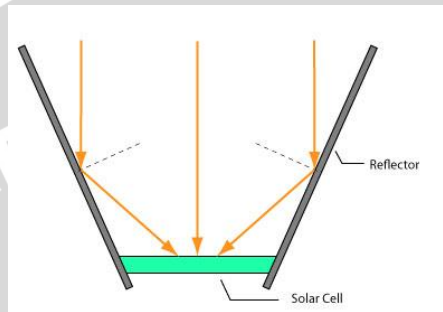


Gambar 2.10 CPV tipe cermin parabolik
Sumber : Anonymous_a (2011)

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 *concentration 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.

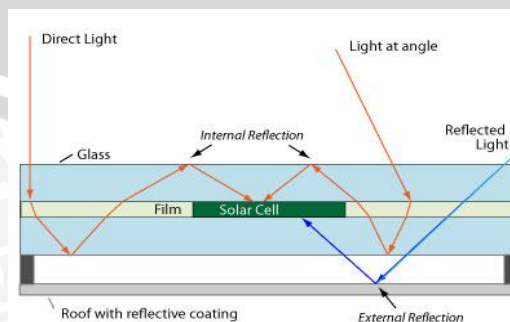


Gambar 2.11 CPV tipe reflektor (*mirror sistem*)
Sumber : Anonymous_a (2011)

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. *Concentration 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* hanya akan melewatinya. Oleh karena itu, *wavelengths* yang tidak diinginkan akan hilang.



Gambar 2.12 CPV tipe *luminescent concentrators*
Sumber : Anonymous_a (2011)

5. Sistem Pendinginan

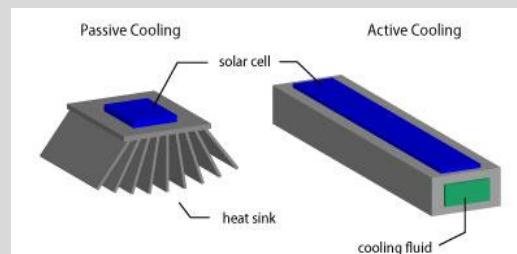
Sistem CPV yang mempunyai *concentration ratio* tinggi memerlukan pendinginan dikarenakan banyaknya energi matahari yang sampai ke *photovoltaic* tidak semuanya terkonversi ke energi listrik, sehingga sisa energi tersebut berubah menjadi panas. Panas yang cukup tinggi akan mengakibatkan penurunan efisiensi *photovoltaic*.

- Pendinginan pasif

Di sini sel ditempatkan pada *cladded ceramic substrate* dengan konduktivitas termal yang tinggi.

- Pendingin aktif

Pada pendingin ini menggunakan *cooling fluid* sebagai cairan pendingin. Cairan pendingin mampu menurunkan temperatur *photovoltaic* dari 1700°C menjadi 100°C



Gambar 2.13 Sistem pendinginan *photovoltaic*
Sumber : Anonymous_a (2011)

Dengan terintergrasinya *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. Persamaan

ini tidak dapat digunakan untuk menghitung *photovoltaic* yang terkonsentrasi serta *diffuse radiation* dan *ground-reflected radiation* dianggap isotropic.

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

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

Keterangan:

S = Absorbed solar radiation

$(\tau\alpha)_n$ = Transmittance untuk normal incident angle

M = Air mass modifier

G_B = Beam solar radiation pada permukaan horizontal [W/m^2]

R_B = Beam radiation tilt factor

$K_{\theta,\beta}$ = Incidence angle modifier untuk beam radiation

G_D = Diffuse solar radiation [W/m^2]

$K_{\theta,D}$ = Incidence angle modifier untuk diffuse radiation

G_{pG} = Total solar radiation dengan ground reflectance [W/m^2]

$K_{\theta,G}$ = Incidence angle modifier untuk ground-reflected

β = Slope angle

Simbol α menunjukkan bahwa hanya kerugian berupa penyerapan energi radiasi oleh cover yang diperhitungkan. Parameter-parameter penyerapan dalam perhitungan penyerapan radiasi matahari dicari dengan persamaan sebagai berikut :

➤ *Transmittance normal incident angle* didapatkan dari persamaan 2-14.

$$(\tau\alpha)_n = e^{-KL} \left[1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \right]$$

(Kalogirou, 2009:501) (2-14)

Keterangan :

$(\tau\alpha)_n$ = Transmittance normal incident angle

K = Extinction coefficient

n = Refraction index

Pada persamaan ini kerugian radiasi di ukur jika $\theta=0$. Persamaan *transmittance* ini juga berlaku untuk radiasi yang datang pada $\theta=0$.

➤ *Air mass modifier* merupakan nilai yang menunjukkan perubahan *spectral* dari photon akibat perubahan arah datang sinar matahari tiap waktu yang dapat mengurangi energi dari photon. *Air mass modifier* dapat diperoleh dengan

hubungan antara *air mass* dan nilai konstanta α_i seperti pada persamaan 2-15.

$$M = \alpha_0 + \alpha_1 m + \alpha_2 m^2 + \alpha_3 m^3 + \alpha_4 m^4 \quad (\text{Kalogirou, 2009:498}) \quad (2-15)$$

Keterangan :

α_i = Konstanta bahan dari *photovoltaic*

m = *Air mass*

di mana

$$m = \frac{1}{\cos(\phi)} \quad (\text{Kalogirou, 2009:92}) \quad (2-16)$$

Sedangkan konstanta α_i tergantung dari material *photovoltaic* dan digunakan untuk *zenith angle* dibawah 70° . Tabel 2.1 menyajikan konstanta α_i yang telah di uji di *National Institute of Standar and Technology* (NIST).

Table 2.2 Nilai konstanta α_i dari berbagai panel *photovoltaic* yang diuji di NIST

Cell type	Silicon thin film	Monocrystalline	Polycrystalline	Three-junction amorphous
α_0	0,938110	0,935823	0,918093	1,10044085
α_1	0,062191	0,054289	0,086257	-0,06142323
α_2	-0,015021	-0,008677	-0,0244569	-0,00442732
α_3	0,001217	0,000527	0,002816	0,000631504
α_4	-0,000034	-0,000011	-0,000126	$-1,9184 \times 10^{-5}$

Sumber: Kalogirou (2009:498)

➤ *Beam radiation tilt factor* didapatkan dari persamaan 2-17.

$$R_B = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\phi)} \quad (\text{Kalogirou, 2009:97}) \quad (2-17)$$

Keterangan:

θ = *Incidence angle*

Perhitungan ini dilakukan pada kolektor miring sedangkan *beam radiation* yang diketahui arahnya tegak lurus bidang horisontal, sehingga dengan menggunakan R_B akan didapatkan nilai *beam radiation* sesuai *incidence angle* pada bidang miring. Sedangkan jika *beam radiation* didapatkan tegak lurus bidang kolektor maka nilai *beam radiation* tersebut sudah merupakan nilai yang terpapar pada bidang kolektor.

- *Incidence angle modifier* untuk *beam radiation* yaitu rasio perbandingan antara *transmittance* pada *beam radiation* dengan *transmittance* pada *normal incidence angle* didapatkan dari persamaan 2-18.

$$K_{\theta,B} = \frac{(\tau\alpha)_B}{(\tau\alpha)_n} \quad (\text{Kalogirou, 2009:499}) \quad (2-18)$$

Keterangan :

$(\tau\alpha)_B$ = *Transmittance* untuk *beam incidence angle*

Dimana $(\tau\alpha)_B$

$$(\tau\alpha)_B = e^{-KL/\cos(\theta_r)} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_r - \theta)}{\sin^2(\theta_r + \theta)} + \frac{\tan^2(\theta_r - \theta)}{\tan^2(\theta_r + \theta)} \right] \right\} \quad \dots(\text{Kalogirou, 2009:499}) \quad (2-19)$$

Keterangan :

K = *Extinction coefficient*

L = *Tebal cover photovoltaic*

θ_r = *Refraction angle* oleh *beam radiation* pada *cover photovoltaic*

θ = *Incidence angle (beam radiation)*

Dengan θ_r

$$\sin(\theta_r) = \sin(\theta)/1.526 \quad (\text{Kalogirou, 2009:80}) \quad (2-20)$$

- *Incidence angle modifier* untuk *diffuse radiation* yaitu rasio perbandingan antara *transmittance* pada *diffuse radiation* dengan *transmittance* pada *normal incidence angle* didapatkan dari persamaan 2-21.

$$K_{\theta,D} = \frac{(\tau\alpha)_D}{(\tau\alpha)_n} \quad (\text{Kalogirou, 2009:499}) \quad (2-21)$$

Keterangan :

$(\tau\alpha)_D$ = *Transmittance* untuk *diffuse incident angle*

Dimana $(\tau\alpha)_D$

$$(\tau\alpha)_D = e^{-KL/\cos(\theta_{re,G})} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_r - \theta_{e,D})}{\sin^2(\theta_r + \theta_{e,D})} + \frac{\tan^2(\theta_r - \theta_{e,D})}{\tan^2(\theta_r + \theta_{e,D})} \right] \right\} \quad \dots(\text{Kalogirou, 2009:499}) \quad (2-22)$$

Keterangan :

$\theta_{re,D}$ = *Refraction angle* oleh *diffuse radiation* pada *cover photovoltaic*

$\theta_{e,D}$ = *Incidence angle (diffuse radiation)*

Dengan $\theta_{re,D}$

$$\sin(\theta_{re,D}) = \sin(\theta_{e,D})/1.526 \quad (\text{Kalogirou, 2009:80}) \quad (2-23)$$

Sedangkan $\theta_{e,D}$

$$\theta_{e,D} = 59.6 - 0.1388\beta + 0.001497\beta^2 \quad (\text{Kalogirou, 2009:152}) \quad (2-24)$$

- *Incidence angle modifier* untuk *ground-reflected radiation* yaitu rasio perbandingan antara *transmittance* pada *ground reflected radiation* dengan *transmittance* pada *normal incidence angle* didapatkan dari persamaan 2-25.

$$K_{\theta,G} = \frac{(\tau\alpha)_G}{(\tau\alpha)_n} \quad (\text{Kalogirou, 2009:499}) \quad (2-25)$$

Keterangan :

$(\tau\alpha)_G$ = *Transmittance* untuk *diffuse incident angle*

Dimana $(\tau\alpha)_G$

$$(\tau\alpha)_G = e^{-KL/\cos(\theta_{re,G})} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_r - \theta_{e,G})}{\sin^2(\theta_r + \theta_{e,G})} + \frac{\tan^2(\theta_r - \theta_{e,G})}{\tan^2(\theta_r + \theta_{e,G})} \right] \right\}$$

.....(Kalogirou, 2009:499) (2-26)

Keterangan :

$\theta_{re,G}$ = *Refraction angle* oleh *ground-reflected radiation* pada cover *photovoltaic*

$\theta_{e,G}$ = *Incidence angle (Ground-reflected radiation)*

Dengan $\theta_{re,G}$

$$\sin(\theta_{re,G}) = \sin(\theta_{e,G})/1.526 \quad (\text{Kalogirou, 2009:80}) \quad (2-27)$$

Sedangkan $\theta_{e,G}$

$$\theta_{e,G} = 90 - 0.5788\beta + 0.002693\beta^2 \quad (\text{Kalogirou, 2009:152}) \quad (2-28)$$

Dengan meningkatnya jumlah energi radiasi matahari yang terpapar pada *photovoltaic* akibat pantulan radiasi dari cermin, maka akan meningkatkan daya serap radiasi matahari oleh *photovoltaic* sehingga meningkatkan output daya listrik *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 (Bird, 2010:11).

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 (A) seperti yang dijelaskan pada persamaan 2-29 (Bird, 2010:11).

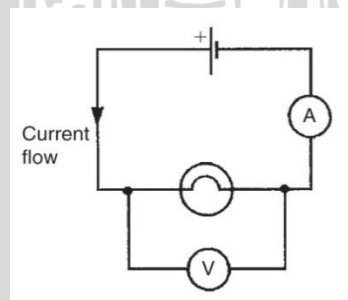
$$I = \frac{Q}{t} \quad (\text{Bird, 2010:8}) \quad (2-29)$$

Keterangan :

I = Arus listrik [A]

Q = Banyaknya muatan listrik [C]

t = Waktu [s]



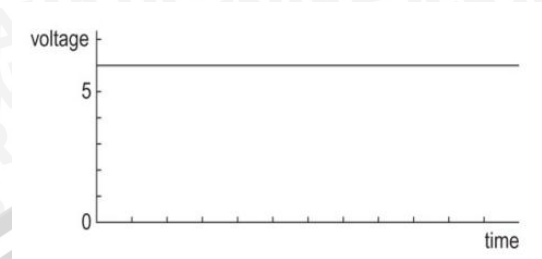
Gambar 2.14 Arah aliran arus pada rangkaian listrik DC
Sumber: Bird (2010:12)

Arus listrik 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* (Bird, 2010:11).

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.

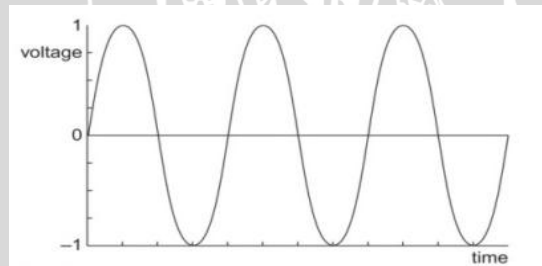


Gambar 2.15 Sifat tegangan DC

Sumber: Bishop (2011:21)

2.4.2 Arus Bolak-balik (AC)

Pada arus AC nilai dari polaritas tegangan berubah-ubah sepanjang waktu membentuk gelombang sinusoida seperti pada gambar 2.14. Arus listrik AC sering digunakan untuk aplikasi rumah tangga karena kemudahan pendistribusiannya.



Gambar 2.16 Sifat tegangan 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 bagian berikut.

2.4.3 Hukum Ohm dan Daya dalam Rangkaian Listrik DC

Hukum Ohm mendefinisikan hubungan antara arus (A), tegangan (V), dan Resistensi (R). Cara untuk menyatakan hukum Ohm dalam persamaan matematis dinyatakan pada persamaan 2-30.

$$V = I.R \quad (\text{Bird, 2010:13}) \quad (2-30)$$

Keterangan:

V = Tegangan listrik [V]

I = Arus listrik [A]

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 dinyatakan dengan persamaan 2-31.

$$P = V.I \quad (\text{Bird, 2010:15}) \quad (2-31)$$

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:

$$P = V.I = \{I.R\}.I = I^2.R \quad (\text{Bird, 2010:15}) \quad (2-32)$$

Keterangan:

P = Daya listrik [Watt]

I = Arus listrik [A]

V = Tegangan listrik [V]

R = Resistensi [Ω]

2.5 Hipotesis

Pada sebuah sistem *concentrating photovoltaic-mirror sistem*, efisiensi daya konversi energi dari radiasi sinar matahari menjadi listrik dipengaruhi oleh rasio perbandingan lebar optik dengan lebar *photovoltaic*. Semakin lebar dimensi cermin, maka jumlah pantulan radiasi cahaya matahari semakin banyak yang sampai pada bidang *photovoltaic* sehingga energi yang dikonversi ke listrik bisa lebih tinggi.