

BAB II SEL SURYA

2.1 PRINSIP KERJA SEL SURYA

Sel surya bekerja berdasarkan efek fotoelektrik pada material semikonduktor untuk mengubah energi cahaya menjadi energi listrik. Berdasarkan teori Maxwell tentang radiasi elektromagnet, cahaya dapat dianggap sebagai spektrum gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang yang berbeda. Pendekatan yang berbeda dijabarkan oleh Einstein bahwa efek fotoelektrik mengindikasikan cahaya merupakan partikel diskrit atau quanta energi. Dualitas cahaya sebagai partikel dan gelombang dirumuskan dengan persamaan :

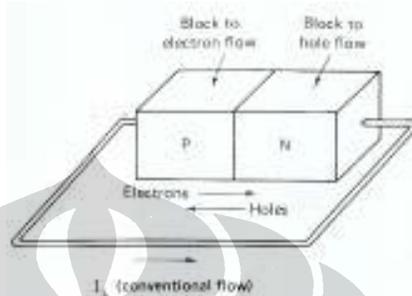
$$E = h \cdot f = h \cdot c / \lambda \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana cahaya pada frekuensi f atau panjang gelombang λ datang dalam bentuk paket-paket foton dengan energi sebesar E ; h adalah konstanta Planck ($6,625 \times 10^{-34}$ Js) dan c adalah kecepatan cahaya (3×10^8 m/s). Sifat cahaya sebagai energi dalam paket-paket foton ini yang diterapkan pada sel surya.

Pada awalnya (1839) sifat fotoelektrik ditemukan pada larutan elektro kimia oleh Alexandre Edmond Becquerel, meskipun tidak ada penjelasan ilmiah untuk peristiwa itu. Tahun 1905, Albert Einstein mengamati efek ini pada lempengan metal. Namun pada perkembangannya, material yang dipakai adalah semikonduktor, terutama silikon. Material ini dapat bersifat insulator pada temperatur rendah, tetapi dapat bersifat sebagai konduktor bila tersedia energi.

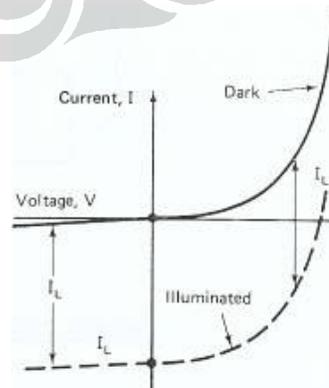
Prinsip kerja semikonduktor sebagai sel surya mirip dengan dioda sebagai *pn-junction* (Gambar 2.1). *PN-junction* adalah gabungan / lapisan semikonduktor jenis P dan N yang diperoleh dengan cara doping pada silikon murni. Pada semikonduktor jenis P, terbentuk *hole* (pembawa muatan listrik positif) yang jumlahnya lebih banyak dibandingkan jumlah elektronnya, sehingga *hole* merupakan pembawa muatan mayoritas, sedangkan elektron merupakan pembawa muatan minoritas. Demikian pula sebaliknya dengan semikonduktor jenis N. Bila bagian P dari *pn-junction* dihubungkan dengan kutub positif baterai dan bagian N dihubungkan dengan kutub negatif baterai, maka arus dapat mengalir melewati *pn-junction*. Kondisi ini disebut sebagai panjar maju. Bila hal sebaliknya

dilakukan (panjar mundur), yaitu bagian N dari *pn-junction* dihubungkan dengan kutub positif baterai dan bagian P dihubungkan dengan kutub negatif baterai, maka arus tidak dapat mengalir melewati *pn-junction*. Akan tetapi, masih ada arus dalam ukuran sangat kecil yang masih dapat mengalir (dalam ukuran mikroamper) yang disebut dengan arus bocor.



Gambar 2.1 *PN junction*[1]

Ada dua hal yang menarik dalam kondisi panjar mundur tersebut, yaitu efek fotokonduktif dan *photovoltaic*. Fotokonduktif adalah gejala di mana apabila suhu dinaikkan, maka arus bocor pada panjar mundur juga meningkat. Kenaikan suhu yang dapat dianggap sebagai penambahan energi dapat juga diganti dengan cahaya sebagai salah satu bentuk energi. Penyerapan energi cahaya pada kondisi panjar mundur sehingga menghasilkan arus listrik pada *pn junction* ini disebut dengan efek *photovoltaic*. Penjelasan secara grafik dapat dilihat pada Gambar 2.2. Jadi, sel surya pada dasarnya adalah sebuah fotodiode yang dirancang dengan mengacu pada efek *photovoltaic* sedemikian rupa, sehingga dapat mengubah energi cahaya seefisien mungkin menjadi energi listrik.



Gambar 2.2 Karakteristik dioda pada kondisi gelap dan teriluminasi[1]

2.2 KARAKTERISTIK SEL SURYA

Sub-bab ini menerangkan parameter sel surya yang paling berpengaruh pada kurva daya, yaitu arus hubung singkat dan tegangan hubung terbuka untuk parameter internal, sedangkan parameter eksternalnya meliputi suhu dan *irradiance*. Daya maksimum dan efisiensi turut dimasukkan dalam pembahasan karena merupakan parameter yang umum digunakan untuk membandingkan sel surya.

2.2.1 Kurva V-I Sel Surya

Cahaya mengakibatkan kurva V-I dioda pada Gambar 2.2 turun dari kuadran pertama ke kuadran empat dimana daya dapat dihasilkan dari dioda melalui arus bocor pada kuadran empat. Dari grafik pada Gambar 2.2 dapat disimpulkan bahwa persamaan sel surya dapat diambil dari persamaan dioda, yaitu[2] :

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) - I_L \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

dengan I = arus pada terminal sel surya (A)

I_0 = arus saturasi dioda (A)

I_L = arus yang dihasilkan oleh cahaya (A)

q = muatan elektron, $1,6 \times 10^{-19}$ C

V = tegangan terminal sel surya (V)

n = *diode quality factor* (nilainya antara 1-2)

k = konstanta Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23}$ J/K

T = temperatur ambien (K)

Gambar kurva dari persamaan ini adalah Gambar 2.2 pada kuadran empat, yaitu sel surya pada keadaan teriluminasi. Umumnya *datasheet* dan laporan penelitian menampilkan kurva pada kuadran pertama (seperti pada Gambar 2.3) dengan arus panjar mundur yang dibalik untuk kemudahan pembacaan grafik, sehingga persamaan kurva menjadi[3] :

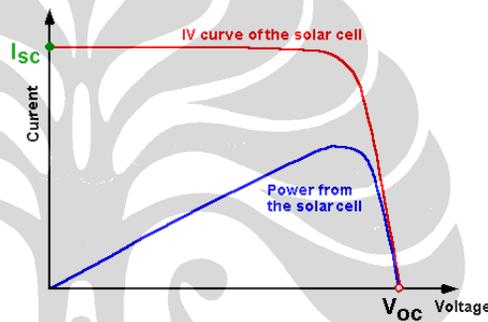
$$I = I_L - I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

2.2.2 Arus Hubung Singkat (Isc) Pada Sel Surya

Isc adalah arus yang mengalir pada saat tegangan sel surya sama dengan nol (Gambar 2.3). Pada kondisi ideal tanpa rugi daya, Isc sama dengan I_L . Isc bergantung linear terhadap *irradiance* dan dipengaruhi beberapa hal lain, yaitu luas area sel, spektrum cahaya dan parameter optik lain. Pengujian pada *Standard Test Condition* (STC), sel surya komersial memiliki Isc yang bervariasi antara 28mA/cm² sampai dengan 35mA/cm²[3]. Densitas Isc terhadap luas area sel (A) dirumuskan dengan persamaan[4] :

$$I_{sc} = A \cdot J_{sc} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$I_0 = A \cdot J_0 \dots\dots\dots (2.5)$$



Gambar 2.3 Kurva karakteristik sel surya[2]

2.2.3 Tegangan Hubung Terbuka (Voc) Pada Sel Surya

Voc adalah tegangan maksimum dari sel surya dan ini terjadi pada saat arus sel sama dengan nol, seperti terlihat pada Gambar 2.3. Tegangan ini merupakan kondisi panjar maju pada *junction* sel surya. Persamaan[3] untuk menentukan Voc didapat dari Persamaan (2.3) untuk nilai $I = 0$:

$$I = 0 = I_0 \left(\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right) - I_L$$

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \dots\dots\dots (2.6)$$

Dari Persamaan (2.6), terlihat bahwa nilai Voc bergantung secara logaritmik terhadap rasio I_L / I_0 . Ini berarti pada temperatur konstan, Voc berskala logaritmik terhadap I_L dan karena I_L bergantung linear terhadap *irradiance*, maka Voc berskala logaritmik juga terhadap *irradiance*. Rumusan tersebut menyimpulkan bahwa *irradiance* lebih berpengaruh terhadap I_L daripada Voc.

Substitusi Persamaan (2.4) dan Persamaan (2.5) pada Persamaan (2.6) menghasilkan[2] :

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{J_L}{J_0} + 1 \right) \dots\dots\dots (2.7)$$

Persamaan ini mengindikasikan bahwa Voc tidak bergantung pada luas area sel.

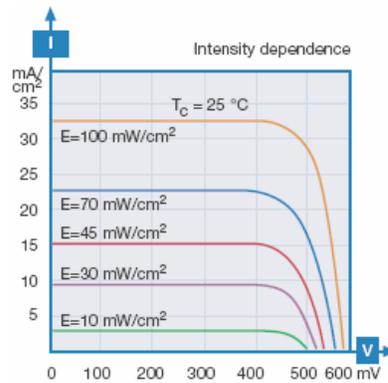
2.2.4 Pengaruh Irradiance Terhadap Sel Surya

Radiasi matahari yang diterima bumi terdistribusi pada beberapa *range* panjang gelombang, mulai dari 300 nm sampai dengan 4 mikron. Sebagian radiasi mengalami refleksi di atmosfer (*diffuse radiation*) dan sisanya dapat sampai ke permukaan bumi (*direct radiation*). Kedua radiasi ini yang dipakai untuk mengukur besaran radiasi yang diterima sel surya. Besaran – besaran penting untuk mengukurnya adalah[3] :

- *Spectral irradiance* I_λ - Daya yang diterima oleh satu unit area dalam bentuk differensial panjang gelombang $d\lambda$, satuan : $W/m^2 \mu m$.
- *Irradiance* - Integral dari *spectral irradiance* untuk keseluruhan panjang gelombang, satuan : W/m^2 .
- Radiansi - Integral waktu dari *irradiance* untuk jangka waktu tertentu. Oleh sebab itu, satuannya sama dengan satuan energi, yaitu J/m^2 – hari, J/m^2 – bulan atau J/m^2 – tahun.

Di antara ketiga besaran tersebut, yang akan digunakan dalam analisa adalah W/m^2 karena satuan ini yang biasa dipakai dalam *datasheet*, sedangkan besaran radiansi biasanya digunakan untuk menghitung estimasi daya keluaran pada instalasi sistem. *Irradiance* merupakan sumber energi bagi sel surya, sehingga keluarannya sangat bergantung oleh perubahan *irradiance*. Gambar 2.4 memberikan contoh perubahan *irradiance* terhadap kurva daya modul surya.

Dilihat dari Gambar 2.4, keluaran daya berbanding lurus dengan *irradiance*. Isc lebih terpengaruh oleh perubahan *irradiance* daripada Voc. Hal ini sesuai dengan penjelasan cahaya sebagai paket-paket foton. Pada saat *irradiance* tinggi, yaitu pada saat jumlah foton banyak, arus yang dihasilkan juga besar. Demikian pula sebaliknya, sehingga arus yang dihasilkan berbanding lurus terhadap jumlah foton.

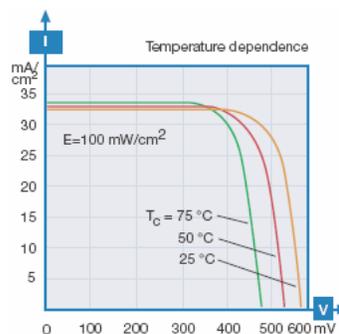


Gambar 2.4 Karakteristik kurva V-I terhadap perubahan *irradiance*[4]

Pengujian modul surya pada *datasheet* umumnya dilakukan pada *Standard Test Condition* (STC), yaitu *Air Mass* (AM) 1,5; *irradiance* 1000 W/m^2 dan temperatur $25\text{ }^\circ\text{C}$. Dalam kondisi nyata, nilai *irradiance* tidak mencapai nilai tersebut, bergantung dari posisi lintang, posisi matahari dan kondisi cuaca. Nilai *irradiance* pada lokasi tertentu juga bervariasi dari bulan ke bulan.

2.2.5 Pengaruh Suhu Terhadap Sel Surya

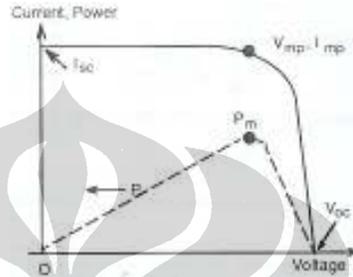
Irradiance bukanlah satu-satunya parameter eksternal yang memiliki pengaruh penting pada kurva V-I, ada juga pengaruh suhu. Suhu memiliki peranan penting untuk memprediksi karakteristik V-I. Komponen semikonduktor seperti dioda sensitif terhadap perubahan suhu, begitu pula dengan sel surya. Pada Gambar 2.5 terlihat bahwa suhu berpengaruh banyak pada Voc daripada terhadap Isc, berkebalikkan dengan pengaruh *irradiance*. Kenaikkan suhu mengurangi Voc sel surya. Hal ini disebabkan peningkatan suhu menurunkan *band gap* semikonduktor.



Gambar 2.5 Karakteristik kurva V-I terhadap perubahan suhu[4]

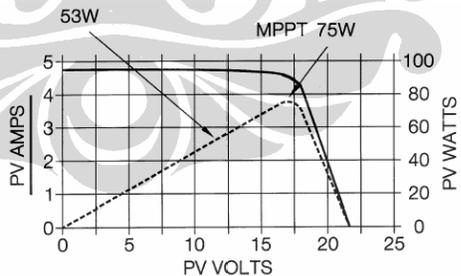
2.2.6 Maximum Power Point (MPP)

Hasil perkalian arus dan tegangan pada setiap titik kurva V-I (Gambar 2.6) menyatakan besar dayanya. Kurva daya pada saat sel surya bekerja berbentuk segitiga. Secara grafis, daya maksimum pada sel adalah puncak dari segitiga yang memiliki luas terbesar. Titik ini disebut dengan *maximum power point* (MPP), hasil dari $V_{mp} \times I_{mp}$.



Gambar 2.6 Kurva V-I dan kurva daya sel surya[5]

Bila modul surya bekerja pada tegangan 12 V, maka dilihat dari kurva daya (Gambar 2.7), daya keluaran adalah 53 W. Sedangkan apabila modul dapat bekerja pada tegangan 17 V, maka daya keluaran dapat mencapai 75 W (MPP). Sistem kontrol ini umumnya menggunakan *DC-DC converter* dan algoritma pencari MPP agar sistem dapat bekerja optimal. Pada sub-bab selanjutnya akan dilihat pergeseran nilai MPP ini pada rangkaian modul surya akibat kerusakan modul surya.



Gambar 2.7 Kurva daya modul surya 75 W pada MPP[6]

Hal yang perlu diperhatikan pada level aplikasi adalah sensor yang dipakai untuk mengkalkulasikan MPP. Sensor yang dipakai berkaitan dengan algoritma yang diterapkan pada sistem kontrol. Tabel 2.1 menjelaskan perbandingan algoritma dan sensor yang dipakai untuk algoritma tersebut.

Tabel 2.1 Perbandingan Metode *Maximum Power Point Tracking*[7]

MPPT Technique	True MPPT?	Implementation Complexity	Sensed Parameters
Hill-climbing/P&O	Yes	Low	Voltage, Current
IncCond	Yes	Medium	Voltage, Current
Fractional V_{oc}	No	Low	Voltage
Fractional I_{sc}	No	Medium	Current
Fuzzy Logic Control	Yes	High	Varies
Neural Network	Yes	High	Varies
RCC	Yes	Low	Voltage, Current
Current Sweep	Yes	High	Voltage, Current
DC Link Capacitor Droop Control	No	Low	Voltage
Load I or V Maximization	No	Low	Voltage, Current
dP/dV or dP/dI Feedback Control	Yes	Medium	Voltage, Current
Array Reconfiguration	No	High	Voltage, Current
Linear Current Control	No	Medium	Irradiance
I_{MPP} & V_{MPP} Computation	Yes	Medium	Irradiance, Temperature
State-based MPPT	Yes	High	Voltage, Current
OCC MPPT	No	Medium	Current
BFV	No	Low	None
LRCM	No	High	Voltage, Current
Slide Control	Yes	Medium	Voltage, Current

Terlihat dari Tabel 2.1 bahwa sensor yang terbanyak dipakai adalah parameter arus dan tegangan. Oleh karena itu, untuk kemudahan implementasi, maka algoritma pendeteksi kerusakan modul surya pada rangkaian modul surya yang dirancang pada tesis ini menggunakan parameter nilai arus dan tegangan.

2.2.7 Efisiensi Sel Surya

Perbandingan performansi antara satu modul surya dengan modul surya lainnya umumnya dilihat dari efisiensinya. Banyaknya energi matahari dalam bentuk foton yang diserap sel surya menentukan efisiensinya. Efisiensi modul surya didefinisikan sebagai perbandingan daya keluaran dengan daya masukan. Daya masukan dihitung sebagai *irradiance* yang diterima oleh permukaan sel surya. Nilai efisiensi ini selalu dihitung pada kondisi standar (*irradiance* = 1000 W/m², AM 1,5 dan temperatur 25⁰C). Rumus umum efisiensi adalah[4] :

$$\eta = FF V_{oc} I_{sc} / G \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

dengan FF adalah *fill factor*, yaitu parameter yang menyatakan seberapa jauh $I_{sc} * V_{oc}$ dari daya maksimal $V_m * I_m$ yang dihasilkan sel surya.

$$FF = V_m I_m / V_{oc} I_{sc} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

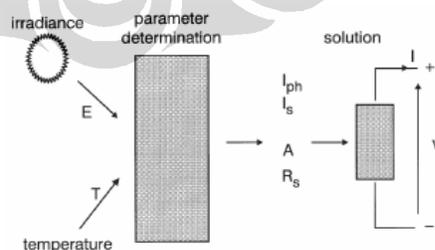
Modul surya komersial berbahan *crystalline* saat ini memiliki efisiensi 14-16 %. Pengaruh bahan adalah dominan dalam hal ini. Contohnya sel surya berbahan *polymer / organic* ($\eta = 4-5\%$), *amorphous silicon* ($\eta = 6\%$), *multijunction* ($\eta = 30\%$)[2].

2.3 PEMODELAN MODUL SURYA

Perancangan simulasi sistem pendeteksi kerusakan modul surya memerlukan pemodelan dan rumusan matematik modul surya. Kedua hal ini kemudian digunakan untuk menggambarkan grafik karakteristik modul surya pada kondisi normal dan pada kondisi dengan kerusakan modul.

Telah ada banyak *equivalent circuit* yang dapat dipakai untuk menggambarkan karakteristik sel surya. Namun, *equivalent circuit* tersebut memiliki parameter-parameter tersendiri yang dipakai untuk menyelesaikan persamaan matematisnya. Semakin lengkap sebuah *equivalent circuit*, maka karakteristik yang dihasilkan akan semakin menyamai kondisi nyata sel surya tetapi semakin banyak pula dan spesifik parameter serta konstanta yang diperlukan. Pada tesis ini, parameter yang diperlukan untuk simulasi diambil hanya dari *datasheet* modul surya yang disediakan oleh pabrik pembuat.

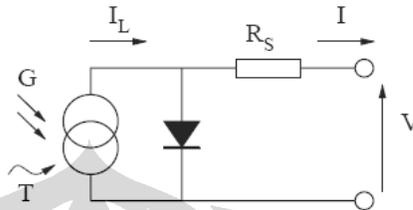
Pemodelan yang cocok untuk parameter dari *datasheet* adalah model dengan satu dioda. Proses pemodelan dapat dilihat pada Gambar 2.8 membutuhkan parameter dari *datasheet*, hanya nilai *diode quality factor* yang perlu dicari berdasarkan total *error* terkecil.



Gambar 2.8 Proses pemodelan[8]

Secara sederhana, sel surya adalah *pn-junction* yang keluarannya bergantung dari energi cahaya yang jatuh ke permukaan sel. Dalam hal ini, sel dimodelkan dengan komponen fotodiode dengan sumber arus. Pada kondisi nyata,

aliran arus ini mengalami hambatan di material semikonduktor dan resistansi pada kontak eksternal. Kondisi ini digabung menjadi total resistansi seri dan dimodelkan dengan sebuah resistor seri. Keseluruhan *equivalent circuit* untuk model satu dioda yang telah disederhanakan dari Gow & Manning dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 *Equivalent circuit* model sel surya satu dioda[9]

Rumusan matematis dari rangkaian tersebut dapat diambil dari persamaan umum dioda, yaitu[9] :

$$I = I_L - I_0(e^{q(V+IR_s)/nkT} - 1) \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

Solusi persamaan ini menggunakan metode iterasi apabila nilai parameter telah diketahui. Parameter-parameter ini berbeda untuk tiap tipe sel dan akan bervariasi pada lingkungan eksternal (*irradiance* dan suhu). Pengaruh *irradiance* terhadap *photocurrent* adalah linear dan besarnya pada suhu T_1 dinyatakan dengan[9] :

$$I_{L(T_1)} = G * I_{SC(T_1,nom)} / G_{(nom)} \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

dengan $I_{L(T_1)}$ = arus yang dihasilkan cahaya pada suhu T_1 dan *irradiance* G

$I_{sc_T_1}$ = arus hubung singkat pada T_1

G = *irradiance* (Suns)

Arus yang dihasilkan pada *irradiance* konstan dengan memperhitungkan efek suhu pada *pn-junction* adalah[9] :

$$I_L = I_{L(T_1)}(1 + K_0(T - T_1)) \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

Konstanta K_0 dapat ditentukan dari I_{sc} vs T, yaitu[9] :

$$K_0 = (I_{SC(T_2)} - I_{SC(T_1)}) / (T_2 - T_1) \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

Arus saturasi dioda pada saat panjar mundur dengan pengaruh suhu dirumuskan sebagai berikut[9]:

$$I_0 = I_{0(T_1)} * (T/T_1)^{3/n} * e^{-qV_g/nk*(1/T-1/T_1)} \dots\dots\dots (2.14)$$

$$I_{0(T_1)} = I_{SC(T_1)} / (e^{qV_{OC(T_1)}/nkT_1} - 1) \dots\dots\dots (2.15)$$

Nilai resistansi seri didapat dari kemiringan kurva V-I. R_s terutama berpengaruh pada kemiringan kurva di $V = V_{oc}$. Bentuk kemiringan ini menentukan MPP. Nilai R_s dihitung menggunakan rumusan[9] :

$$R_s = -dV/dI_{V_{OC}} - 1/X_V \dots\dots\dots (2.16)$$

$$X_V = I_{0(T_1)} * q/nkT_1 * e^{qV_{OC(T_1)}/nkT_1} \dots\dots\dots (2.17)$$

Persamaan (2.11) sampai Persamaan (2.17) digunakan untuk menyelesaikan Persamaan (2.10). Metode iterasi Newton-Raphson[8] diperlukan untuk memperoleh nilai I yang konvergen pada Persamaan (2.10) :

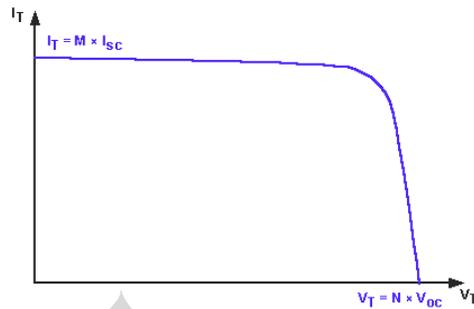
$$I_n = I_{n-1} - f(I_{n-1}) / f'(I_{n-1}) \dots\dots\dots (2.18)$$

2.4 RANGKAIAN MODUL SURYA

2.4.1 Koneksi Antar Modul Surya

Sebuah sel surya memiliki keterbatasan untuk menyuplai daya, sehingga pada aplikasi, sel surya jarang digunakan secara individual. Sel-sel yang identik umumnya dikoneksi secara seri untuk membuat sebuah modul. Alasan koneksi secara seri adalah maksimum tegangan yang dihasilkan sel surya hanya sekitar 600 mV[2]. Oleh sebab itu, dibutuhkan 36 sel seri untuk menghasilkan modul dengan tegangan nominal 12 V, sedangkan arus tetap sama dalam susunan seri tersebut, yaitu sekitar 30 mA/cm² pada irradianse 100 mW/cm²[3]. Modul ini kemudian dikoneksi untuk membentuk sebuah rangkaian modul surya yang mampu memenuhi kebutuhan daya bagi beban. Pengaruh koneksi seri paralel terhadap kurva V-I dapat dilihat pada Gambar 2.10. Pengaruh arus dan tegangan sel pada modul sama dengan pengaruh arus dan tegangan modul pada sistem, perbedaannya hanya pada skala. Persamaan umum interkoneksi sel maupun modul surya untuk susunan N seri dan M paralel adalah[2] :

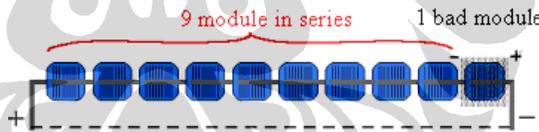
$$I_T = M \cdot I_L - M \cdot I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V_T / N)}{nkT} \right] - 1 \right\} \dots\dots\dots (2.19)$$



Gambar 2.10 Kurva V-I untuk N seri dan M paralel[2]

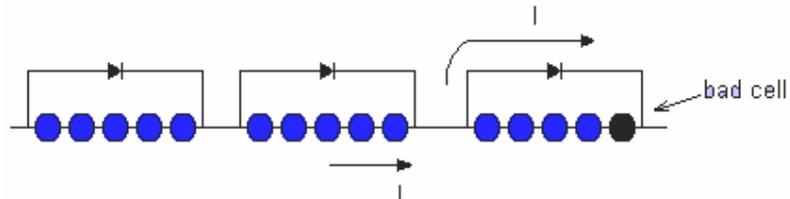
2.4.2 "Hot Spot"

Apabila satu atau lebih modul surya pada sistem mengalami kerusakan, maka modul pasif ini dapat menyerap daya yang dihasilkan oleh modul aktif. Gambar 2.11 menggambarkan sebuah rangkaian modul dengan sebuah modul pasif. Penyerapan daya oleh modul pasif terjadi di area yang kecil dari *pn-junction*. Akibatnya modul mengalami kenaikan suhu lokal (*hot spot*) yang akhirnya dapat merusak modul secara permanen.



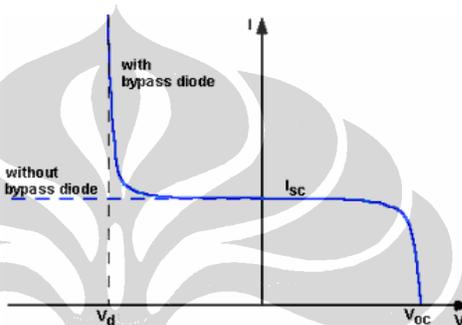
Gambar 2.11 Satu modul pasif dalam rangkaian[2]

Salah satu solusi untuk mengatasi masalah *hot spot* ini adalah dengan memasang *bypass diode* secara paralel pada rangkaian modul surya seperti pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Pemasangan *bypass diode* pada rangkaian modul surya[2]

Pada kondisi normal, setiap dioda bekerja pada kondisi panjar mundur dan setiap modul menghasilkan dayanya masing-masing. Pada saat sebuah modul rusak dan berperan menjadi resistif / panjar mundur terhadap modul yang lain, maka dioda akan aktif, sehingga arus dalam rangkaian mengalir melalui dioda dan tidak menyuplai ke modul surya pasif. Jadi, penambahan *bypass diode* ini berguna untuk melindungi modul surya dari masalah "hot spot" dan sekaligus mencegah pengurangan daya akibat modul surya pasif. Efeknya secara grafis dapat dilihat pada Gambar 2.13.

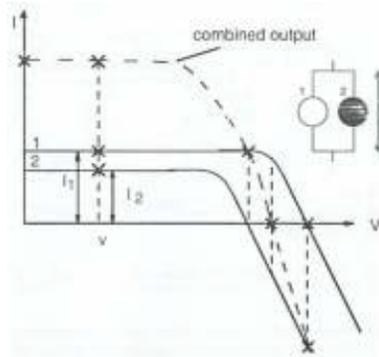


Gambar 2.13 Keluaran daya dengan dan tanpa *bypass diode*[2]

Tegangan panjar mundur pada modul tanpa *bypass diode* dapat terus meningkat. Peningkatan tegangan yang disertai dengan peningkatan suhu ini menimbulkan masalah *hot spot* yang dapat merusak modul. Tegangan panjar mundur modul dengan *bypass diode* tetap konstan. Pada saat *bypass diode* aktif, *bypass diode* mencegah kenaikan tegangan tetapi tetap mengijinkan arus mengalir melewati rangkaian.

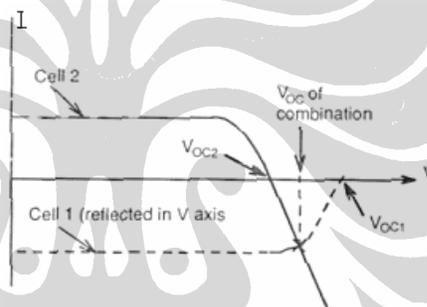
2.4.3 Perbedaan Daya Antar Modul Pada Rangkaian Paralel Modul Surya

Bila dua modul surya dirangkai secara paralel, maka sebuah modul yang tidak identik dapat menghasilkan daya yang lebih rendah. Akibat dari susunan seperti ini, kedua modul memiliki tegangan yang sama dengan arus total sebesar $I_1 + I_2$ berdasarkan hukum Kirchhoff. Kombinasi arus untuk rangkaian paralel ini dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Kombinasi arus pada dua modul paralel yang tidak identik[5]

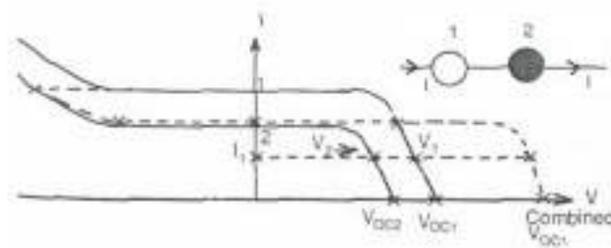
Cara yang mudah untuk mengkalkulasikan kombinasi Voc pada rangkaian dua modul paralel ditunjukkan pada Gambar 2.15. Salah satu kurva modul dibalik secara horisontal, sehingga titik pertemuan kedua kurva pada sumbu X adalah Voc yang baru[5].



Gambar 2.15 Metode menentukan Voc pada rangkaian dua modul surya paralel [5]

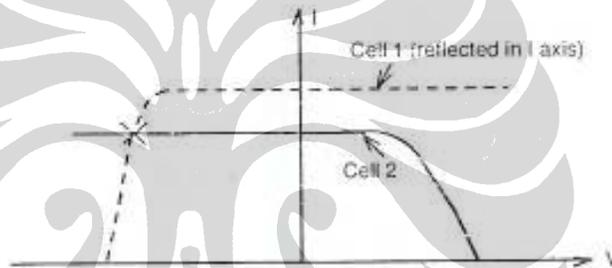
2.4.4 Perbedaan Daya Antar Modul Pada Rangkaian Seri Modul Surya

Bila dua modul surya dirangkai secara seri, maka sebuah modul yang tidak identik dapat menghasilkan daya yang lebih rendah. Akibat dari susunan seperti ini, kedua modul memiliki arus yang sama dengan tegangan total sebesar $V_{OC1} + V_{OC2}$ berdasarkan hukum Kirchoff. Kombinasi tegangan untuk rangkaian seri ini dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Kombinasi Voc pada dua modul surya seri yang tidak identik[5]

Cara yang mudah untuk mengkalkulasikan kombinasi Isc pada rangkaian dua modul seri ditunjukkan pada Gambar 2.17. Salah satu kurva modul dibalik secara vertikal, sehingga titik pertemuannya ($V_{OC1} + V_{OC2} = 0$) adalah Isc yang baru[5].



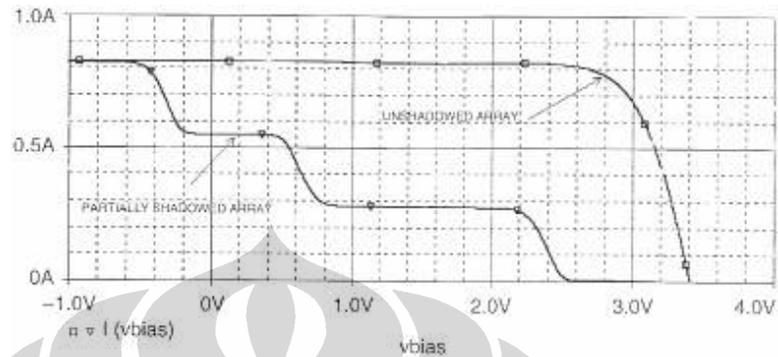
Gambar 2.17 Metode menentukan Isc pada rangkaian dua modul surya seri[5]

2.5 KERUSAKAN MODUL SURYA

Umumnya modul surya dilindungi oleh *bypass diode* untuk mencegah masalah "hot spot". Bila sebuah modul dalam rangkaian mengalami kerusakan, maka arus listrik dalam rangkaian tidak diserap oleh modul pasif, melainkan dilewatkan melalui *bypass diode*. Daya yang terdisipasi pada *bypass diode* ini dapat menyebabkan kurva karakteristik sistem memiliki "jenjang / ladder". Kurva pada Gambar 2.18 adalah kurva keluaran modul akibat adanya kerusakan sel surya pada modul.

Kurva ini didapat dari simulasi sebuah modul surya yang tersusun dari enam sel seri dan tiga sel paralel[3]. Modul ini disimulasikan dengan kondisi beberapa sel tidak menghasilkan daya sama sekali, sehingga dapat dianalogikan dengan kerusakan sel. Kontur grafik kurva pada rangkaian modul surya yang memiliki modul yang rusak sama dengan kontur grafik kurva pada modul surya

yang memiliki sel yang rusak[5], maka kontur grafik kurva pada rangkaian modul surya yang memiliki modul yang rusak akan memiliki jenjang pada kurva karakteristiknya.



Gambar 2.18 Kurva modul surya yang beberapa selnya tidak menghasilkan daya[3]