

Sel Fotovoltaik

Oleh : A. Lubis, M. Djamin, R. Mulyadi.

The logo for BPPT (Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi) is centered on the page. It features the letters 'BPPT' in a bold, sans-serif font. The 'B' and 'P' are blue, while the 'P' and 'T' are red. A large, light blue, stylized swoosh or orbit shape surrounds the text, starting from the bottom left and curving around the top and right sides.

BPPT

INTISARI.

Dari bermacam-macam energi alternatif, energi matahari merupakan salah satu bentuk alternatif energi yang cocok untuk menggantikan sebagian kecil energi konvensional yang sudah ada, karena energi matahari tidak terbatas.

Sel fotovoltaik dapat didefinisikan sebagai pengubah energi matahari menjadi energi listrik secara langsung, dan merupakan figure yang sangat menarik sebagai pembangkit tenaga listrik untuk daerah terpencil dimana pada daerah tersebut sulit untuk dicapai oleh jaringan listrik.

PENDAHULUAN.

Penelitian tentang timbulnya tegangan listrik pada suatu struktur sebagai akibat adanya interaksi dengan cahaya, telah dilakukan orang sekitar 130 tahun yang lalu. Efek fotovoltaik ditemukan pertama kali oleh Becquereil pada tahun 1939, dalam percobaannya di dalam larutan elektrolit, sedangkan element silikon didapatkan oleh Berzelius pada tahun 1817, yang mana di kemudian hari dipergunakan sebagai bahan dasar sel fotovoltaik dan komponen elektronik lainnya.

Dengan kemajuan perkembangan silikon teknologi pada waktu itu, teknologi sambungan p/n dengan metoda penumbuhan diciptakan pada tahun 1941, dimana struktur tersebut merupakan struktur dasar daripada sel fotovoltaik. Efisiensi konversi sel fotovoltaik yang pertama kali dibuat pada tahun itu mencapai 6%, dan setelah melalui suatu rangkaian perbaikan dan penyempurnaan metode proses, maka pada tahun 1958 peningkatan efisiensi sel fotovoltaik dapat mencapai 14%. Dari sejak itu hingga sekarang, silikon sel masih menempati posisi yang dapat diandalkan, terutama setelah ditemukannya metoda difusi untuk pembuatan sambungan p/n pada tahun 1957 oleh Fuller.

Kecenderungan untuk menurunkan harga sel fotovoltaik, memacu para ilmuwan untuk mencari bahan lain yang lebih murah seperti Cu, Cu₂O, CdS, Cu₂S dan Amorphus silikon, untuk dapat dibuat dan dipasarkan oleh para produsen sel fotovoltaik dengan harga yang murah.

BAHAN DASAR SEL FOTOVOLTAIK.

1. Bahan Dasar :

Seluruh bahan semi konduktor dapat digunakan sebagai bahan dasar pembuatan sel fotovoltaik. Dari sekian banyak bahan semi konduktor, hanya beberapa jenis saja yang dapat dipertimbangkan untuk dipakai sebagai bahan dasar sel fotovoltaik, antara lain : Silikon, Galium Arsenida, Cadmium Sulfida, Cupro Sulfida, dan beberapa jenis lainnya. Pertimbangan penggunaan bahan dasar meliputi dari segi kemudahan untuk didapat, ekonomis dan daya tahan yang sangat lama. Sel fotovoltaik yang menggunakan bahan silikon telah mencapai tingkat pemakaian yang sempurna, hal ini disebabkan antara lain : riset intensive yang cukup lama, dan tersedianya bahan dalam jumlah yang sangat banyak di bumi ini.

Sifat-sifat Bahan Semikonduktor.

Menurut "teori pita energi" dalam fisika semikonduktor, terjadinya arus listrik pada metal (konduktor) maupun semi-metal (semikonduktor) adalah sebagai akibat adanya aliran elektron bebas pada pita konduksi yang dipengaruhi oleh medan luar. Elektron-elektron pada pita valensi akan tereksitasi ke pita konduksi sebagai akibat adanya medan luar. Berpindahannya elektron dari pita valensi ke pita konduksi menyebabkan terbentuknya "hole" di pita valensi, dan sebagai "elektron" pada pita konduksi, maka elektron yang datang hasil eksitasi dari pita valensi akan mendorong elektron yang telah ada pada pita konduksi tersebut. Pergerakan elektron pada pita konduksi, dan hole pada pita valensi inilah yang menyebabkan adanya arus listrik pada bahan semikonduktor (diagram pita energi untuk atom-atom donor dan akseptor dapat dilihat pada gambar 1).

Rapat aliran listrik yang disebabkan oleh hole dinotasikan J_p , dan yang disebabkan oleh elektron dinotasikan sebagai J_n . Dengan demikian, kerapatan arus yang ditimbulkan pada bahan semikonduktor tersebut adalah :

$$J = J_p + J_n \dots\dots\dots (1)$$

Jarak pita valensi dan pita konduksi pada bahan semikonduktor disebut energi gap (E_g), dan besarnya energi gap ini tergantung dari pada masing-masing bahan semikonduktor. Dengan memperkecil jarak E_g , maka timbulnya elektron pada pita konduksi dan hole pada pita valensi akan dapat diperbanyak. Suatu cara untuk memperkecil E_g ialah dengan memasukkan atom-atom asing (dopant) ke dalam semikonduktor yang tingkat energinya sedikit di bawah E_c (atom donor), atau sedikit di atas E_v (atom akseptor).

PRINSIP KERJA SEL FOTOVOLTAIK.

Sel fotovoltaiik merupakan penggabungan kedua jenis bahan semikonduktor tipe p dan semikonduktor tipe n dimana penggabungan ini mempunyai istilah teknik yang lazim disebut "dioda" (lihat gambar 2). Dioda sambungan p/n dapat dilihat pada gambar 2.

Elektron dan hole bebas yang terdapat pada kedua bahan tersebut, terbentuk ketika sel tersebut menerima medan dari luar berupa berkas cahaya yang mempunyai energi E_g . Berkas cahaya berupa photon yang mempunyai energi E_g jatuh pada daerah di sekitar sambungan, maka photon yang terserap tersebut akan menumbuk elektron pada pita valensi (E_v), sebagai akibat tumbukan photon tersebut, akan menyebabkan elektron-elektron pada pita valensi tereksitasi ke pita konduksi. Pada saat yang sama positip hole terbentuk pada pita valensi. Dengan demikian berkas cahaya yang datang dengan energi E_g akan menimbulkan pasangan elektron dan hole pada sambungan p/n tersebut. Elektron dan positip hole mengalir dengan arah yang berlawanan. Positip hole yang berada pada daerah n, mengalir ke daerah p dan elektron mengalir dari daerah p ke daerah n.

Arus listrik yang timbul akan bergerak dari kanan ke kiri, yaitu searah dengan pergerakan positip hole yang bergerak dari daerah negatip ke daerah positip.

Apabila kedua sisi dari sel fotovoltaiik dihubungkan dengan beban luar, maka arus listrik akan mengalir pada rangkaian luar selama partikel cahaya (photon) menumbuk sel tersebut. Skematik operasi kerja dari sel fotovoltaiik tersebut dapat dilihat pada gambar 2 dan 3.

KARAKTERISTIK SEL FOTOVOLTAIK.

Sel fotovoltaik yang dalam keadaan tanpa disinari (gelap), adalah merupakan dioda biasa, yang mempunyai persamaan arus sebagai berikut :

$$I_d = I_{o1} \exp (qV / A_o KT) - 1 \quad \dots \dots \dots (2)$$

Untuk sel fotovoltaik yang ideal, faktor kesempurnaan hubungan p/n atau yang dinotasikan sebagai $A_o = 1$. Dengan demikian persamaan arus sel fotovoltaik yang ideal adalah :

$$I_d = I \exp (qV / KT) - \dots \dots \dots (3)$$

Pada saat sel fotovoltaik disinari dan dihubungkan dengan beban, maka timbul arus photo I_{ph} , dan pada saat yang bersamaan akan timbul arus bocor yang ditimbulkan oleh dioda pada keadaan gelap I . Dengan demikian arus total yang keluar melalui beban akan berkurang sebagai akibat adanya arus gelap pada dioda. Untuk mempermudah menganalisa karakter sel fotovoltaik, digunakan suatu rangkaian pengganti seperti yang terlihat pada gambar 4, untuk dipakai sebagai model.

Arus photo yang dinotasikan oleh I_{ph} dalam arah "forward" (maju), sedangkan dalam arah yang berlawanan adalah I_d dan I_s . Dari rangkaian pengganti ini dapat diturunkan hubungan sebagai berikut :

$$I_{out} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) = I_{ph} - \left(\frac{V_{out}}{R_{sh}} \right) - I_d \dots \dots \dots (4)$$

Dari persamaan (3) dan (4) dapat dituliskan :

$$I_{out} = I_{ph} - I_s \left(\exp (qV_{out} / KT) - 1 \right) \dots \dots \dots (5)$$

Pada rangkaian tertutup, tahanan beban mendekati nol, maka akan diperoleh :

$$I_{ph} = I_{sc}$$

dan

$$V_{oc} = \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_s} \right) + 1 \dots \dots \dots (6)$$

Dengan memperhitungkan faktor ideality dan resistivitas basis, maka dapat ditentukan :

$$V_m = V_{oc} - A \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left| 1 + \frac{V_m}{A \left(\frac{kT}{q} \right)} \right| \dots \dots (7)$$

$$I_m = I_{sc} - I_o \exp \left(V/A \left(\frac{kT}{q} \right) - 1 \right) \dots \dots \dots (8)$$

Grafik karakteristik daripada sel fotovoltaik berdasarkan rumus yang ditunjukkan persamaan (2) dan (5) dapat dilihat pada gambar 5.

Garis grafik yang di atas merupakan penjabaran persamaan (2), yaitu karakteristik dalam keadaan tanpa disinari (gelap). Sedangkan grafik yang berada di bawah merupakan penjabaran persamaan (5), dimana karakteristik arus dan tegangan sel fotovoltaik dalam keadaan disinari adalah merupakan pergeseran kurva karakteristik arus-tegangan pada keadaan gelap sebesar I_{sc} .

Daerah kwadran keempat yang dibatasi oleh kurva sel fotovoltaik yang disinari merupakan gambaran daya listrik yang dibangkitkan oleh sel tersebut.

EFISIENSI SEL FOTOVOLTAIK.

Efisiensi konversi sel fotovoltaik merupakan faktor yang terpenting dalam mendisain sel tersebut. Efisiensi itu dihitung berdasarkan referensi spektrum matahari yang datang dan menumbuk permukaan sel. Dengan demikian, variasi efisiensi tersebut dapat berubah atas dasar spektrum radiasi yang datang, yaitu spektrum yang datang pada permukaan laut (didefinisikan sebagai AM 1) dan spektrum yang datang di angkasa luar (didefinisikan sebagai AM 0). Spektrum AM0 (air mass nol) dipertimbangkan untuk sel yang dipergunakan di angkasa luar. Sedangkan spektrum AM 1 (air mass 1) adalah pertimbangan untuk sel yang dipergunakan di permukaan bumi, walaupun lokasi penempatan sel tidak pernah mencapai kondisi tersebut. Standard daya radiasi yang datang persatuan luas dalam kondisi AM 1 adalah 100 mW/cm², sedangkan standard daya radiasi yang datang pada AM0 adalah 135 mW/cm².

Persamaan umum dari efisiensi sel fotovoltaik adalah :

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_{in}} \quad \dots \dots \dots (7)$$

P_{in} = daya input; V_m = tegangan maksimum; I_m = arus maksimum.

Dimana radiasi daya input adalah :

$$P_{in} = S \int_0^{\infty} N_o(\lambda) \frac{hc}{\lambda} d\lambda \quad \dots \dots \dots (8)$$

Keterangan :

S = luas total

$N_o(\lambda)$ = jumlah foto n/cm det satuan panjang gelombang

$\frac{hc}{\lambda}$ = energi foton

TEKNOLOGI PROSES.

bermacam-macam teknologi telah diteliti oleh para ahli di dunia untuk merancang dan membuat sel fotovoltaik yang lebih baik, lebih murah dan lebih efisien. Berikut ini disampaikan beberapa generasi teknologi yang telah dilakukan oleh para ahli.

Teknologi Generasi Pertama.

Teknologi generasi pertama menggunakan bahan silikon monokristal dan polikristal yang berupa lempengan, dengan ukuran tertentu. Metoda teknologi untuk memproses sel fotovoltaik pada generasi ini adalah teknologi difusi. Teknologi generasi pertama ini telah mencapai tingkat yang sempurna, karena riset yang intensive telah dilakukan cukup lama, disamping itu jenis metoda teknologi ini telah dilakukan untuk memproses komponen elektronik. Rintangan yang utama untuk memproduksi sel fotovoltaik dengan menggunakan silikon monokristal adalah biaya proses materialnya sangat tinggi, karena bahan yang digunakannya merupakan bahan yang dipakai untuk produk komponen elektronik.

Percobaan dengan menggunakan metoda teknologi difusi telah dilakukan juga oleh staf BPP Teknologi, baik dengan menggunakan bahan monokristal silikon, maupun bahan silikon polikristal. Data-data penunjang percobaan tersebut dapat dilihat pada tabel 1.

Teknologi Generasi Kedua.

Teknologi generasi kedua adalah sel fotovoltaik dengan menggunakan bahan silikon berbentuk pita (ribbon), yang telah dirintis sejak tahun 1972 oleh para ahli di dunia. Tujuan mengembangkan teknologi ini adalah untuk mendapatkan teknologi proses yang kontinyu dan otomatis. Sehingga untuk memproduksi modul-modul sel yang sangat besar, dapat dihindarkan pemborosan pembuatan lempengan silikon. Teknologi pembuatannya dilakukan dengan jalan menarik pita silikon yang lebarnya 5–10 cm dari cairan silikon yang panas ($\pm 1400^{\circ}\text{C}$) dengan kecepatan 4–5 cm per menit, dan akan menghasilkan kira-kira 40 cm² pita silikon per menit.

Teknologi Generasi Ketiga.

Teknologi generasi ketiga pada umumnya disebut juga teknologi "thin film", adalah merupakan bentuk teknologi terakhir yang memberikan harapan bagi perkembangan sel fotovoltaik di masa datang. Metode tekno-

logi thin film ini berkemampuan memproduksi sel fotovoltaik dengan area yang luas dan bahan yang digunakan sangat murah. Metoda pembuatannya adalah dengan cara mendepositkan lapisan tipis bahan semikonduktor di atas substrat yang murah. Dengan munculnya teknologi generasi ketiga ini, maka penggunaan bahan dasar dapat ditekan harganya dengan sangat rendah, yang mengakibatkan harga produknya menjadi sangat murah. Salah satu bahan yang dapat menggunakan metode thin film ini adalah amorphous silikon.

Amorphous Silikon.

Amorphous silikon adalah bahan yang mempunyai masa depan yang baik bagi perkembangan sel fotovoltaik. Sifat **elektronis** dari bahan ini hampir sama dengan silikon kristal. Amorphous silikon memerlukan kira-kira 1 mikron untuk menyerap sinar, dan bahan ini dapat didepositkan secara kontinyu di atas lempengan/lembaran substrat dengan bermacam-macam metoda.

Ada dua macam metoda teknologi sel fotovoltaik dengan menggunakan bahan amorphous silikon yang sedang dikembangkan saat ini, yaitu "glow discharge deposition" dari gas yang mengandung silikon (SiH_4 atau $\text{SiF}_4 + \text{H}_2$) mendeposit amorphous silikon (a Si) pada substrat, dan pemakaian teknik "chemical vapor deposition" dari silane (Si_2H_6) yang juga mendeposit amorphous silikon pada substrat.

KESIMPULAN.

Pengubah energi matahari fotovoltaik mempunyai peranan yang cukup berarti bagi menunjang penghematan penggunaan bahan bakar minyak (BBM) di dalam negeri. Dengan banyaknya riset yang dilakukan oleh para ahli, maka kecenderungan untuk mendapatkan metoda yang terbaru dan ekonomis semakin cerah. Hal ini terbukti dengan didapatnya teknologi generasi ketiga, seperti apa yang telah diungkapkan di muka.

Sel fotovoltaik dengan menggunakan bahan amorphous silikon, mempunyai potensi yang sangat cerah untuk dapat mencapai sasaran harga penjualan yang murah, akan tetapi terlebih dahulu harus dilakukan penyempurnaan-penyempurnaan yang mantap terhadap keandalan dan stabilitas dari sel tersebut.

DAFTAR TABEL

Tabel 1
Data Sel Fotovoltaik yang Telah Dihasilkan

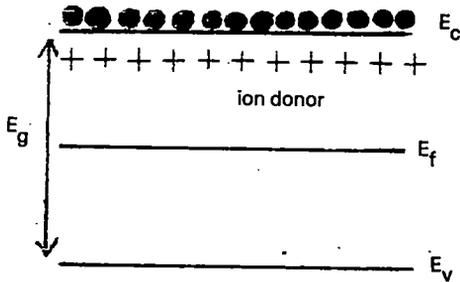
M a t e r i a l	Si Monokristal	Si Polikristal
	P	P
Tipe		Random : 1,1 ; 2,1
Resistivitas (— cm)	1 — 5	3,0 ; 3,3 7,0.
Tebal slice ()	320 — 350	350
Kedalaman sambungan ()	0,5	0,6
Sumber difusi	PO Cl ₃	PO Cl ₃
ARC, SiO ₂ (A°)	800 — 1000	800 — 1000
Kontak depan	Nikel elektroless plating	Nikel elektroless plating
Kontak belakang	Evaporasi A1	Evaporasi A1
Arus hubungan singkat, I _{sc} (mA)	195	250
Tegangan rangkaian terbuka, V _{oc} (mV)	488	460
Effisiensi	± 6%	± 5%

DAFTAR PUSTAKA

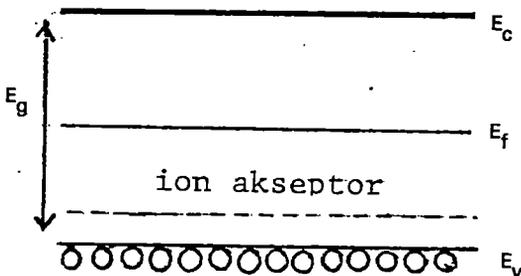
1. GROVE A. S., "Physics and Technology of Semiconductor Devices".
2. HOVEL H.J. "Semiconductor and Semimetal Solar Cell".
3. PAUL RAPPAPORT, "The Photovoltaic Effect and its Utilization" RCA Laboratories, Princeton. N.J.
4. RUNYAN. W.R. "Silicon Semiconductor Technology", Texas Instrument, Incorporated, USA, 1965.
5. WOLF. M. "Historical Development of Solar Cells", University of Pennsylvania.

DAFTAR GAMBAR

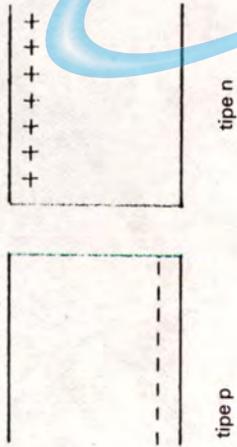
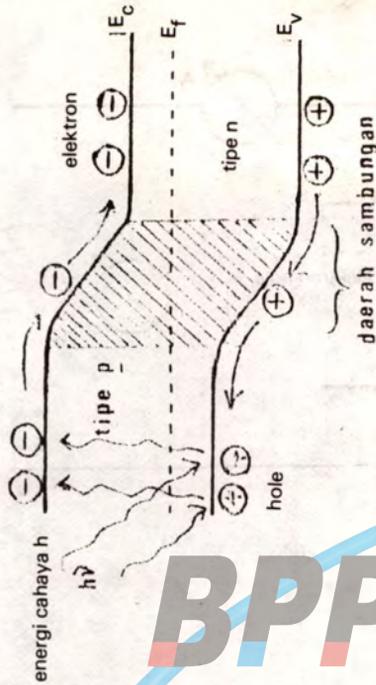
Gambar 1.



(a). Diagram energi untuk atom donor. Pada pita konduksi elektron bebas sangat banyak (mempunyai tipe n).

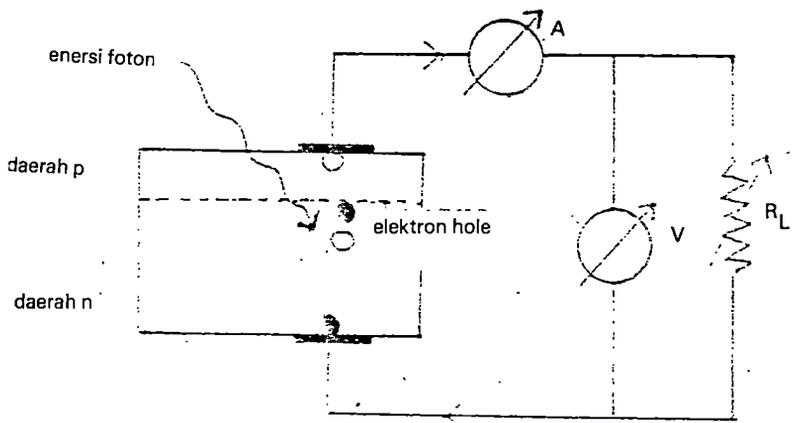


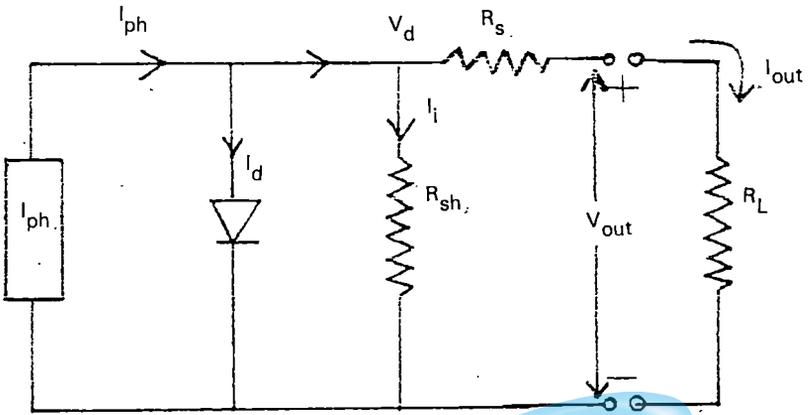
(b). Diagram energi untuk atom akseptor. Pada pita konduksi elektron bebas sangat sedikit (mempunyai tipe p).



Gambar 2.

Sambungan tipe p dan tipe n (dioda) sebagai dasar operasi kerja sel fotovoltaik.

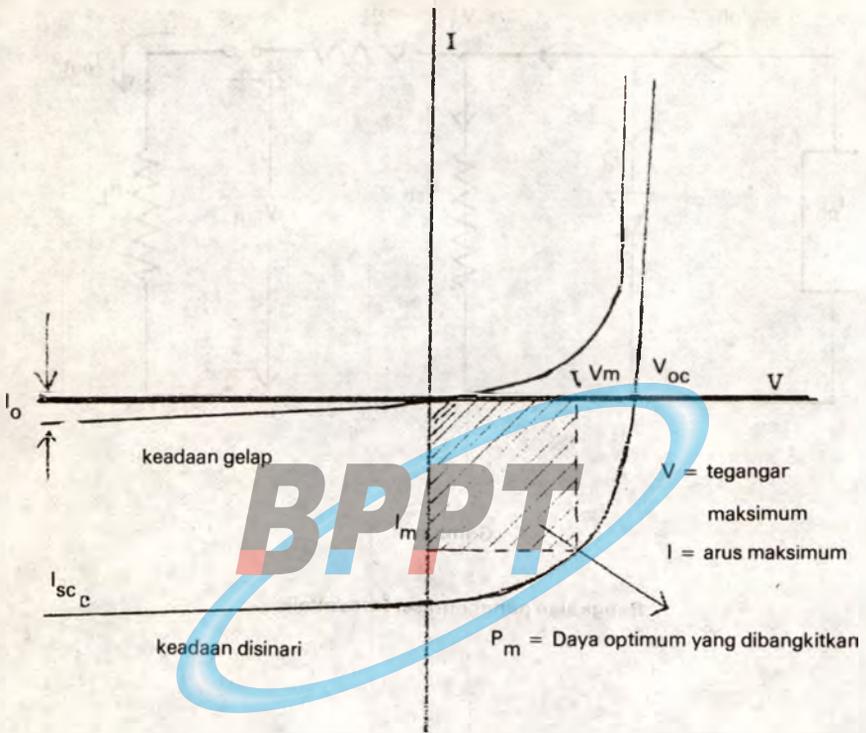




BPPT

Gambar 4.

Rangkaian pengganti sel fotovoltaik.



Gambar 5.

Grafik karakteristik sel fotovoltaik.