

PROSPEK PENELITIAN DAN APLIKASI FOTOVOLTAIK SEBAGAI SUMBER ENERGI ALTERNATIF DI INDONESIA

Oleh : Dr. Ariswan
Dosen Fisika FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta

Abstrak

Matahari adalah sumber energi utama kehidupan, karena dari seluruh aliran energi yang tersedia di permukaan bumi kira-kira 99,9 persen adalah berasal dari matahari. Matahari meradiasikan energi dalam bentuk gelombang elektromagnetik dengan spektrum panjang gelombangnya meliputi bentangan antara 250 nm dan 2500 nm. Spektrum panjang gelombang yang cukup panjang tersebut memungkinkan direalisasikan berbagai piranti-piranti yang bekerja pada panjang gelombang tertentu. Salah satu piranti untuk mengubah tenaga surya langsung menjadi listrik disebut sel surya. Dalam Makalah ini akan dibahas prospek penelitian bahan semikonduktor sel surya dan teknologi pemanfaatannya dalam upaya menggali energi alternatif nir polutan yang melimpah di Indonesia.

Kata kunci :Fotovoltaik, Sel Surya, semikonduktor

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi dunia terus meningkat seiring dengan tingkat kemajuan peradaban umat manusia. Pemanfaatan sumber energi konvensional seperti batubara, bahan bakar minyak, gas alam dan lain-lain di satu sisi memiliki biaya operasional murah, namun di sisi lainnya menghadapi kendala yang semakin besar. Kendala tersebut adalah sumbernya yang semakin berkurang dan yang lebih penting lagi munculnya persoalan polusi lingkungan hidup yang membahayakan bagi kehidupan umat manusia itu sendiri. Oleh karena itu pengembangan sumber tenaga alternatif yang terbarukan dan bebas polusi menjadi kebutuhan mendesak bagi seluruh umat manusia. Sumber-sumber tenaga terbarukan tersebut seperti tenaga surya, tenaga angin, tenaga air, tenaga gelombang air laut dan lain-lain.

Indonesia terletak di sepanjang garis katulistiwa, sehingga sumber-sumber energi terbarukan tersebut di atas sangat melimpah. Oleh karena itu semestinya pengembangan pemanfaatannya harus dilakukan baik dalam bentuk riset di laboratorium maupun

terapannya berupa teknologi tepat guna yang langsung dapat dimanfaatkan oleh masyarakat. Dalam hal energi surya, Indonesia menerima radiasi energi harian rata-rata persatuan luas persatuan waktu sebesar kira-kira 4,8 kilo watt/m². Namun demikian pemanfaatan energi tersebut belum dilakukan secara optimal baik dalam bidang riset maupun terapannya. Sebagian besar masyarakat memanfaatkan energi surya sebatas manfaat alamiahnya. Bahkan ada sebagian masyarakat berpandangan bahwa energi surya tidak ada manfaatnya, cenderung merugikan kehidupannya karena harus menggunakan protektor untuk menghindari sengatannya.

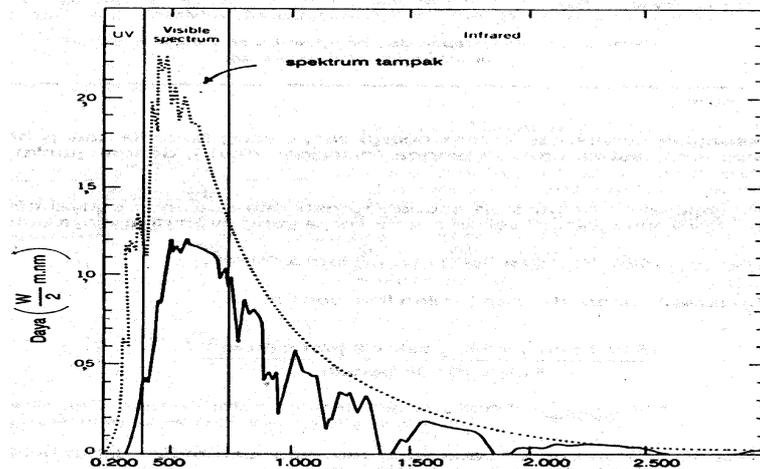
Makalah ini akan mengupas tentang teknologi pemanfaatan tenaga surya khususnya dalam bentuk fotovoltaiik, yakni terjadinya perubahan energi surya langsung menjadi energi listrik. Pirantinya disebut sel surya. Sel surya merupakan sambungan dua bahan semikonduktor atau lebih dengan tipe berbeda (tipe N dan tipe P). Berbagai kegiatan penelitian tentang bahan sel surya terus menerus dilakukan baik dalam skala laboratorium maupun industri. Hal ini sangat mungkin mengingat prospek yang sangat besar bagi pengembangan pemanfaatan teknologi sel surya di seluruh dunia apalagi di Indonesia. Makalah ini diharapkan mampu menggugah kesadaran kita semua bahwa Indonesia memiliki sumber-sumber energi terbarukan yang melimpah sehingga kegiatan riset energi terbarukan mendapatkan perhatian besar oleh para penentu kebijakan, baik di perguruan tinggi maupun di lembaga-lembaga riset lainnya.

II. TEKNOLOGI SEL SURYA

A. RADIASI MATAHARI

Matahari adalah salah satu bintang, yang merupakan sumber energi utama bagi kehidupan di bumi. Sumber energi matahari berasal dari reaksi fusi atom-atom Hidrogen menjadi Helium. Tekanan dan suhu yang sangat tinggi akan mengubah inti Hidrogen menjadi Helium dan menghasilkan energi yang sangat besar, sehingga temperatur inti

matahari mencapai kira-kira 15 juta kelvin. Energi tersebut dipancarkan sampai di bumi dalam bentuk catuan gelombang elektromagnetik. Spektrum panjang gelombang pancaran energi surya dapat ditunjukkan pada gambar 1.

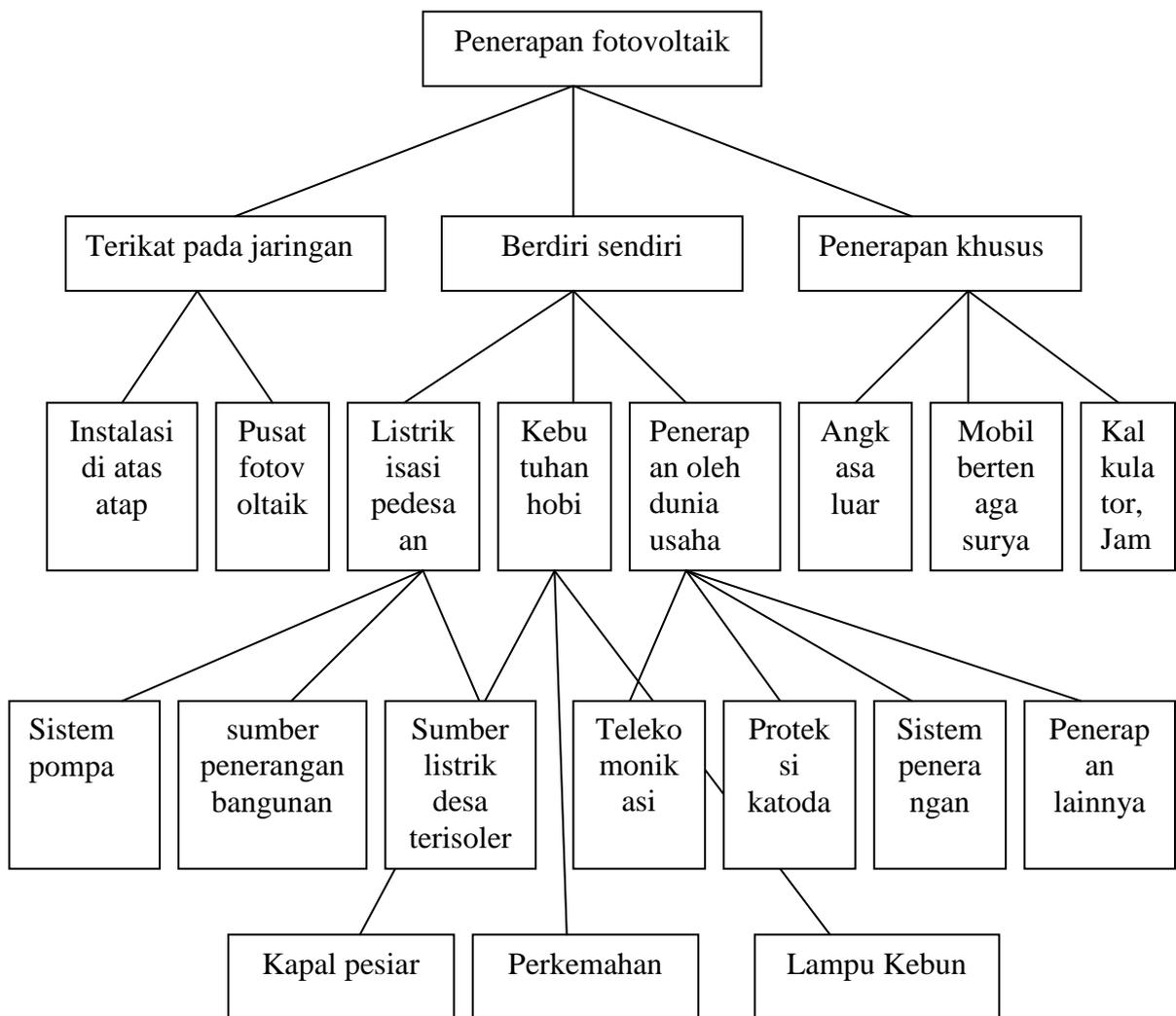


Gambar 1. Penyebaran panjang gelombang cahaya surya di atas atmosfer (garis titik-titik) dan di permukaan bumi (garis hitam)

Spektrum panjang gelombang cahaya matahari seperti tampak pada gambar 1, akan menentukan beberapa jenis teknologi konversi energi yang sesuai. Teknologi yang dimaksud adalah pembuatan piranti-piranti berbasis tenaga surya. Konversi energi surya menjadi energi lain secara umum dapat dibedakan menjadi tiga proses terpisah [1], yakni proses *heliocemical*, *heliotermal* dan *helioelectrical*. Proses *heliocemical* terjadi pada proses fotosintesis. Proses ini merupakan sumber dari semua bahan bakar fosil. Proses *heliotermal* adalah penyerapan (absorpsi) radiasi matahari dan secara langsung dikonversi menjadi energi termal., sedangkan proses *helioelectrical* yang utama adalah produksi listrik oleh sel-sel surya dan disebut juga efek fotovoltaiik.

Efek fotovoltaiik pertama kali ditemukan oleh Edmond Becquerel pada tahun 1839. Kemudian baru tahun 1912 Einstein menjelaskan secara teori, mekanisme fenomena tersebut, namun masih sebatas eksperimen di laboratorium. Baru setelah perang dunia ke II, yakni pada tahun 1950 direalisasikan sel surya pertama kalinya. Sel surya tersebut menggunakan bahan kristal silikon dan memiliki efisiensi konversi 4 %. Selanjutnya pada

1970 ketika dunia dihadapkan dengan krisis energi, penelitian mengenai sel surya dilakukan secara intensif. Hasilnya adalah bahwa pada tahun 1979 telah dibangun pusat listrik tenaga surya hingga mencapai 1 M Watt. Kebutuhan sumber energi dunia dengan proses nir polutan terus diperlukan, sehingga perkembangan listrik tenaga surya terus berkembang terutama di negara-negara maju. Pada tahun 1995 telah dibangun listrik tenaga surya sampai 500 M.watt dan sampai dengan tahun 2000 telah dibangun hingga mencapai 1 G.watt. Dewasa ini, listrik tenaga surya menjadi energi yang sangat diperlukan dalam kehidupan modern, oleh karena harganya yang semakin terjangkau dan yang lebih penting lagi adalah merupakan sumber energi nir polutan. Sejumlah aplikasi listrik tenaga surya tampak pada gambar 2 :

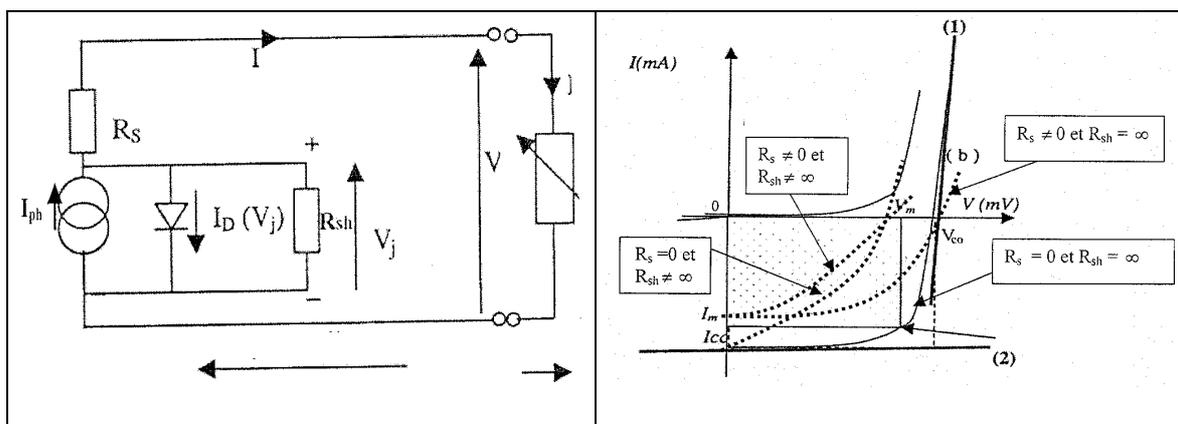


Gambar 2. Skema beberapa aplikasi listrik tenaga surya

B. PRINSIP DASAR SEL SURYA.

Sel surya paling sederhana merupakan sambungan dua semikonduktor tipe P dan N. Dalam sambungan P-N tersebut terbentuk tiga daerah berbeda. Pertama daerah type P, yang mayoritas pembawa muatannya adalah lubang (hole), kedua daerah type N dengan mayoritas pembawa muatan adalah elektron dan ketiga adalah daerah pengosongan (depleksi) yang pada daerah ini terdapat medan listrik internal yang arahnya dari N ke P. Ketika radiasi sinar surya mengenai sel surya tersebut maka akan terbentuk elektron dan hole, sehingga karena pengaruh medan listrik internal tersebut di atas, maka hole akan bergerak menuju ke P (mayoritas pembawa muatan adalah hole) dan elektron akan bergerak ke N (mayoritas pembawanya elektron), sehingga keduanya menghasilkan arusfoto difusi. Sedangkan pada daerah pengosongan dapat pula terjadi pasangan hole dan elektron yang karena pengaruh medan internal yang sama akan bergerak menuju ke arah mayoritasnya, sehingga menghasilkan arus generasi.

Skema ekivalen sebuah sel surya ditunjukkan pada gambar 3.a dan gambar 3.b menggambarkan karakteristik tegangan-arus keadaan gelap dan keadaan penyinaran.



Gambar 3. (a). Skema ekivalen sebuah sel surya .

(b).Karakteristik arus-tegangan sel surya keadaan tanpa dan dengan penyinaran.

Karakteristik arus - tegangan (I - V) sambungan P-N dapat diturunkan sebagai berikut :

Berdasarkan gambar 3.a , maka dapat dituliskan persamaan arus :

$$I = I_{ph} - I_d - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1)$$

Arus diode I_d merupakan jumlahan dari arus mayoritas I_D dan arus generasi-rekombinasi I_R dalam bentuk [2]

$$I_d = I_D + I_R = I_{oD} \left(\exp \frac{qV_a}{k_B T} - 1 \right) + I_{oR} \left(\exp \frac{qV_a}{2k_B T} - 1 \right) \quad (2)$$

V_a adalah tegangan terpasang, k_B konstanta Boltzmann, dan T adalah suhu mutlak dalam kelvin. Dengan demikian persamaan (1) dapat dinyatakan :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{qV + R_s I}{nk_B T} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (3)$$

I_0 adalah arus jenuh diode.

Untuk menyederhanakan perhitungan parameter sel surya ideal, tahanan seri R_s diambil nol dan tahanan paralel R_{sh} adalah tak berhingga, sehingga diperoleh persamaan karakteristik I-V:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nk_B T} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

n menyatakan ketidakidealan diode ($n = 1$ untuk diode ideal).

Untuk rangkaian terbuka ($I = 0$), maka diperoleh V_{oc} yang besarnya dapat dinyatakan sebagai :

$$V_{oc} = n \left(\frac{k_B T}{q} \right) \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \approx n \left(\frac{k_B T}{q} \right) \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (5)$$

Efisiensi konversi η didefinisikan sebagai perbandingan antara daya listrik maksimum dan daya matahari yang datang pada sel surya. Sedangkan dengan faktor bentuk FF (berkaitan dengan keidealan diode) memungkinkan dapat dinyatakan efisiensi

dengan parameter optimal I_{cc} dan V_{co} . I_{cc} adalah arus ketika rangkaian terhubung pendek ($V = 0$) merupakan parameter fotovoltaik yang menggambarkan kapasitas sel surya menangkap foton sehingga menghasilkan pembawa muatan bebas. Sedangkan tegangan rangkaian terbuka V_{co} ($I = 0$) menggambarkan mekanisme rekombinasi dalam sel surya.

Faktor bentuk FF dapat dinyatakan dalam persamaan (6) :[2]

$$FF = FI \left(1 - \frac{V_{co}}{R_{sh} I_{cc}} - \frac{I_{cc} R_s}{V_{co}} - \frac{R_s}{R_{sh}} \right) \quad (6)$$

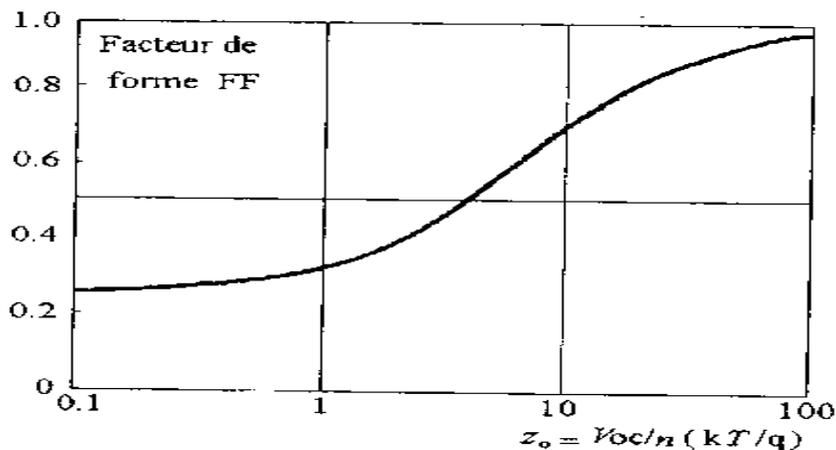
Selanjutnya dapat dinyatakan hubungan antara faktor idealitas diode (FI), V_{co} dan n dalam bentuk:

$$FI = \frac{I_m V_m}{I_{cc} V_{co}} = \frac{V_m \left(I_{cc} - I_0 \left(\exp \frac{qV_m}{nkT} - 1 \right) \right)}{V_{co} I_0 \left(\exp \frac{qV_{co}}{nkT} - 1 \right)} \quad (7)$$

Jika $z_o = qV_{co}/nkT$ dan $z_m = qV_m/nkT$, FI dapat dinyatakan :

$$FI = \frac{z_m}{z_o} \frac{\exp z_o - \exp z_m}{\exp z_o - 1} \quad (8)$$

Pada umumnya para peneliti mengambil keadaan ideal dengan mengambil $R_s = 0$ dan $R_{sh} = \infty$, sehingga $FF = FI$. Bentuk faktor bentuk sebagai fungsi z_o ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4. Faktor bentuk FF sebagai fungsi z_o menurut [3]

Efisiensi untuk setiap sel surya ideal diberikan oleh :

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_{\text{surya}}} = \frac{FF \times V_{\text{CO}} \times I_{\text{CO}}}{P_{\text{surya}}} \quad (9)$$

dimana FF adalah faktor bentuk (fill factor)

Tabel berikut menunjukkan efisiensi sel surya dalam bentuk sub modul dan modul dari berbagai bahan sel surya.[4]

Klasifikasi	Efisiensi (%)	Luas (cm ²)	V _{oc} (Volt)	I _{oc} (A)	FF (%)
Si (kristal)	22.7	778	5.60	3.93	80.3
Si(multikristal)	15.3	1017	14.6	1.36	78.6
CIGSS	12.1	3651	23.42	2.83	67.9
CdTe	10.7	4874	26.21	3.205	62.3
a-Si/a-SiGe/ a-SiGe	10.4	905	4.353	3.2285	66.0

Tabel 1. Efisiensi modul diukur pada spektrum AM 1.5 pada suhu 25°C

Sel surya yang digunakan saat ini sebagian besar terbuat dari silikon. Prosentase penggunaan bahan sel surya dewasa ini adalah 43 % silikon polikristal, 39 % silikon kristal tunggal, 1 % silikon lapisan tipis, 3 % silikon dalam bentuk ribbon sedangkan 14 % bahan selain silikon. Silikon mendominasi bahan sel surya karena karena teknologi fabrikasinya memang sudah mapan. Namun demikian penelitian menggunakan bahan lain terus dilakukan hingga kini dan bahkan pada masa-masa yang akan datang. Beberapa penelitian dalam tingkat sel surya telah dihasilkan misalnya GaAs(kristal) dengan efisiensi mencapai 25 %, Cu(Ga,In)Se memberikan efisiensi 18.8 %[5] dan apabila menggunakan konsentrator mencapai 21,5 %. Bahkan pada tahun 2005 dengan sistem multi sambungan (multijunction) efisiensinya diharapkan dapat mencapai 40 %[6].

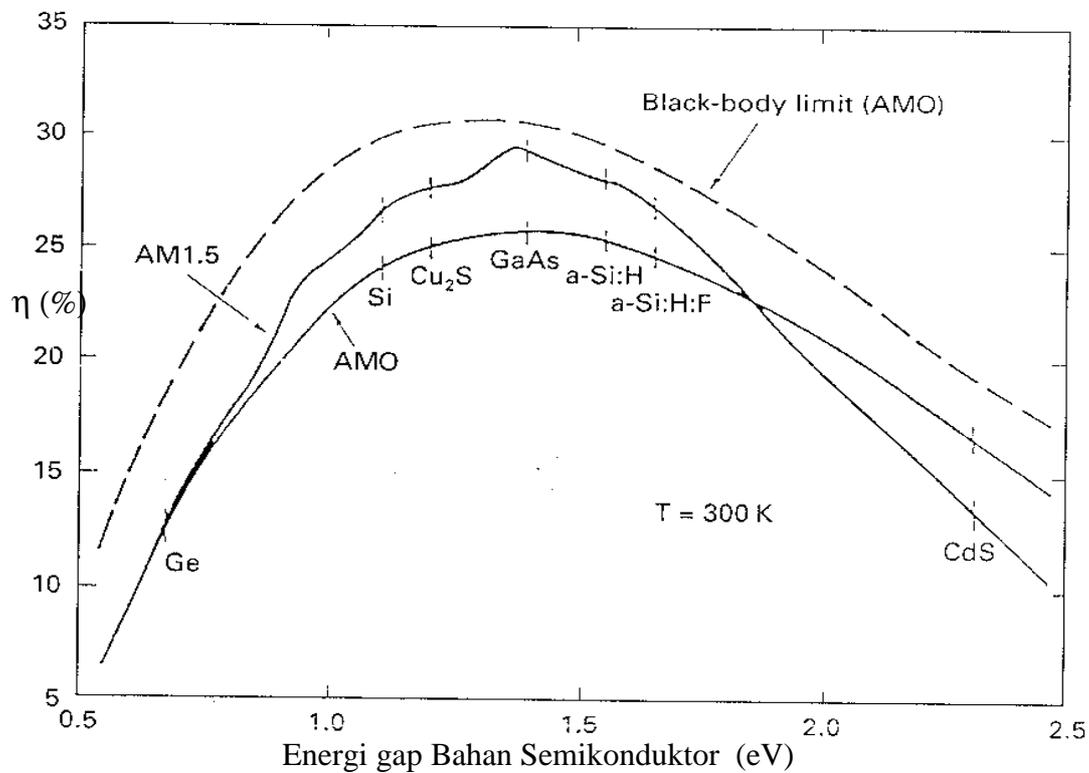
III. POTENSI TENAGA SURYA dan PROSPEK RISET BAHAN SEL SURYA DI INDONESIA.

Indonesia terletak di daerah tropis dan menerima radiasi energi surya harian persatuan luas, persatuan waktu kira-kira 4.8 kilo watt/m². Memang lebih kecil bila dibandingkan dengan Australia tengah , Amerika tengah dan sebagian negara Eropa (lebih dari 6 kilo watt/m²) atau Arab Saudi, Mesir dan beberapa negara di Afrika (5.5 kilo watt/m²). Namun Indonesia menerima radiasi sepanjang tahun dengan waktu siang tahunan lebih panjang terhadap negara-negara sub tropis. Hal ini jelas bahwa bangsa ini dituntut untuk meningkatkan pemanfaatan energi surya sebagai sumber energi terbarukan yang melimpah dan nir polutan.

Peningkatan tersebut di atas dapat dilakukan dalam bentuk pemberian biaya riset di lembaga-lembaga penelitian dan perguruan tinggi, sehingga dapat menghasilkan piranti-piranti bertenaga surya dengan efisiensi yang terus meningkat. Dewasa ini peningkatan pemanfaatan energi surya di Indonesia memang sudah dirasakan misalnya dengan gerakan pemakaian seribu modul surya. Namun modul-modul surya tersebut merupakan barang import dari negara-negara maju yang telah mapan dalam melakukan riset tentang sel surya meskipun mereka miskin tenaga surya. Sebagai negara dengan kekayaan energi surya yang melimpah semestinya perlu terus meningkatkan kesadaran untuk berupaya melakukan riset teknologi konversi tenaga surya, sehingga kelak Indonesia mampu melakukan fabrikasi sel surya dan bahkan juga piranti-piranti bertenaga surya lainnya.

Riset pada bahan sel surya masih sangat terbuka lebar. Dewasa ini negara-negara Eropa (Jerman dan Prancis) dan juga Jepang dan Amerika terus melakukan riset bahan sel surya selain silikon. Bahan sel surya berbasis Cu(In,Ga)(Se,S) terus menerus diteliti oleh

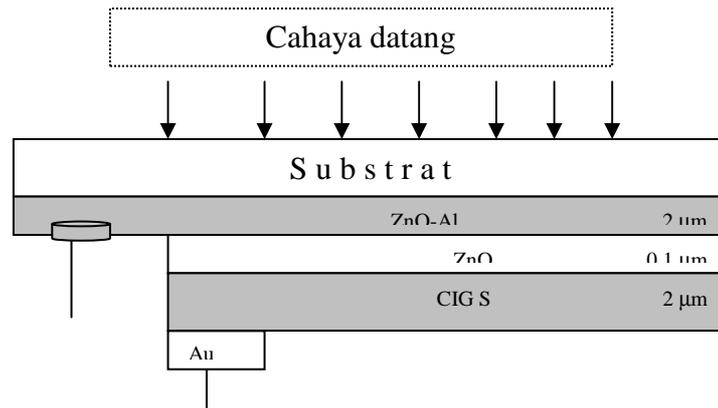
karena bahan tersebut memiliki energi gap yang berkaitan dengan efisiensi sel surya optimal. Efisiensi sebagai fungsi energi gap tampak seperti pada gambar 5.[7]



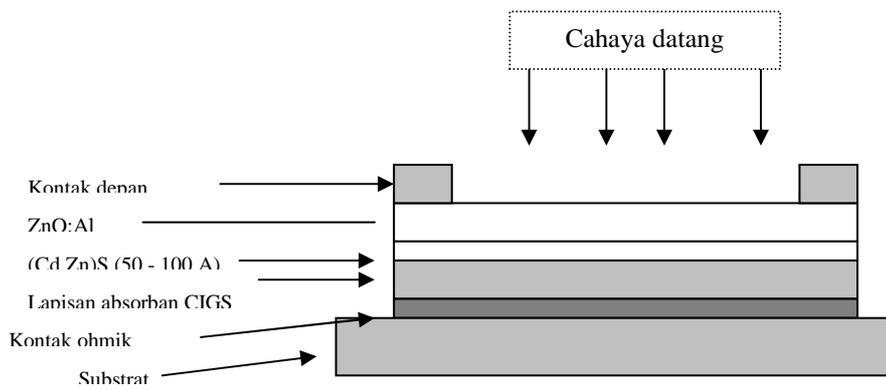
Gambar 5. Efisiensi berbagai bahan sel surya sebagai fungsi dari energi gap.

CuInSe₂ (CIS) memiliki energi gap sekitar 1.01 eV. Bahan tersebut adalah bahan sel surya. Dengan menambahkan galium pada CIS maka energi gap bertambah hingga mencapai energi gap CuGaSe₂ (CGS) sebesar 1.68 eV. Oleh karena itu dapat direalisasikan bahan sel surya Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) dengan energi gap dapat memberikan efisiensi optimal. Energi gap CIGS sebagai fungsi fraksi x atom galium memenuhi persamaan $E_g(x)[\text{eV}] = 1.011 + 0.415x + 0.249x^2$. [8]. Dengan pemikiran yang sama untuk bahan sel surya berbasis CuIn(Se,S)₂ juga terus menarik untuk diteliti dalam upaya menghasilkan bahan sel surya dengan efisiensi konversi terus meningkat.

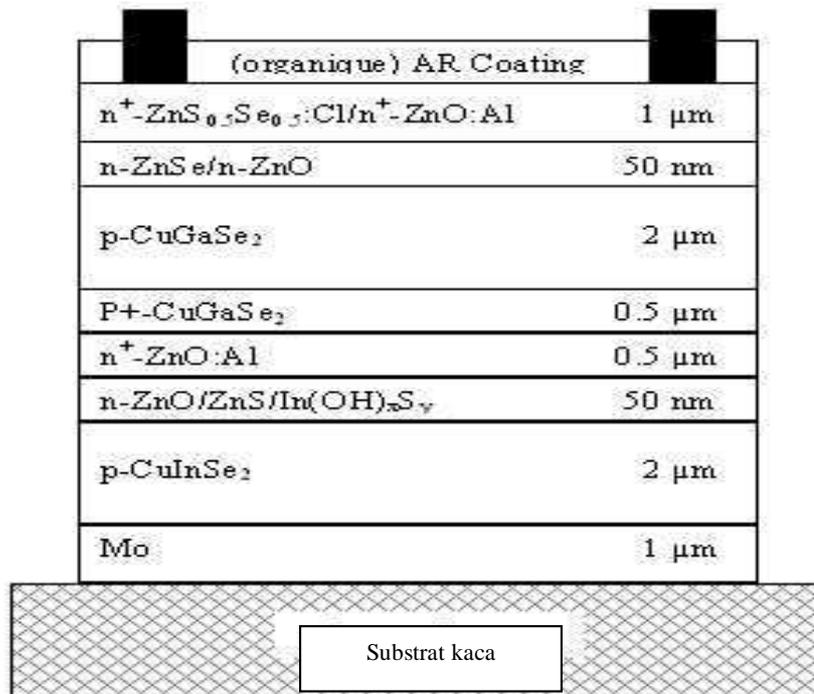
Beberapa contoh sel surya berbasis bahan tersebut di atas dapat ditunjukkan seperti pada gambar 5, 6 dan 7 berikut ini:



Gambar 5. Sel surya berbasis CIGS dalam konfigurasi superstrate [9]



Gambar 6. Sel surya CIGS : MgF₂/ZnO:Al/ZnS:CIGS/Mo/Substrat [10]



Gambar 7. Sel surya tandem basis CIS dan CGS [7]

Beberapa peneliti di Indonesia telah melakukan penelitian sel surya. Departemen Fisika ITB dan Teknik Fisika ITB telah mengembangkan penelitian sel surya dengan teknik *Metalorganic chemical-vapor deposition* (MOCVD) dan *Plasma-assisted chemical-vapor deposition* (PCVD). Para peneliti di BATAN Yogyakarta telah melakukan penelitian sel surya dengan teknik *Sputtering* dan *co-evaporation*. Namun intensitas penelitian tentang bahan sel surya di Indonesia secara umum memang belum memadai sehingga sampai hari ini belum ada hasil rekayasa sel surya yang diproduksi. Metode preparasi lain yang dapat dikembangkan seperti *Evaporasi klasik*, *evaporasi flash*, *Moleculair Beam Epitaxy* (MBE), *Closed Spaced Vapor Transport* (CSVT), Elektrodeposisi dan lain-lain.

Prospek penelitian bahan sel surya ini sangat bagus, karena paling tidak ada empat target yang dapat diteliti. Keempat target penelitian tersebut adalah: Pertama, tentang teknik preparasi bahan. Beberapa teknik yang telah disebutkan di atas dapat dipakai dalam melakukan penelitian sel surya. Kedua, Bahan sel suryan yang akan diteliti. Bahan sel surya sangat bervariasi sesuai dengan energi gap bahan yang bersangkutan. Sebagai contoh bahan sel surya berbasis Cu(In,Ga)(Se,S)_2 , $\text{Cu(In,Ga)}_3(\text{Se,S})_5$, Cd(Se,S,Te) , Zn(O,Se,S) dan lain-lain. Ketiga, karakterisasi bahan meliputi karakterisasi struktur, sifat-sifat bahan terhadap interaksi foton, elektron, ion dan bahkan neutron, serta sifat-sifat listrik bahan. Keempat adalah realisasi sel surya dan aplikasinya.

Sebagai gambaran disampaikan penelitian tentang preparasi bahan sel surya Cu(In,Ga)(Se,S)_2 dengan teknik evaporasi flash. Penelitian ini sudah dapat menghasilkan sejumlah besar artikel/makalah. Oleh karena dalam penelitian ini dapat divariasikan bahan yang diteliti, kemudian parameter preparasi meliputi suhu baik cawan maupun substrat, laju jatuhnya serbuk ke dalam cawan, ukuran diameter serbuk dan jarak antara cawan ke substrat. Setelah dihasilkan sampel kemudian dilakukan karakterisasi masing-masing bahan yang meliputi berbagai karakterisasi seperti yang telah disebutkan di atas.

Selanjutnya realisasi sel surya dan aplikasi pada berbagai bidang seperti pada gambar 2 juga merupakan penelitian yang sangat panjang.

IV. KESIMPULAN

Indonesia menerima energi surya tiap satuan waktu harian rata-rata 4,8 kilo watt/m² dengan selang waktu siang tahunan relatif panjang dibanding negara-negara sub tropis. Penelitian energi surya pantas menjadi prioritas untuk memperoleh sumber energi alternatif nir polutan. Pemanfaatan energi ini dapat dalam bentuk baik konversi termal maupun konversi fotovoltaik.

Sel surya paling sederhana merupakan sambungan dua jenis semikonduktor type P dan N. Sambungan P-N tersebut akan membentuk tiga daerah, daerah type P, type N dan daerah deplesi. Ketika energi surya mengenai sel surya, kemudian dihasilkan arus difusi dan arus generasi sebagai arusfoto. Serapan energi surya sangat dipengaruhi oleh energi gap bahan. Dengan demikian untuk meningkatkan efisiensi konversi sel surya dapat dilakukan dengan memilih bahan dengan energi gap yang tepat atau dengan sistem tandem sehingga mampu menyerap sebagian besar spektrum energi surya. Hal ini jelas memerlukan penelitian yang sangat panjang dan secara terus menerus di laboratorium.

REFERENSI

- [1] Archie W. Culp, Jr, Ph.D, *Prinsip-prinsip Konversi Energi (Terjemahan)* oleh Ir. Darwin Sitompul M.Eng, Penerbit Erlangga , Jakarta (1984)
- [2]. Ricaud, Alain, *Photopoles solaire*, Ed. Presses Polytechniques et Universitaires Romande, Lausanne (1997)
- [3] Marfaing, Y. *Energie Solaire Photovoltaïque*, Ecole d'été UNESCO, Ellipses, Paris (1993)
- [4]. Martin A. Green, Keith Emery, David L. King, Sanekazu Igari and Wilhelm Warta, *Progress In Photovoltaics : Research and Application*, 10: 355-360 (2002)
- [5]. M. Contreras, B. Egaas, K. Ramanathan, *Prog. Photov.* 7 (1999)
- [6]. James E. Rannels, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 65 (2001)
- [7]. Adolf Goetzberger, Christopher Hebling, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 62 (2000)

- [8] D.S. Albin, J.R. Tuttle, G. D. Mooney, J.J. Carapella, A. Duda, A. Mason and R. Noufi, *Proc. 21 th IEEE Photovoltaic Specialists conf.*, Orlando, F.A (1990)
- [9]. M.R. balboul, A. Jasenek, O. Chernykh, U. Rau, H.W. Schock, *Thin Solid Films* 387 (2001)
- [10]. T. Nakada, K. Furumi, A. Kumioka, *IEEE Trans.on Elect. Device*, 46 (10) (1999)