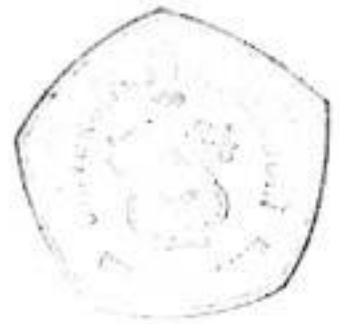
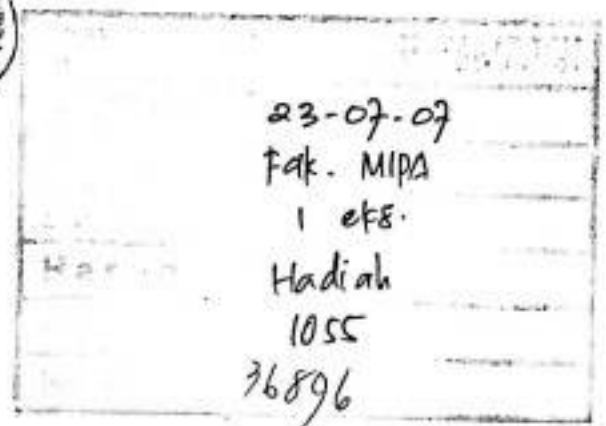


Skripsi Fisika



**SIMULASI EFISIENSI MODEL SEL SURYA TANDEM
BERDASARKAN NILAI
PITA ENERGI TERLARANG (BAND GAP)**

**OLEH
ARNIATI
H211 01 015**



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2006**

LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi dengan judul “ *Simulasi Efisiensi Model Sel Surya Tandem Bersarkan Nilai Pita Energi Terlarang (Band Gap)*” disusun sebagai syarat untuk menyelesaikan studi strata I (S1) pada Jurusan Fisika, Fakultas MIPA Universitas Hasanuddin, dan disahkan oleh:

Pembimbing II

Dahlang T, S.Si., M.Si

Pembimbing I



Dr. Nurlaela Rauf, M.Sc.

Handwritten text in a cursive script, likely a letter or document. The text is centered and appears to be written on a piece of paper with a decorative border.

Handwritten text in a cursive script, likely a letter or document. The text is centered and appears to be written on a piece of paper with a decorative border.

Skripsi Fisika

**SIMULASI EFISIENSI MODEL SEL SURYA TANDEM
BERDASARKAN NILAI
PITA ENERGI TERLARANG (BAND GAP)**

OLEH
ARNIATI
H211 01 015



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2006**

KATA PENGANTAR



Assalamu Alaikum Wr. Wb.

Segala puji dan syukur Alhamdulillah atas segala karunia serta rahmat kesehatan, kekuatan dan anugerah ilmu pengetahuan yang dilimpahkan Allah SWT sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.

Sembah sujud teruntuk Ibundaku tersayang "*Hj. Bau Amang*" yang telah melahirkan dan merawatku dengan kasih yang tulus. Terima kasih yang tak terhingga atas segala doa, perhatian dan kesabarannya mendidik dalam setiap langkah yang kutempuh dalam kehidupan ini.

Ayahku yang kusayangi dan kuhargai "*H. Demmatako*", yang tak kenal lelah berusaha untuk memberiku pendidikan terbaik. Terima kasih yang tak terhingga atas segala doa, nasehat dan perhatian yang membuatku bersemangat untuk meraih cita-citaku.

Tak lupa penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang tulus dan penghargaan setinggi-tingginya kepada:

- ✦ *Ibu Dr. Nurlaela Rauf, M.Sc*, selaku pembimbing utama dan penasehat akademik yang telah sabar mendidik dan memberikan arahan hingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan baik, serta segala nasehat selama penulis menempuh pendidikan

- ✦ *Bapak Dahlang T, S.Si, M.Si*, selaku pembimbing pertama yang telah banyak memberikan saran, pemikiran, serta kesabaran dalam mendidik penulis sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir dengan baik.
- ✦ Ketua dan Sekretaris Jurusan Fisika FMIPA-UH "*Ibu DR. Sri Suryani, DEA* dan *Bapak DR. Syamsir Dewang, M.Eng,Sc*",atas bantuan serta dukungannya kepada mahasiswa.
- ✦ *Bapak Drs. Arifin, MT., Ibu Dra. Bidayatul Armynah, MT., dan Bapak DR. Syamsir Dewang, M.Eng,Sc* selaku dosen penguji, atas segala kritik dan saran untuk perbaikan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
- ✦ *Bapak dan Ibu dosen* atas segala ilmu yang telah diberikan kepada penulis selama menempuh pendidikan .
- ✦ *Staf Jurusan Fisika* atas segala kerjasamanya selama penulis menempuh pendidikan.
- ✦ Seluruh teman-teman seperjuangan 'Fisika 01'. Thanks atas kebersamaan dan kenangan suka dan duka dari awal masuk hingga hari ini. Atas segala semangat, doa dan dukungan yang diberikan kepada penulis. Semoga Allah SWT dapat membalas seluruh kebaikan-kebaikan kita, Amin.
- ✦ Untuk seluruh kanda-kanda senior yang tak bisa disebutkan satu-persatu (thanks atas bantuan dan spiritnya). Untuk Adinda Angk. 02, 03, 04, jangan pernah menyerah.

✦ *To all kru GM dan komunitas ABG*, thanks atas segala pengalaman, canda & tawa, pengertian serta spirit yang diberikan kepada penulis, semoga **GM** makin jaya dimasa datang.

Mudah-mudahan Allah SWT senantiasa memberikan petunjuk dan rahmat-Nya kepada semua pihak yang telah membantu penulis dan menjadi amal ibadah yang bernilai di sisi-Nya.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu penulis dengan segala kerendahan hati menerima kritikan dan saran yang sifatnya membangun.

Akhir kata penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis pada khususnya dan bagi pembaca pada umumnya.

W a s s a l a m

Makassar, Maret 2006

Penulis

ABSTRACT

Have been research to determine a tandem solar cell efficiency who made from amorphous silicon with a simple method. Method is depended on a energy gap value of i-layer in cell-1 and i-layer in cell-2. The photocurrent density is matching in the individual cell forming the tandem structure. Solar cell efficiency determined by the calculation of short-circuit photocurrent density (J_{sc}) and open-circuit voltage (V_{oc}). Current density is depend on charge collection efficiency and optical absorption coefficient with the wavelength are 3000 Å – 6000 Å. The solar cell have a maximum efficiency at energy gap of cell-1 (E_{g1}) is 1,7 eV and energy gap of cell-2 (E_{g2}) is 1,2 eV. While at E_{g1} is bigger than 1,7 eV and E_{g2} is bigger than 1,2 eV, the solar cell efficiency will down to zero.

Key word : Solar cell, efficiency, photocurrent, energy gap

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian untuk menentukan efisiensi sel surya tandem yang terbuat dari silikon amorf menggunakan metode sederhana. Metoda didasarkan pada nilai pita energi terlarang lapisan-i sel 1 dan lapisan-i sel 2 serta ukuran rapat arus foto yang sesuai dalam tiap pembentuk struktur tandem. Efisiensi sel surya ditentukan dengan memperhitungkan rapat arus foto J_{sc} dan tegangan rangkaian terbuka V_{oc} . Rapat arus bergantung pada koleksi muatan dan koefisien absorpsi cahaya dengan panjang gelombang 3000 Å hingga 6000 Å. Efisiensi sel surya mencapai maksimum pada nilai pita energi terlarang sel 1 (E_{g1}) 1,7 eV dan nilai pita energi terlarang sel 2 (E_{g2}) 1,2 eV. Sedangkan pada nilai pita energi terlarang E_{g1} lebih besar dari 1,7 eV dan E_{g2} lebih besar dari 1,2 eV efisiensi sel surya menurun hingga mendekati nol.

Kata kunci : *sel surya, efisiensi, arus foto, pita energi terlarang*

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
ABSTRACK.....	iv
ABSTAK.....	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
I.1 Latar Belakang.....	1
I.2 Ruang Lingkup.....	3
I.3 Tujuan.....	3
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA.....	4
II.1 Semikonduktor.....	4
II.2 Silikon Amorf.....	10
II.3 Sel Surya Silikon Amorf.....	13
II.4 Sel Surya Tandem.....	17
II.5 Karakteristik Sel Surya.....	20
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN.....	24
III.1 Alat.....	24
III.2 Prosedur.....	24

III.3 Bagan Alir Penelitian.....	28
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	30
IV.1 Model Efisiensi Sel Surya Tandem Berdasarkan Nilai Pita Energi Terlarang pada Lapisan I Sel 1 dan Sel 2.....	30
IV.2 Efisiensi Sel Surya Tandem a-Si:H Berdasarkan Nilai Pita Energi Terlarang pada Lapisan-I dengan Voc dan FF yang Bervariasi....	35
IV.3 Perbandingan Efisiensi Sel Surya Single Jnction dengan Sel Surya Tandem.....	37
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	39
V.1 Kesimpulan.....	39
V.2 Saran.....	39
DAFTAR PUSTAKA.....	38
LAMPIRAN.....	L-1

DAFTAR GAMBAR

Gambar		Halaman
II.1a	Kristal semikonduktor pada suhu 0 K.....	5
II.1b	Pada suhu yang agak tinggi elektron keluar dari ikatan kovalen dan terbentuk lubang.....	5
II.2a	Bidang energi kristal pada suhu 0 K.....	5
II.2b	Bidang energi kristal pada suhu yang agak tinggi.....	5
II.3	Mekanisme konduksi lubang.....	6
II.4	Kristal semikonduktor silikon dicampur atom As bervalensi 5.....	7
II.5	Kristal semikonduktor silikon dicampur atom Ga bervalensi 3.....	8
II.6	Struktur kristal silikon.....	11
II.7a	Pita terlarang silikon kristal.....	12
II.7b	Pita terlarang silikon amorf.....	12
II.8	Struktur ikatan silikon amorf dan mobilitas tanpa hidrogen dan terhidrogenasi.....	13
II.9	Proses konversi fotovoltaik dalam sel surya a-Si:H.....	14
II.10	Kebergantungan karakteristik sel pada N_{DB} dalam lapisan I...	16

II.11	Sel surya tandem terdiri dari material-material dengan band gap yang berbeda.....	19
II.12	Efisiensi konversi teoritik dari sel tandem dua lapisan dengan material dan band gap berbeda.....	20
II.13	Sel surya tandem dengan menggabungkan tiga material dengan band gap yang sama.....	20
II.15a	Karakteristik arus tegangan, keadaan gelap.....	21
II.15b	Rangkaian ekivalen bila sel surya diberi beban.....	21
IV.1	Efisiensi sel surya tandem a-Si berdasarkan nilai energi gap..	37
IV.2	Grafik hubungan η dan V_{oc} , η dan FF.....	38
IV.3	Efisiensi sel surya tandem dengan menggabungkan beberapa sel single junction.....	40

DAFTAR TABEL

Tabel		Halaman
IV.1	Panjang gelombang berdasarkan nilai energi gap	34
IV.2	Tabel rapat arus, rapat arus pada keadaan gelap, dan tegangan rangkaian terbuka	36

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran		Halaman
I.	Grafik spektrum cahaya matahari.....	L-1
II.	Grafik rapat pembawa muatan intrinsik.....	L-2
III.	Grafik koefisien difusi.....	L-3
IV.	Grafik fill factor.....	L-4
V.	Data Voc dan FF.....	L-5

*Pancangkanlah dalam imajinasi anda bayangan kesuksesan dan
biarkanlah ia bersemayam di dalam hati anda
(Aidli Bin 'Abdullah Al-Qarni)*

*Usirlah bayangan kegagalan
dan biarkanlah ia berada di luar hatimu*

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar belakang

Masalah energi tampaknya akan tetap menjadi topik yang hangat sepanjang peradaban umat manusia. Upaya mencari sumber energi alternatif sebagai pengganti bahan bakar fosil masih tetap ramai dibicarakan. Ada beberapa energi alam sebagai energi alternatif yang bersih, tidak berpolusi, aman dan dengan persediaan yang tidak terbatas. Di antaranya adalah energi surya, angin, gelombang dan perbedaan suhu air laut. Di masa yang akan datang, dengan adanya kebutuhan energi yang makin besar, penggunaan sumber energi listrik yang beragam tampaknya tidak bisa dihindari. Oleh sebab itu, pengkajian terhadap berbagai sumber energi baru tidak akan pernah menjadi langkah yang sia-sia.

Pemanfaatan energi matahari merupakan salah satu alternatif untuk mengantisipasi kekurangan energi dimasa datang. Untuk memanfaatkan energi matahari tersebut diperlukan suatu piranti yang dapat mengubah energi matahari menjadi energi listrik yaitu sel surya.

Penelitian sel surya terutama bahan silicon amorf dimulai dengan ditemukannya sel surya p-i-n oleh Carlson dan Wronski pada tahun 1976 dengan efisiensi 2 – 3 %⁽¹⁾. Perkembangan di bidang ini cukup pesat memberi dampak pada bidang mikroelektronika yakni telah dihasilkannya berbagai piranti seperti thin film transistor (TFT), thin film light emitting diode (TFLED), aktif matrix flat panel display, switching, dan sebagainya.

Sejak tahun 1976 efisiensi sel surya meningkat rata-rata 1 % pertahun, hingga tahun 1989 mencapai sekitar 14 %^[1]. Peningkatan efisiensi tersebut dihasilkan dari berbagai inovasi, perancangan, bahan dan struktur sel surya, diantaranya adalah sel surya tandem, doping boron pada lapisan intrinsik, penggunaan lapisan jendela yang memiliki celah optik besar dan sebagainya, namun efisiensi sel surya tersebut masih lebih rendah dibandingkan sel surya kristal tunggal dan polikristal.

Sel surya tandem di desain untuk mereduksi kerugian-kerugian yang terjadi pada sel surya "single junction" dalam mekanismenya ada dua kerugian yakni: kerugian foton untuk $hf < E_g$ dan kerugian termal akibat panas photocarrier. Hingga sekarang telah berhasil dibuat sel surya tandem GaAs/GaSb dengan efisiensi diatas 35 %.

Saat ini masih terdapat kesulitan dalam perhitungan efisiensi sel surya sehingga dalam penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat bagi para perancang sel surya untuk menghitung efisiensi, terutama jika mereka ingin praktis dan sederhana. Algoritma yang diusulkan adalah suatu variasi yang klasik pada rangkaian utama yang hanya melibatkan kalkulasi photocurrent dan penyetelan dari parameter sub-cell sampai kondisi penyesuaian tercapai. Kesulitan kalkulasi efisiensi tidak lagi merupakan bagian dari rangkaian. Pada penyesuaian, parameter sub-optimal digunakan dalam kalkulasi efisiensi yang hanya sekali, setelah meninggalkan rangkaian.

1.2 Ruang lingkup

Penelitian ini dibatasi pada simulasi untuk menentukan efisiensi sel surya tandem yang terbuat dari silicon amorf dalam suatu struktur sel yang dihubung seri.

1.3 Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah

1. Menentukan efisiensi model sel surya tandem berdasarkan nilai Band Gap.
2. Menentukan efisiensi maksimum sel surya tandem silikon amorf.

BAB II

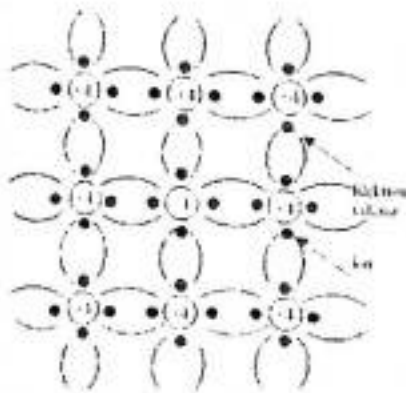
TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Semikonduktor

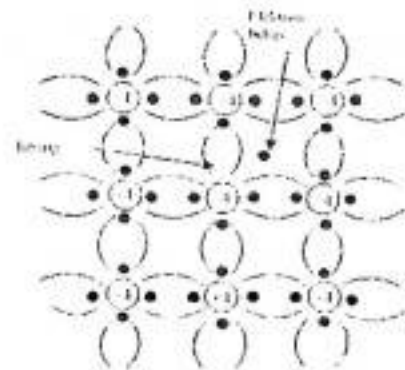
Semikonduktor adalah atom yang berisi empat elektron valensi. Bahan semikonduktor tunggal yang sering digunakan adalah silikon (Si), germanium (Ge), dan karbon (C). Silikon dan germanium digunakan untuk membuat komponen-komponen zat padat sedangkan karbon digunakan untuk membuat resistor dan potensiometer.

II.1.1 Semikonduktor Intrinsik

Atom-atom semikonduktor yang mempunyai empat elektron valensi tersusun sebagai kristal tetrahedral oleh adanya ikatan kovalen dengan atom yang terdekat. Pada suhu 0 K elektron valensi terikat erat dengan ikatan kovalen dan tidak ada elektron yang bergerak bebas (gambar 2.1a). Keadaan ini dilukiskan dalam bidang energi seperti pada (gambar 2.2a) semua elektron valensi mempunyai energi yang terletak pada bidang valensi.

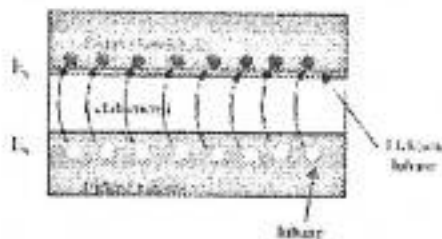


Gambar 2.1a. Kristal semikonduktor Pada suhu 0 K



Gambar 2.1b. Pada suhu yang agak tinggi, elektron keluar dari ikatan kovalen dan terbentuk lubang

Jika suhu kristal dinaikkan sehingga ada elektron valensi yang kenaikan energi termalnya melebihi celah energi E_g , maka elektron-elektron ini akan meloncat ke pita konduksi menjadi elektron bebas (gambar 2.1b dan gambar 2.2b).



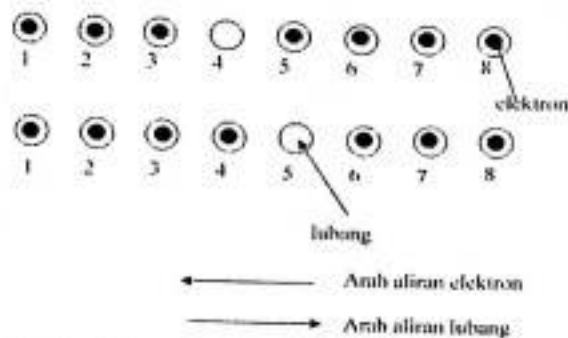
Gambar 2.2a. Bidang energi kristal Pada suhu 0 K



Gambar 2.2b. Pada suhu yang agak tinggi

Kekosongan yang terjadi pada ikatan kovalen karena adanya elektron yang keluar haruslah bermuatan positif, ini disebabkan oleh keadaan kristal yang harus tetap netral. Mekanisme konduksi oleh lubang adalah sebagai berikut: "Jika pada suatu ikatan kovalen terbentuk lubang, maka electron valensi dari atom yang berdekatan akan melepaskan diri dari ikatan kovalen untuk mengisi lubang tersebut.

Elektron ini akan meninggalkan lubang pada tempat yang ditinggalkannya. Maka lubang akan bergerak dengan arah yang berlawanan dengan electron (gambar2.3)".



Gambar 2.3. mekanisme konduksi lubang

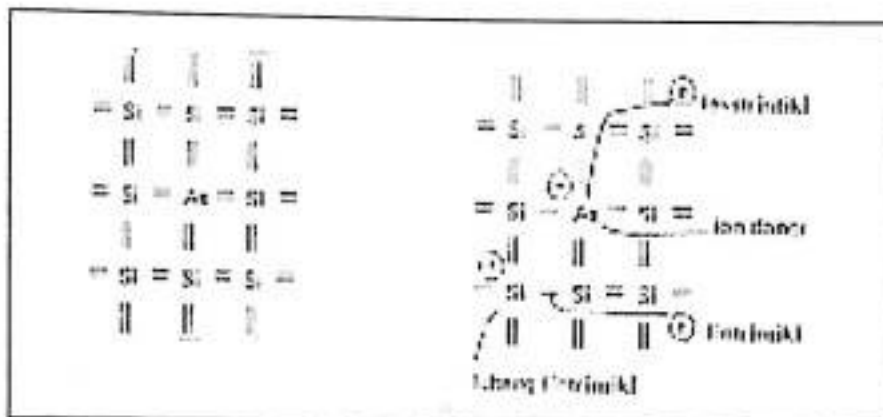
Semikonduktor intrinsik pada suhu 0 K bersifat sebagai isolator dan pada suhu yang lebih tinggi bersifat sebagai konduktor karena terjadi pembentukan pasangan elektron bebas dan lubang yang banyaknya sama dan berlaku sebagai pembawa muatan.^[2]

II.1.2 Semikonduktor Ekstrinsik

II.1.2.1 Semikonduktor tipe-n

Semikonduktor jenis n diperoleh dengan menambahkan atom lain yang bervalensi 5 seperti fosfor (P), Arsen (As), dan Antimon (Sb) ke dalam semikonduktor intrinsik. Atom campuran ini akan menempati lokasi atom intrinsik di dalam kisi kristal atom semikonduktor. Gambar 2.4 menunjukkan kristal semikonduktor intrinsik silikon yang diberi campuran atom As. Karena atom As mempunyai 5 elektron valensi, maka dalam ikatan kovalen dengan silikon terdapat kelebihan satu elektron valensi. Elektron ini terikat amat lemah dan mudah sekali

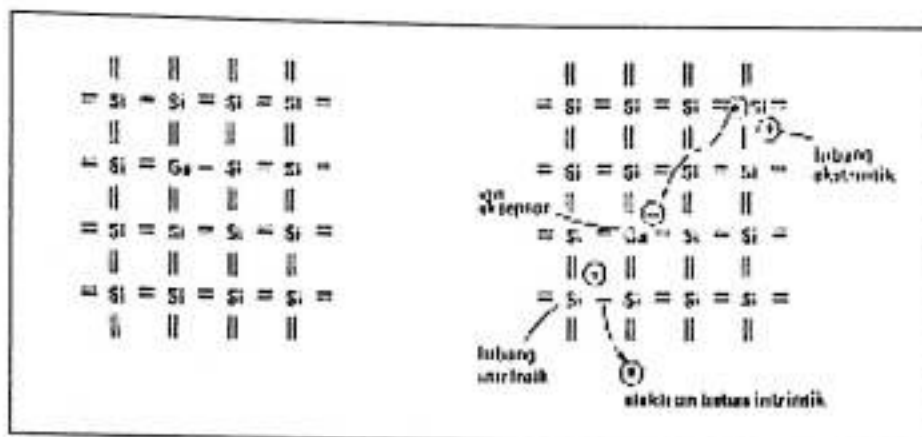
terlepas, dan disebut elektron donor atau elektron ekstrinsik, sedang atom As disebut atom donor. Semikonduktor yang dihasilkan adalah jenis-n karena dengan penambahan atom donor terjadi elektron bebas dimana atom donor setelah membebaskan 1 elektron valensi menjadi ion positif yang terikat ditempat.^[3]



Gambar 2.4. kristal semikonduktor silikon dicampur atom As bervalensi 5

II.1.2.2 Semikonduktor tipe-p

Semikonduktor jenis p diperoleh dengan menambah atom lain bervalensi 3, seperti boron (B), aluminium (Al) dan Galium (Ga) ke dalam semikonduktor intrinsik. Gambar 2.5 menunjukkan kristal semikonduktor intrinsik silikon yang diberi campuran atom Ga. Atom Ga mempunyai 3 elektron valensi, sehingga dalam bergandengan dengan atom silikon di dalam kristal atom Ga memerlukan satu elektron lagi untuk berpasangan dengan atom Si. Oleh sebab itu atom Ga mudah menangkap elektron sehingga disebut atom akseptor. Jika ini terjadi atom akseptor menjadi kelebihan elektron sehingga bermuatan negatif.^[3]



Gambar 2.5. kristal semikonduktor silikon dicampur atom Ga bervalensi 3

II.1.3 Proses Generasi dan Rekombinasi

Pada saat kondisi kesetimbangan termal didistribusikan, terjadi proses untuk kembali kesistem yang setimbang. Untuk kasus kelebihan muatan, mekanisme ini mengembalikan kesetimbangan yaitu rekombinasi pembawa muatan minoritas dengan muatan mayoritas. Berdasarkan proses rekombinasi alami, pelepasan energi yang disebabkan oleh proses rekombinasi dapat diemisikan sebagai foton atau dihamburkan sebagai panas ke molekul. Proses emisi foton disebut rekombinasi radiative, selain itu disebut rekombinasi nonradiativ.^[4]

II.1.3.1 Rekombinasi langsung (Direct Rekombinasi)

Rekombinasi langsung biasa disebut rekombinasi pita ke pita, sebagai contoh adalah Galium Arsenid. Getaran termal secara terus menerus pada kisi atom menyebabkan beberapa ikatan antar atom yang berdekatan akan putus. Ketika ikatan

putus, akan dihasilkan sepasang elektron-lubang. Energi termal memungkinkan elektron pada pita valensi bertransisi ke pita konduksi meninggalkan lubang pada pita valensi. Proses ini disebut generasi pembawa (G_{th}). Jika elektron bertransisi dari pita konduksi ke pita valensi, sepasang elektron-lubang dihilangkan. Proses ini disebut rekombinasi (R_{th}). Pada kondisi kesetimbangan termal, G_{th} harus sama dengan R_{th} , sehingga konsentrasi pembawa muatan konstan.

Pada saat kelebihan muatan dimasukkan ke direct-Band gap semikonduktor, memungkinkan elektron dan lubang berrekombinasi langsung. Hal ini disebabkan bagian bawah pita konduksi dan bagian atas pita valensi dinaikkan dan tidak ada tambahan momentum yang dibutuhkan untuk transisi melintasi band gap. Tingkat rekombinasi langsung R diharapkan sebanding dengan jumlah elektron pada pita konduksi dan jumlah lubang pada pita valensi.^[41]

II.1.3.2 Rekombinasi tak langsung (Indirect rekombinasi)

Untuk semikonduktor indirect-Band gap seperti silikon, rekombinasi langsung merupakan proses yang tidak mungkin. Hal ini disebabkan karena elektron pada bagian bawah pita konduksi memiliki momentum dengan lubang pada bagian atas pita valensi. Transisi langsung yang menghemat energi dan momentum suatu hal yang tidak mungkin tanpa interaksi atom yang bersamaan. Sehingga proses rekombinasi dominan pada semikonduktor merupakan transisi tak langsung melalui energi terlokalisasi pada pita energi terlarang. Kejadian ini seperti loncatan batu antara pita konduksi dan pita valensi. Karena kemungkinan transisi bergantung pada

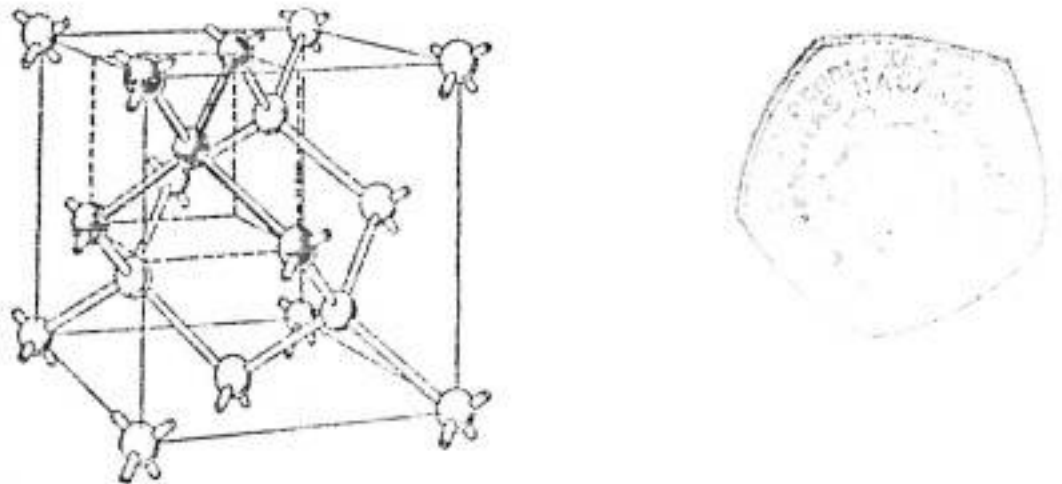
perbedaan energi antara celah dan pita konduksi dan pita valensi, sehingga pada tingkat lanjutan dapat meningkatkan proses rekombinasi.¹⁴¹

11.2 Silikon Amorf

Silikon amorf (a-Si) mulai dikenal secara luas dengan penemuan Carlson'S (1977) pada sel surya dengan konversi efisiensi 5,5%. Secara alami, konversi efisiensi 5,5% tidak dapat diperoleh dalam waktu singkat melainkan memerlukan persiapan terlebih dahulu selama kurang lebih enam atau tujuh tahun. Penemuan Carlson mempunyai dampak yang sangat berpengaruh antara lain sebagai berikut:

1. Suatu tingkat konversi efisiensi yang melebihi 5% telah diperoleh dalam suatu sel surya dengan menggunakan material yang ekonomis, yaitu silikon amorf. Nilai 5% ini sangat berarti bagi peneliti-peneliti sel surya, sebab nilai efisiensi 1-3% dapat diperoleh dengan mudah tetapi dengan menggunakan material yang mahal seperti Se atau Cu₂O. Hal ini membangkitkan minat para ilmuwan untuk menciptakan sel surya dengan efisiensi yang lebih besar dan memungkinkan material Si amorf diterapkan dalam alat lainnya.
2. Munculnya pertanyaan ilmuwan fisika yaitu: mengapa suatu nilai efisiensi lebih dari 5% dapat diperoleh dengan menggunakan Si amorf? Bagaimana cara kerja Si amorf dapat berbeda dengan material amorf lainnya?¹⁵¹

Struktur kristal silikon merupakan tipe kristal intan dimana empat atomnya terletak pada masing-masing tetrahedron teratur dan terikat secara kovalen dengan atom Si yang terletak di pusat seperti pada gambar 2.6.

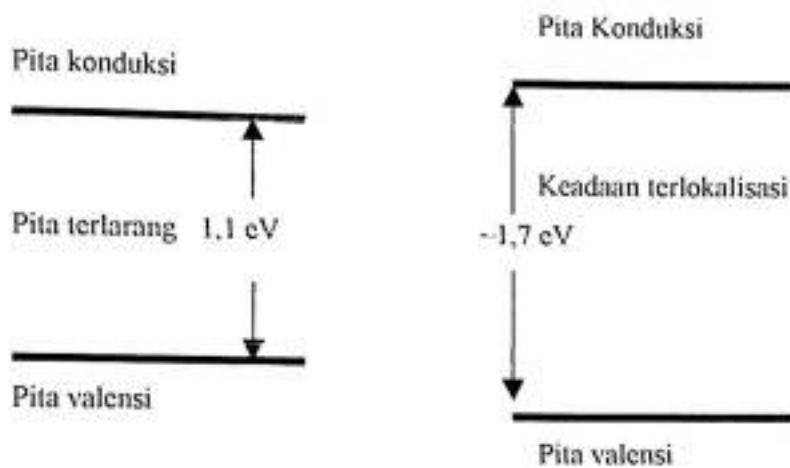


Gambar 2.6. Struktur kristal silikon

Silikon amorf mempunyai jumlah sudut dan panjang ikatan yang sama dengan silikon kristal. Namun perioditasnya tidak dapat dipertahankan, sehingga dikatakan silikon amorf mempunyai keteraturan jangkauan pendek. Teori silikon amorf dikembangkan dari ikatan kimia antar atom yang didasarkan pada interaksi keterikatan jangkauan pendek akibat adanya struktur atom yang tidak teratur.

Ketidak teraturan digambarkan oleh fluktuasi dalam panjang ikatan dan sudut ikatan dengan membentuk “ekor pita” pada distribusi keadaan elektron dan mengakibatkan elektron dan lubang terlokalisasi pada celah pita terlarang. Disamping itu, cacat struktur (defect states) seperti ikatan yang putus akan mengakibatkan

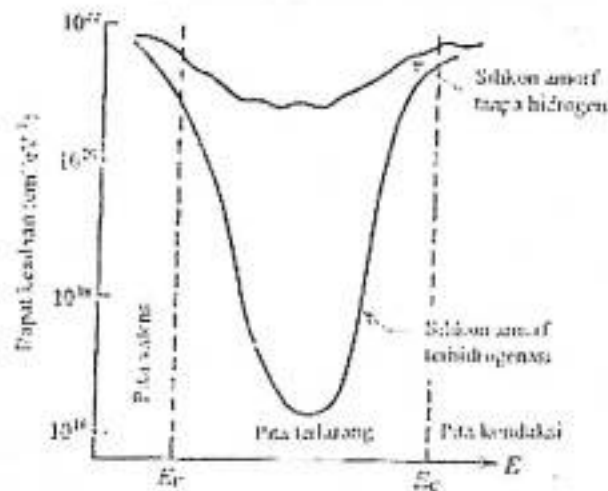
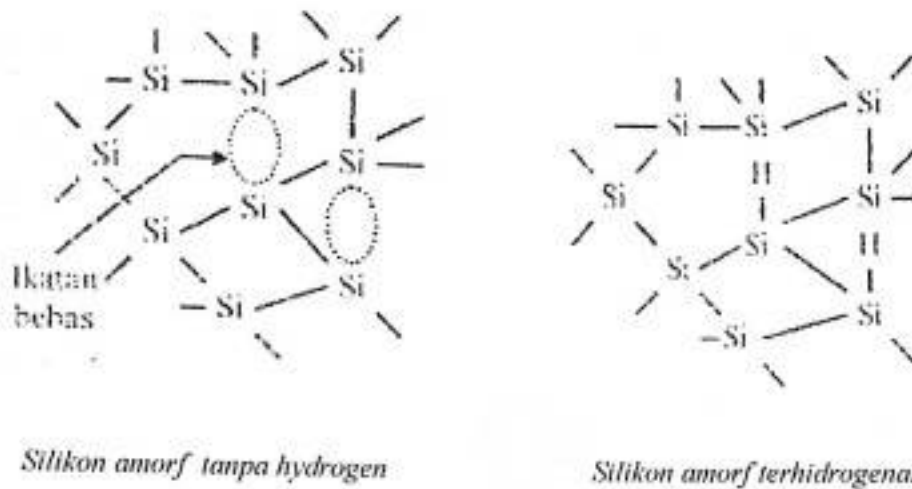
adanya keadaan-keadaan elektronik dalam celah pita terlarang. Tingkatan-tingkatan pada celah pita terlarang disebut keadaan terlokalisasi.



Gambar 2.7a. pita terlarang Silikon kristal

Gambar 2.7b. pita terlarang Silikon amorf

Adanya hydrogen akan mengikat ikatan bebas (dangling bond) sehingga kerapatan keadaan terlokalisasi berkurang dan mobilitas elektron dan lubang meningkat, seperti pada gambar 2.8. Akibatnya silicon amorf terhidrogenasi (a-Si:H). Disamping itu, hydrogen juga mempertahankan keteraturan jangkauan pendek, sehingga saat ini teknik dilusi hidrogen digunakan dalam membuat piranti a-Si:H.^{[5][6]}



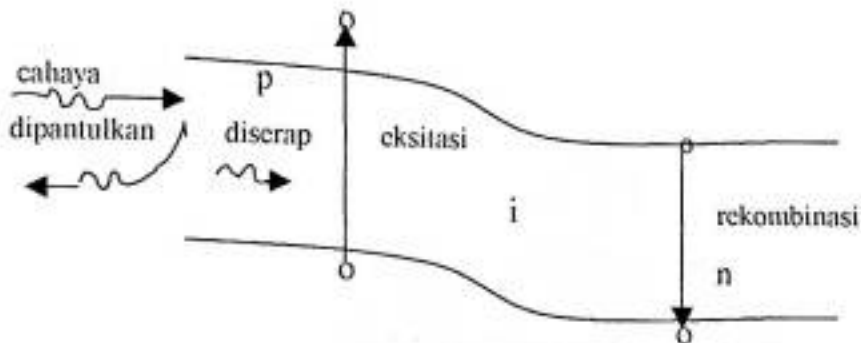
Gambar 2.8. Struktur ikatan silikon amorf dan mobilitas Tanpa hydrogen dan terhidrogenasi

11.3 Sel Surya Silikon Amorf

Energi surya menghasilkan listrik yang dapat besaing dengan sumber energi lainnya, selain itu sel surya hanya memerlukan biaya yang rendah dan proses yang simple dengan output yang cukup tinggi, serta dapat menggunakan material yang

umum dan mudah diperoleh seperti yang banyak dikembangkan akhir-akhir ini yaitu silikon amorf.

Proses konversi energi cahaya matahari ke energi listrik dapat diuraikan sebagai berikut:



Gambar 2.9. Proses konversi fotovoltaik dalam sel surya a-Si:H

Cahaya masuk ke dalam sel surya pada lapisan-p akan membentuk pembawa muatan, terutama dalam lapisan intrinsik (i) seperti gambar 2.9. Cahaya yang datang pada lapisan-p sebagian akan diserap dan sebagian dipantulkan. Energi cahaya yang diserap akan mengeksitasi elektron-elektron dalam lapisan-i ke pita konduksi, kemudian berekombinasi menghasilkan energi listrik.

Sebagai kontak dengan rangkaian luar digunakan logam aluminium dan perak sebagai elektroda. Karena sel surya silikon amorf mempunyai konduktivitas yang rendah dibandingkan dengan sel surya kristal, maka diperlukan elektroda transparan (Transparent Conducting Oxide) untuk menutupi lapisan depan. Struktur lengkap dari sel surya p-i-n adalah Gelas/TCO/p-i-n/Al/Ag. Struktur sel surya p-i-n merupakan struktur sel surya yang banyak dikembangkan saat ini. Sel surya tersebut biasanya dideposisi pada gelas dengan elektroda transparan (TCO).^[6]

II.3.1 Lapisan-p

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam lapisan-p adalah ketebalan dan celah pita terlarang.

a. Konduktivitas

Lapisan-p sebagai jendela (window) harus mempunyai konduktivitas dan transparansi yang tinggi agar mampu melewatkan foton ke dalam lapisan-i dalam jumlah yang besar.

b. Ketebalan

Ketebalan lapisan-p akan mempengaruhi tegangan rangkaian terbuka (open circuit voltage). Ketebalan optimum lapisan-p adalah 200 \AA , bila lebih tipis tegangan rangkaian terbuka berkurang, karena semua lapisan-p akan menjadi lapisan deplesi sehingga tidak terbentuk potensial difusi dan terjadi kontak langsung antara lapisan TCO dengan lapisan-i. Sebaliknya jika terlalu tebal akan terjadi penyerapan cahaya di lapisan-p (penyinaran dari sisi-p) dan meningkatkan tahanan seri.

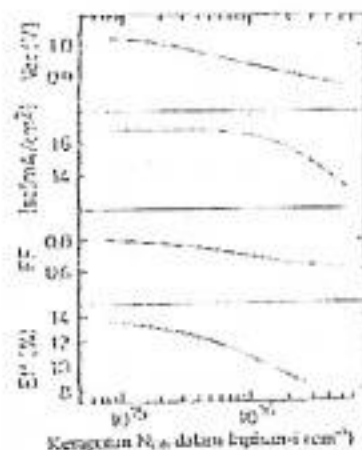
c. Celah pita terlarang

Lapisan-p harus mempunyai celah pita yang besar untuk mengurangi absorpsi cahaya di lapisan-p, terutama panjang gelombang pendek ($<500 \mu\text{m}$). Lapisan-p dengan celah optik besar akan meningkatkan kinerja sel akibat meningkatnya potensial 'built in' yang akan membalikan rekombinasi elektron ke dalam lapisan-i dan akan meningkatkan diskontinuitas pita valensi pada antar muka p/i sehingga memperbesar medan listrik dalam lapisan-i. Berbagai teknik yang

dilakukan untuk membuat lapisan-p dengan celah pita lebar, antara lain $a\text{-Si}_x\text{C}_x\text{H}$ dan $\mu\text{c:Si}$.^{[5][6]}

11.3.2 Lapisan-i

Pada prinsipnya efisiensi sel surya ditentukan oleh rapat keadaan terlokalisasi N_{DB} lapisan-i, sehingga faktor terpenting dalam memperbesar efisiensi adalah meningkatkan kualitas lapisan-i. Kebergantungan karakteristik sel pada N_{DB} lapisan-i diperlihatkan pada gambar 2.6. Ketebalan optimum lapisan-i bergantung pada rapat keadaan terlokalisasi, N_{DB} ini. Lapisan-i yang terlalu tipis akan meningkatkan nilai faktor pengisi (Fill Factor) akibat adanya medan listrik yang tinggi, tetapi arus hubung singkat berkurang karena penyerapan cahaya kecil. Sebaliknya bila terlalu tebal, medan listrik akan berkurang, memperbesar tahanan seri dan mengurangi pembawa yang tereksitasi pada antar muka i/n .^{[5][6]}



Gambar 2.10. Kebergantungan karakteristik sel pada N_{DB} dalam lapisan i

II.3.3 Lapisan-n

Lapisan-n yang digunakan harus mempunyai konduktivitas tinggi untuk mendorong elektron lebih banyak ke rangkaian luar. Dengan demikian arus yang dihasilkan besar. Lapisan-n mikrokristalin ($\mu\text{-Si}$) sangat sesuai untuk tipe-n, karena:

1. Mempunyai konduktivitas tinggi ($1 - 10 \text{ Scm}^{-2}$) dan resistansi kontak dengan lapisan logam rendah.
2. Mempunyai celah pita optik yang lebih besar dari tipe-i, sehingga efektif mencegah fotoeksitasi lubang ke dalam lapisan-n.

Disamping mikrokristalin, $\text{a-Si}_{1-x}\text{N}_x$ juga baik digunakan sebagai lapisan-n karena mempunyai celah pita optik lebar ($E_{\text{opt}}=2,0 \text{ eV}$ untuk $\text{NH}_3/\text{SiH}_4 = 20\%$) dan tidak banyak masalah dalam kualitas film.^{[5][6]}

II.3.4 Lapisan Logam

Kontak dengan rangkaian eksternal merupakan bagian penting dalam kinerja sel surya. Untuk mengalirkan elektron-elektron dalam bentuk arus ke rangkaian luar, maka digunakan lapisan logam. Lapisan logam yang digunakan, biasanya aluminium dan perak sebagai elektroda.^{[5][6]}

II.4 Sel Surya Tandem

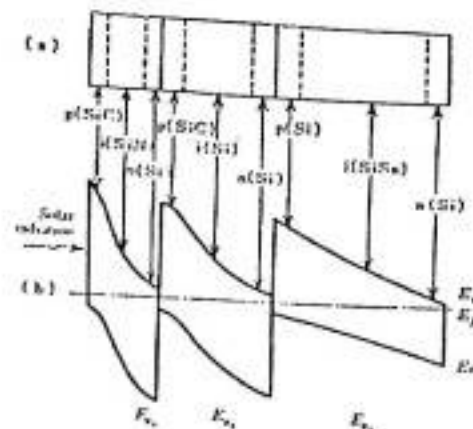
Salah satu metoda untuk meningkatkan efektifitas penggunaan cahaya matahari dalam sel surya maka dapat digabung beberapa sel yang disusun secara seri yang dikenal dengan konfigurasi tandem. Dengan konfigurasi ini diharapkan akan

diperoleh efisiensi konversi yang lebih tinggi dari sel silikon amorf (a-Si). Pemilihan material dapat dilakukan secara bebas tanpa memperhitungkan syarat-syarat lattice matching dari material-material yang digabungkan.

Konfigurasi tandem ini melibatkan pembiayaan yang tinggi karena diperlukan beberapa lapisan yang dibentuk dari material-material yang berbeda. Tandem juga dikenal dengan multi junction.

II.4.1 Gambaran Teoritis Sel Surya Tandem

Ada dua konsep yang berkaitan dengan sel surya tandem. Konsep yang pertama adalah seperti pada gambar 2.11, yaitu menggabungkan beberapa sel surya secara seri yang terbuat dari material dengan bandgap yang berbeda sedemikian sehingga bandgap diurut dari $E_{g1} > E_{g2} > E_{g3}$ dipandang dari sisi datangnya cahaya. Dalam tipe ini, spektrum energi matahari dibagi dalam beberapa bagian dan material-material dipilih yang memiliki bandgap optimum untuk setiap daerah panjang gelombang. Junction p-n (tunnel junction) dari beberapa sel digabungkan secara ohmik. Perlu diperhatikan bahwa sel dengan bandgap masing-masing E_{g1} , E_{g2} , dan E_{g3} harus dirancang sedemikian rupa sehingga arus yang mengalir melalui ketiganya sama disinari oleh radiasi matahari. Jika photocurrent dari sel-sel tersebut berbeda, maka arus yang mengalir melalui keseluruhan susunan akan terhambat, sehingga sel akan memiliki arus yang sangat kecil.

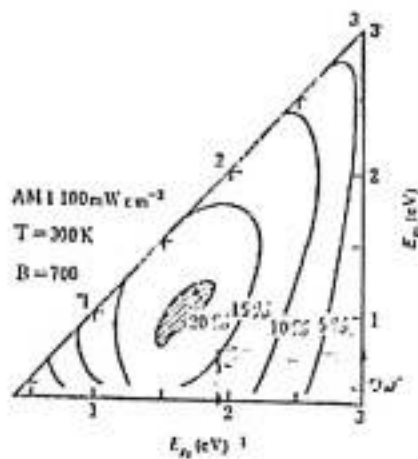


Gambar 2.11. Sel surya tandem terdiri dari material-material dengan band gap yang berbeda

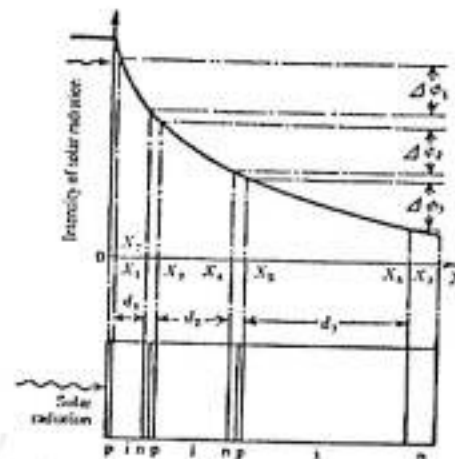
Analisa teoritik menunjukkan bahwa, seperti ditunjukkan dalam gambar 2.12, ada perbedaan-perbedaan yang cukup besar dalam efisiensi konversi dari kombinasi tandem sel dari dua material dengan band gap E_{g1} dan E_{g2} yang berbeda, tergantung pada nilai E_{g1} dan E_{g2} . Dalam kasus ini, efisiensi konversi maksimum (21%) diperoleh jika $E_{g1}=1,75$ eV dan $E_{g2}=1,15$ eV. Hal ini 50% lebih baik dibandingkan dengan efisiensi konversi secara teoretik dari sel tunggal yaitu 12,5 % untuk $E_g=1,7$ eV. Dalam sel tandem yang disusun dengan bandgap $E_{g1}=1,7$ eV dan E_{g3} (dimana E_{g1} dan E_{g3} divariasikan), efisiensi konversi teoretik maksimum 24% diperoleh jika $E_{g1}=2,0$ eV dan $E_{g3}=1,45$ eV.

Konsep kedua berkenaan dengan sel surya tandem adalah untuk memperoleh konversi efisiensi yang lebih tinggi melalui penggunaan secara efektif dari pembawa tereksitasi pada kedalaman yang lebih besar, melalui gabungan sel individu (yang mungkin dari material yang sama) secara seri. Seperti diperlihatkan pada gambar 2.13, dalam konstruksi ini perlu untuk mengoptimalkan ketebalan-ketebalan

(d_1, d_2, \dots) dari berbagai lapisan untuk menjamin bahwa arus dari masing-masing sel adalah konstan.^[6]



Gambar 2.12. efisiensi konversi teoritik dari sel tandem dua lapisan dengan material dan band gap berbeda



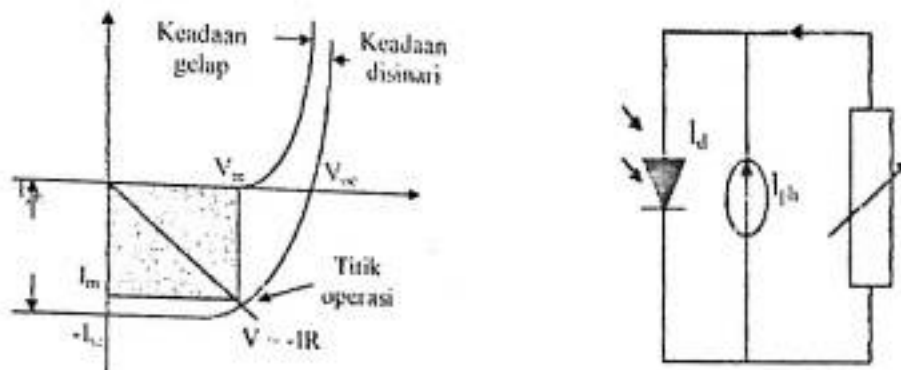
Gambar 2.13. sel surya tandem dengan menggabungkan tiga material dengan band gap yang sama

Dalam penelitian ini digunakan konsep yang pertama karena model sel surya tandem yang akan disimulasikan merupakan model sel surya tandem silikon amorf dengan dengan nilai band gap yang berbeda pada lapisan i sel 1 dan lapisan i sel 2.

II.5 Karakteristik Sel Surya

Karakteristik keluaran sel surya ditentukan oleh tiga parameter penting, yaitu: tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}), arus hubung singkat (I_{sc}), dan factor pengisi (FF).

Bila sel surya disinari, maka akan terbentuk pasangan elektron lubang dalam sel. Elektron mengalir dari lapisan-p ke lapisan-n dan akan membangkitkan arus ke tahanan beban.



Gambar 2.15. (a) Karakteristik arus tegangan, keadaan gelap dan tersinari, (b) Rangkaian ekuivalen bila Sel surya diberi beban.

Karakteristik sel surya dalam keadaan gelap dan terang ditunjukkan pada gambar 2.15. Persamaan untuk arus gelap (I_d) adalah sama untuk arus dalam suatu dioda sambungan p-n yaitu:^[6]

$$I_d = I_0 \left\{ \exp\left(\frac{qV}{nkT} - 1\right) \right\} \quad (II.1)$$

dengan, I_0 = arus jenuh balik dioda (Ampere), q = muatan elektron ($1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb), V = tegangan (volt), n = Faktor dioda ($1 \leq n \leq 2$) dan k = konstanta Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K).

Bila sel disinari, arus yang dibangkitkan oleh energi foton (photocurrent, I_{ph}) akan mengalir. Nilai I_{ph} ini berbanding lurus dengan intensitas penyinaran, yang dinyatakan sebagai berikut:^[6]

$$I = -I_{ph} + I_0 \left\{ \exp \left(\frac{qV}{nkT} - 1 \right) \right\} \quad (II.2)$$

Jika rangkaian dihubung singkat, maka diperoleh arus hubung singkat I_{sc} yang merupakan perkalian antara fluks foton spectrum matahari $S(\lambda)$ dan efisiensi koleksi sel surya $Q(\lambda)$ adalah^[6]

$$I_{sc} = A \int_0^{\lambda} S(\lambda)Q(\lambda)d\lambda \quad (II.3)$$

dengan A luas sel yang disinari.

Tegangan rangkaian terbuka V_{oc} diperoleh dengan mengukur tegangan rangkaian pada keadaan terbuka ($I = 0$), yang didefinisikan sebagai^[6]

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \left\{ \frac{I_{ph} V_{oc}}{I_0} + 1 \right\} \quad (II.4)$$

Efisiensi sel surya berikan oleh persamaan^[6]

$$\eta = \frac{P_{maks}}{P_{in}} \times 100\% \quad (II.5)$$

P_{in} adalah daya energi cahaya yang mengenai permukaan sel surya. Nilai daya maksimum diperoleh dari perkalian antara tegangan rangkaian terbuka, arus hubung-singkat dan faktor pengisi, yaitu^[6]

$$P_{maks} = I_{sc} \times V_{oc} \times FF \quad (II.6)$$

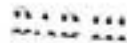
Faktor pengisi dinyatakan oleh (16)

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (11.7)$$

dengan V_m dan I_m berturut-turut adalah tegangan keluaran dan arus keluaran pada titik operasi maksimum (daya maksimum).

Daya masukan P_i merupakan perkalian antara intensitas penyinaran (ΦA) ($100mWcm^{-2}$) dan luas sel yang disinari, sehingga efisiensi sel surya dapat dituliskan^[9]

$$\eta = \frac{V_m I_m}{\Phi A} \times 100 \% \quad (11.8)$$



METODOLOGI PENELITIAN

III.1 Alat

Adapun alat yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah

- a. Satu unit komputer
- b. Pemrograman MatLab 6.5

III.2 Prosedur penelitian

1. Asumsi dasar

Untuk mempelajari struktur sel surya tandem a-Si didasarkan pada asumsi berikut.

- a. I-V karakteristik dari tiap sel dipergunakan dengan area permukaan yang umum dikenal sebagaimana diada di paralel dengan suatu sumber arus yang menghadirkan pembangkit cahaya (hubung singkat) kerapatan arus.
- b. Dioda diperagakan menggunakan "closed-form" ungkapan konvensional berdasar pada proses pengaliran arus kuat pada simpangan diperartikanakan (penggabungan-ulang diada di).
- c. Pada kalkulasi arus hubungan singkat, keseluruhan a-Si film diasumsikan untuk menjadi daerah penghalang di mana penggabungan-ulang dilalaikan dan pembawa pembangkit cahaya dengan cepat menjalar dengan pembangkitan pada medan elektrik.

d. Kerugian optik tidak dipertimbangkan dalam kalkulasi photocurrent.

2. Menentukan persamaan untuk menghitung efisiensi sel surya

Adapun persamaan yang digunakan dalam menentukan efisiensi sel surya adalah sebagai berikut:^[7]

a. Kerapatan arus photo pada setiap sel ($i = 1, 2, \dots, N$) yang dapat dituliskan sebagai:^[7]

$$J_{sci} = q \cdot N_{ph}(\lambda) \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \alpha_i(\lambda) [1 - \alpha_i(\lambda)] \quad (III.1)$$

Di mana $N_{ph}(\lambda)$ merupakan fungsi distribusi spektral photon yang diperoleh dari data spektrum matahari dan $\alpha(\lambda)$ adalah koefisien penyerapan optis dari material amorf yang diperoleh dengan persamaan:^[7]

$$\alpha_i(\lambda) = \frac{7.516 \times 105\lambda}{1.242} \left(\frac{1.242}{\lambda} - \frac{1.242}{\lambda_{gi}} \right) \quad (III.2)$$

Dimana $\alpha_i(\lambda)$ dinyatakan dalam cm^{-1} , dan λ_{gi} merupakan panjang gelombang dari sub-cell material, seperti ditentukan dari sela pita nya, dalam μm .

b. Kerapatan arus pada keadaan gelap dari sub-cell I struktur sel surya tandem diasumsikan untuk meningkatkan exponensial dengan terminal tegangan sel pada suatu tingkat yang ditentukan oleh faktor keidealannya simpangan n , menurut standard dari^[7]

$$J_d = J_o[(\exp V/nV_T) - 1] \quad (III.3)$$

dimana kerapatan arus jenuh pada keadaan gelap diasumsikan untuk menjadi rekombinasi arus sederhana yang diperoleh dari^[7]

$$J_0 = \frac{q n_i L}{2\tau} \quad (III.4)$$

- c. Tegangan rangkaian terbuka untuk masing-masing sub sel dalam sel tandem diperoleh dari^[7]

$$V_{oc} = n V_T \ln \left\{ \frac{J_{sc}}{J_0} + 1 \right\} \quad (III.5)$$

- d. Fill-Factor (FF) dari tiap sub sel kemudian bisa ditentukan dengan cara standar, dan dari konversi sub sel efisiensi akan diperoleh dari^[7]

$$\eta\% = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{P_i} \times 100 \% \quad (III.6)$$

Di mana P_i menjadi konstan yang ditentukan dari peristiwa spectrum matahari.

3. *Penyiapan program untuk simulasi efisiensi sel surya tandem*

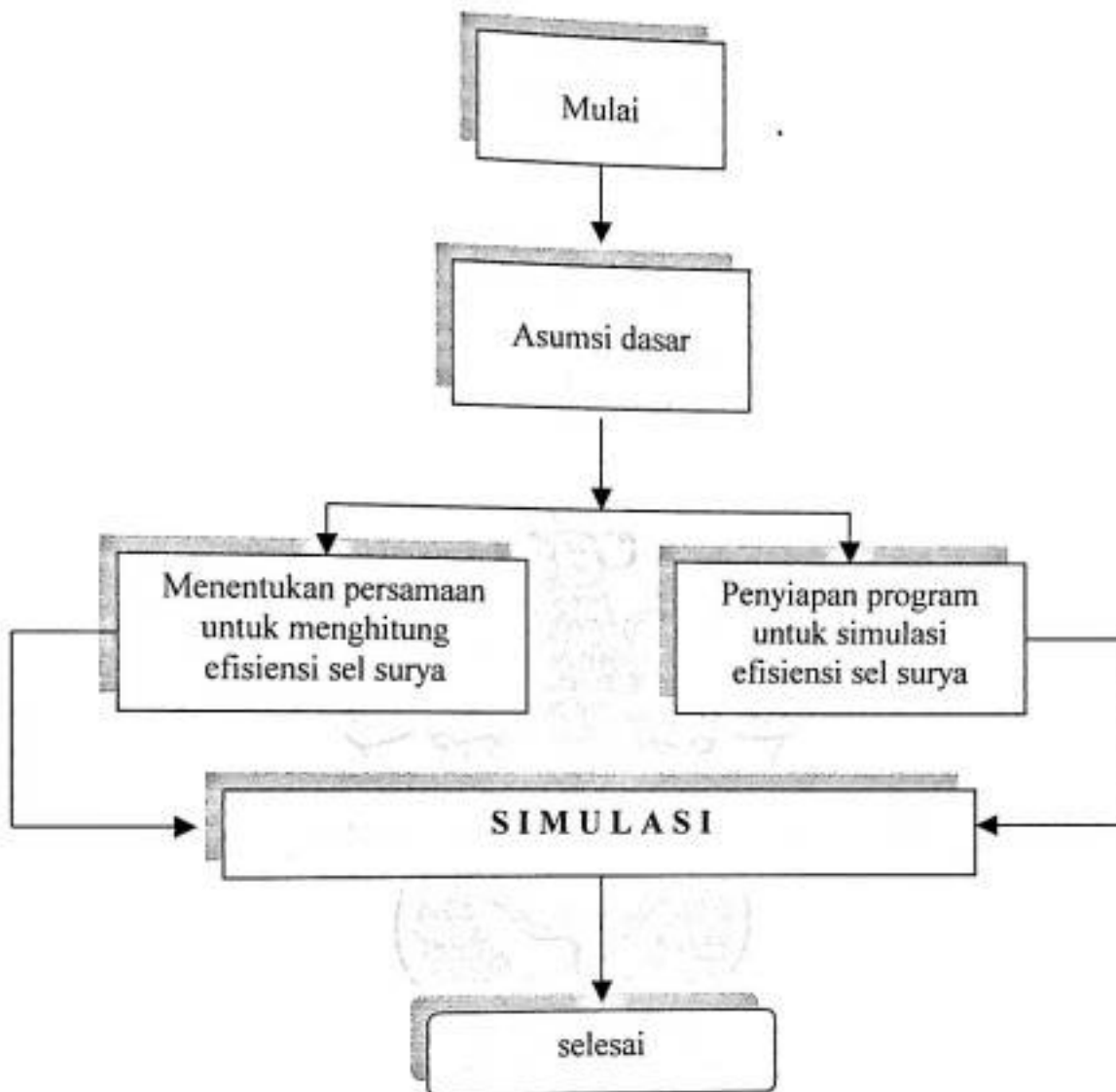
Program komputer yang digunakan dalam pemodelan efisiensi sel surya ini adalah program MatLab

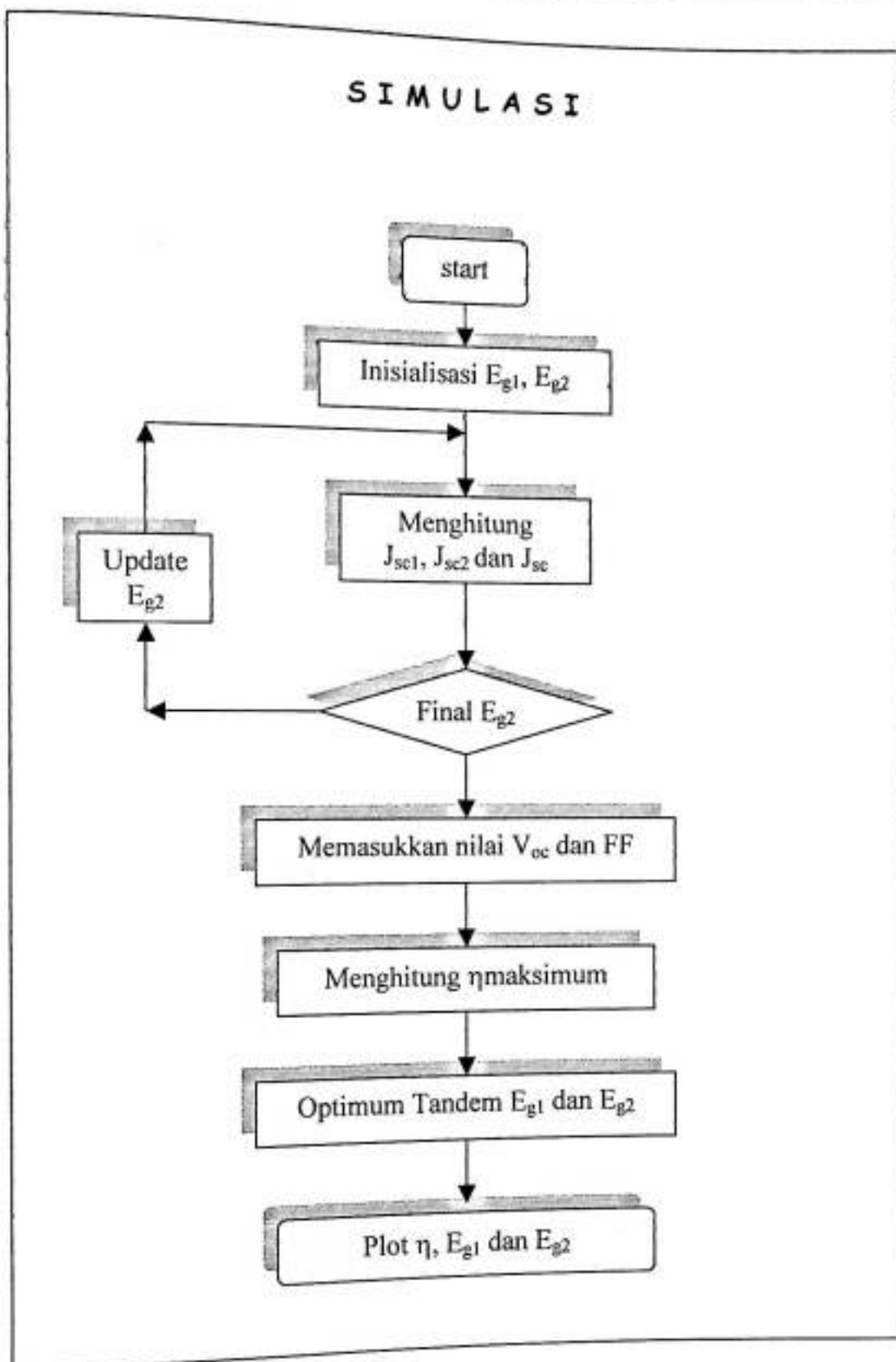
Pemrograman dilakukan dengan menerapkan persamaan untuk menghitung efisiensi sel surya dalam bentuk instruksi-instruksi pada program MatLab dengan sistematika sebagai berikut:

- a. Menentukan energi gap (E_{g1} , E_{g2}) material yang digunakan dalam sel surya
- b. Menghitung J_{sc1} , J_{sc2}

- c. Menentukan V_{oc} dan FF
- d. Menghitung efisiensi sel surya
- e. Memplot E_{g1} , E_{g2} dan η .
- f. Visualisasi efisiensi sel surya
- g. Menentukan efisiensi maksimum (η_{maks})

III.3 Bagan Alir Penelitian





BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

IV.1 Simulasi efisiensi model surya tandem berdasarkan nilai pita energi terlarang pada lapisan-i sel 1 dan sel 2

1. Asumsi dasar

Untuk menentukan efisiensi sel surya tandem silikon amorf didasarkan pada asumsi sebagai berikut:

- a. Bila sel disinari, arus yang dibangkitkan oleh energi foton akan mengalir. Pada keadaan ini jika rangkaian dihubung singkat, maka akan diperoleh arus hubung singkat yang bergantung pada efisiensi koleksi muatan dari spektrum matahari. Rapat arus diperoleh melalui perkalian antara nilai muatan elektron ($q = 1.6 \times 10^{-19}$ C), jumlah koleksi muatan foton $N_{ph}(\lambda)$ dan koefisien absorpsi cahaya $\alpha(\lambda)$.
- b. Sel surya tandem terdiri dari beberapa sub-sel sehingga perhitungan rapat arus hubung singkat didasarkan pada perhitungan rapat arus hubung singkat tiap sub-sel.
- c. Pada junction yang menghubungkan sel-1 dan sel-2, dimana lapisan-n pada sel-1 dan lapisan-p sel-2 berimpit akan menyebabkan elektron bebas pada lapisan-n berdifusi ke lapisan-p yang mengandung ion (+). Difusi elektron pada lapisan-n akan terus berlanjut hingga mencapai keadaan setimbang

yang menyebabkan terjadinya lapisan kosong pada junction lapisan-n dan lapisan-p. Sehingga tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) diperoleh berdasarkan difusi elektron pada junction antara sel 1 dan sel 2.

2. Simulasi efisiensi sel surya tandem

Dalam simulasi ini menampilkan sel surya tandem silikon amorf dengan memperhitungkan rapat arus berdasarkan nilai energi gap pada lapisan i sel pertama dan lapisan i sel kedua. Efisiensi sel surya tandem yang diperoleh dengan menggunakan pemrograman MatLab Sebagaimana terlihat pada lampiran 1.

Dengan memperhatikan program pada lampiran 1, program dimulai dengan menentukan energi gap pada tiap lapisan sel surya. Pada lapisan i sel 1 dan lapisan i sel 2 menggunakan silikon amorf sehingga energi gap yang digunakan adalah 1.1 eV sampai 2.0 eV.

Pada lapisan i sel pertama digunakan energi gap (E_{g1}) 1.6 eV sampai 2.0 eV lebih besar dibandingkan energi gap pada lapisan kedua (E_{g2}) yaitu 1.1 eV hingga 1.5 eV, karena pada lapisan pertama diharapkan dapat menyerap foton lebih banyak. Lapisan pertama merupakan lapisan atas/denan yang menyerap dan mengkonversi bagian dari spektrum matahari dengan energi yang tinggi dan mentransmisikan foton-foton yang berenergi lebih rendah ke bagian bawah/belakang sel

Setelah menentukan energi gap, dilanjutkan dengan menghitung rapat arus hubung singkat tiap sel. Rapat arus hubung singkat diperoleh melalui perkalian antara

nilai muatan elektron ($q = 1.6 \times 10^{-19}$ C), jumlah koleksi muatan foton $N_{ph}(\lambda)$ dan koefisien absorpsi cahaya $\alpha(\lambda)$.

Koefisien absorpsi cahaya (α_i) bergantung pada panjang gelombang (λ) dan panjang gelombang yang memiliki energi yang cukup untuk meloncatkan elektron dari pita valensi ke pita konduksi (λ_{gi}). Ini diperoleh melalui persamaan $\lambda_{gi} = h c / E_g$, dengan E_g adalah energi gap, h konstanta Planck dan λ_{gi} adalah panjang gelombang, sehingga diperoleh λ_{gi} berdasarkan energi gap seperti diperlihatkan pada tabel berikut:

Tabel IV.1 Panjang gelombang berdasarkan nilai energi gap

Energi gap (eV)	λ_{gi} (μm)
1.10	1.13
1.15	1.08
1.20	1.04
1.25	9.94×10^{-1}
1.30	9.55×10^{-1}
1.35	9.20×10^{-1}
1.40	8.87×10^{-1}
1.45	8.57×10^{-1}
1.50	8.28×10^{-1}
1.55	8.01×10^{-1}
1.60	7.76×10^{-1}
1.65	7.53×10^{-1}
1.70	7.31×10^{-1}
1.75	7.10×10^{-1}
1.80	6.90×10^{-1}
1.85	6.71×10^{-1}
1.90	6.54×10^{-1}
1.95	6.37×10^{-1}
2.00	6.21×10^{-1}

Jumlah koleksi muatan foton N_{ph} diperoleh dari data spektrum matahari (Lampiran 2) dengan panjang gelombang yang digunakan antara $3000 \text{ \AA} - 8000 \text{ \AA}$. Panjang gelombang ini digunakan karena pada panjang gelombang $3000 \text{ \AA} - 6000 \text{ \AA}$ koleksi muatan dari matahari mencapai $80\% - 90\%$ dan pada panjang gelombang yang lebih besar dari 6000 \AA koleksi muatan dari spektrum matahari menurun hingga mendekati nol.

Tegangan rangkaian terbuka diperoleh melalui persamaan III.5 dengan n adalah faktor dioda ($1 \leq n \leq 2$)^[5]. $V_T = kT/q$,^[5] dengan $k =$ konstanta Boltzman ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/molekul.K}$), dan q adalah muatan elektron.^[5]

Kerapatan arus jenuh pada keadaan gelap diperoleh melalui persamaan III.4. Rapat pembawa muatan intrinsik (n_i) yang digunakan adalah rapat pembawa muatan intrinsik Si pada suhu 300 K yaitu $1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ (Lampiran 3). τ adalah waktu yang dibutuhkan oleh elektron untuk berdifusi dari sel yang satu ke sel berikutnya yang diperoleh melalui persamaan $\tau = L^2/D$ dengan L adalah panjang sel surya, D adalah koefisien difusi. Koefisien difusi yang digunakan adalah $1 \text{ cm}^2/\text{s}$ hingga $50 \text{ cm}^2/\text{s}$ (Lampiran 4).

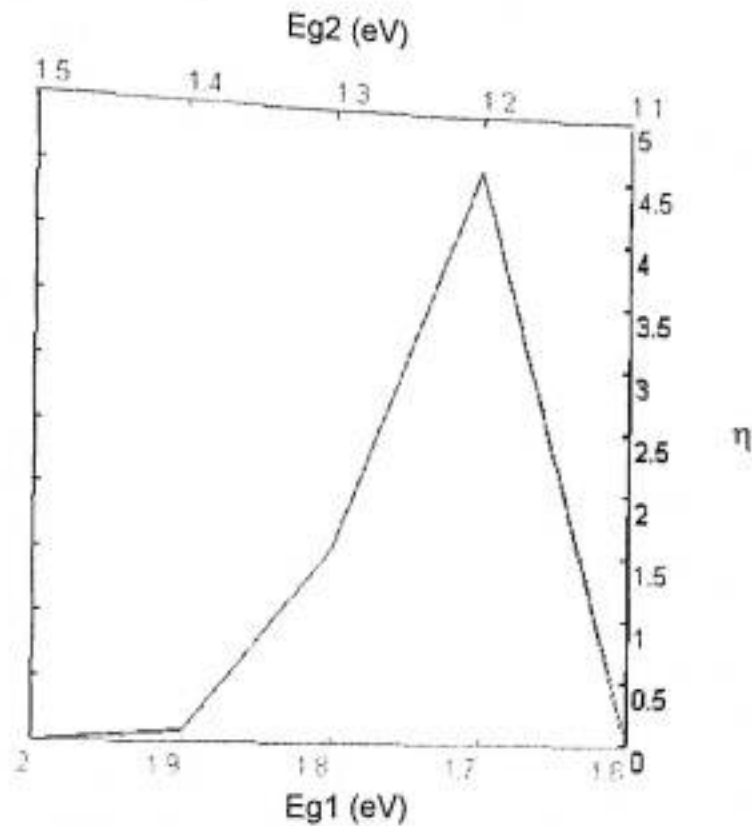
Untuk menunjukkan hasil perhitungan rapat arus, rapat arus pada keadaan gelap dan tegangan rangkaian terbuka dapat dilakukan dengan mengkompiling program sehingga diperoleh hasil seperti di tunjukkan pada tabel IV.2.

Tabel IV.2 Tabel rapat arus, rapat arus pada keadaan gelap dan tegangan rangkaian terbuka

$J_{sc} (10^{-7} \text{ mA.cm}^{-2})$	$J_0 (10^{-19} \text{ mA.cm}^{-2})$	$V_{oc} (V)$
0	0.725	0
0.2671	0.29	0.8554
0.0658	0.145	0.9723
0.0228	0.0725	0.1301
0.0023	0.029	0.0373

Efisiensi sel surya diperoleh melalui persamaan III.6 dengan FF adalah fill faktor. Nilai fill faktor bergantung pada ketebalan lapisan i, jika lapisan i terlalu tipis akan meningkatkan nilai FF akibat medan listrik yang tinggi, tetapi arus hubung singkat berkurang karena penyerapan foton kecil. Jika terlalu tebal, medan listrik akan berkurang dan mengurangi difusi pembawa muatan antara lapisan i dan n. Nilai FF yang digunakan adalah 0,4 sampai 0,8 karena pada daerah ini difusi pembawa muatan antara lapisan i dan n menjadi maksimum (Lampiran 5). P_i adalah daya masukan yang merupakan perkalian antara intensitas penyinaran Φ (100 mW.cm^{-2}) dan luas sel yang disinari.^[2]

Dengan menggunakan program pada lampiran 1 diperoleh visualisasi efisiensi sel surya sebagai berikut:

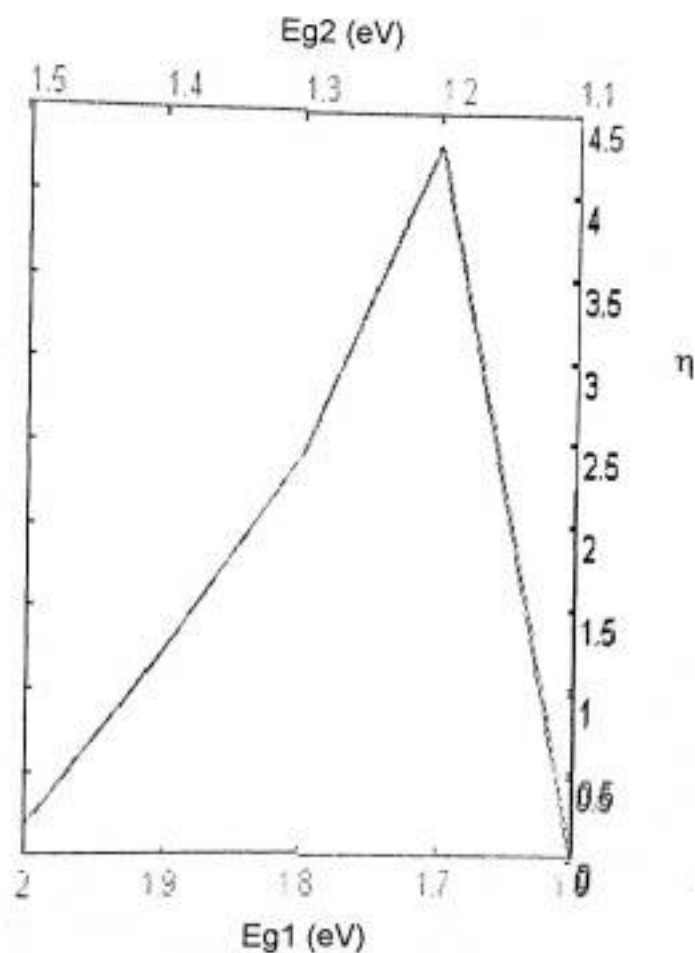


Gambar IV.1 Simulasi Efisiensi model sel surya tandem a-Si berdasarkan nilai energi gap

Berdasarkan gambar di atas, efisiensi sel surya meningkat pada nilai energi gap lapisan i sel 1 (E_{g1}) antara 1,6 eV sampai 1,7 eV dan nilai energi gap pada lapisan i sel 2 (E_{g2}) antara 1,1 eV sampai 1,2 eV. Hal ini terjadi karena pada energi gap ini banyak foton yang dapat bertransisi dari pita valensi ke pita konduksi. Sedangkan pada E_{g1} yang lebih besar dari 1,7 eV dan E_{g2} lebih besar dari 1,2 eV terjadi penurunan efisiensi karena pada energi gap ini banyak foton tidak memiliki energi yang cukup untuk bertransisi dari pita valensi ke pita konduksi.

IV.2 Efisiensi Sel Surya Tandem a-Si:H Berdasarkan Nilai Pita Energi Terlarang pada Lapisan-i dengan Voc dan FF yang bervariasi

Data yang digunakan merupakan data dengan Voc dan FF yang bervariasi (Lampiran 6), sehingga menghasilkan visualisasi efisiensi sebagai berikut

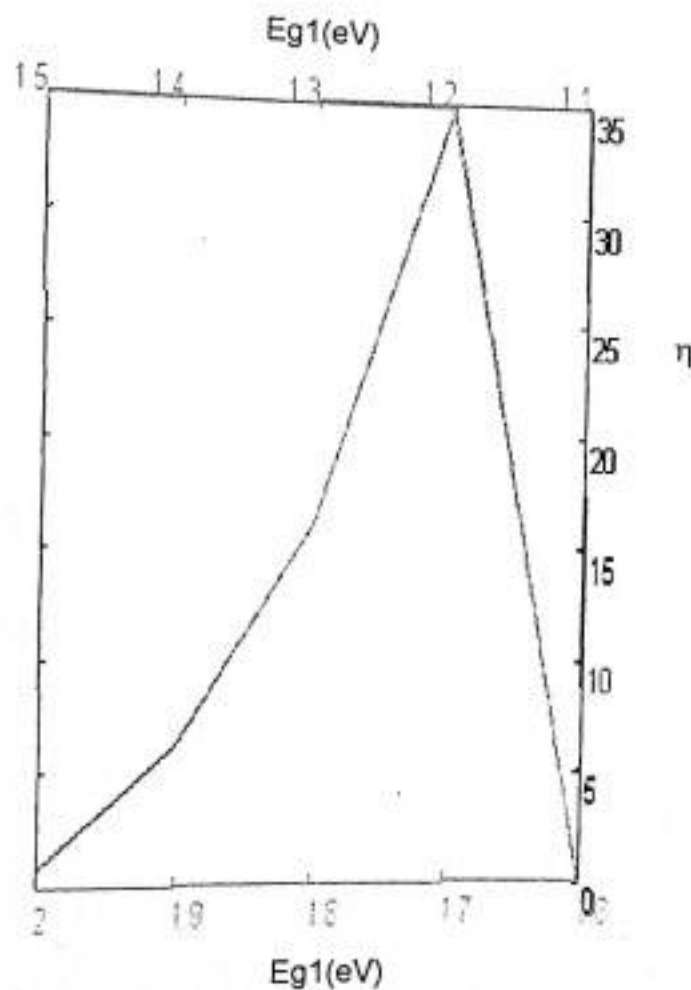


Gambar IV.2 Simulasi efisiensi sel surya tandem dengan Voc dan FF berdasarkan data pada lampiran 6.

Gambar IV.2 menunjukkan efisiensi sel surya a-Si:H berdasarkan nilai pita energi terlarang lapisan-i dimana efisiensi maksimum mencapai 4.3 % dengan pita energi terlarang pada sel-1 (E_{g1}) adalah 1.7 eV dan nilai pita energi terlarang pada sel-2 (E_{g2}) adalah 1.2. Efisiensi maksimum ini dicapai pada $V_{oc} = 0.13$ dan $FF = 0.31$ (gambar IV.2). Pada E_{g1} lebih besar 1.7 eV, E_{g2} lebih besar 1.2 eV, V_{oc} lebih besar 0.13 dan FF lebih besar 0.31, efisiensi menurun (Gambar IV.2). Hal ini terjadi karena energi gap yg lebih besar dari 1.7 eV maka panjang gelombang yang diserap akan semakin besar pula. Daerah dengan panjang gelombang diatas 6000 Å, koleksi muatan foton akan menurun yang menyebabkan J_{sc} menurun sehingga efisiensi menjadi kecil.

IV.3 Efisiensi Sel Surya Tandem dengan Menggunakan Voc dan FF dari Sel Surya Single Junction.

Dengan menggunakan data Voc dan FF dari beberapa sel surya single junction (lampiran 6) pada metoda sel surya tandem diperoleh visualisasi efisiensi sebagai berikut:



Gambar IV.3 efisiensi sel surya Tandem dengan menggabungkan beberapa sel single junction

Dengan melihat gambar IV.3, terlihat bahwa efisiensi sel surya dapat ditingkatkan dengan cara menyusun sel surya secara tandem, dimana sel surya dapat memperoleh efisiensi hingga 34.58 % dibandingkan efisiensi pada single junction yang hanya mencapai efisiensi 12.9 % (lampiran 6). Hal ini terjadi karena kerugian foton dan kerugian termal pada single junction dapat diminimalisasi pada sel tandem karena pada lapisan pertama sel tandem dapat menyerap energi foton sebanyak-banyaknya. Dengan energi foton yang tinggi dapat meningkatkan difusi pembawa muatan pada sel berikutnya sehingga meningkatkan arus hubung singkat antar subcell. Dengan meningkatnya arus hubung singkat akan meningkatkan efisiensi sel surya.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

V.1 Kesimpulan

1. Efisiensi sel surya meningkat pada nilai energi gap lapisan 1 (E_{g1}) 1.6 eV hingga 1.7 eV dan nilai energi gap lapisan 2 (E_{g2}) 1.1 eV hingga 1.2 eV. Sedangkan untuk E_{g1} lebih besar dari 1.7 eV dan E_{g2} lebih besar dari 1.2 eV efisiensi sel surya menurun hingga mendekati 0.
2. Efisiensi maksimum sel surya diperoleh dengan energi gap pada lapisan-i sel-1 (E_{g1}) adalah 1.7 eV dan energi gap pada lapisan-i sel-2 (E_{g2}) adalah 1.2 eV



V.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya diharapkan dapat menurunkan perumusan persamaan untuk memperoleh model efisiensi sel surya tandem dan perancangan model sederhana untuk menghitung efisiensi sel surya mikrocristalin Silikon ($\mu\text{-Si}$) dan nanokristal Silikon (nc-Si).

DAFTAR PUSTAKA

1. Street K.A., 1991, *Hydrogenated Amorphous Silicon*, Cambridge University Press, London
2. W. Sabon Yohanes, 2003, *Penentuan Efisiensi Kerja Panel Sel Surya*, Universitas Hasanuddin, Makassar
3. Sutrisno, 1985, *Elektronika Teori Dasar dan Penerapannya Jilid I*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
4. Sze. S. M., 1985, *Semiconductor Devices Physics and Technology*, AT & T Laboratories, New Jersey.
5. Takahashi K. dan Konagai M., 1986, *Amorphous Silikon Solar Cells*, North Oxford Academic, London
6. Haris Abdul, 1997, *Studi Awal Sel Surya Tandem p-i-n a-Si:H Pada p-GaSb/n-GaAs*, Institut Teknologi Bandung, Bandung
7. A. El-Kosheiry Mohamed, 1994, *A simple Method For Amorphous Tandem Solar Cell Suboptimal Design*, American University in Cairo, Mesir
8. Konagai Makoto. Professor, *Developmen of μ -Si Thin Film Solar Cells by using HW Methode*, Jurnal Graduate School of Science and Engineering Departmen of Physical Electronics and Electrical Properties of Matter, homepage.<http://Solid.pc.titech.ac.jp>, diakses pada tanggal 3 Maret 2006
9. Collins. R. W. and friends, *Fabrications and Characterization of Triple-Junction Amorphous Silikon Based Solar Cell with Nanocrystalline Silicon Bottom Cell*, The University of Toledo, Ohio.

LAMPIRAN



Lampiran 1

% Simulasi efisiensi model Sel Surya Tandem Berdasarkan Nilai Pita Energi

% Terlarang (Band GAP)

$g1=[1.5,1.5,1.5,1.5,1.5];$

$g2=[1,1,1,1,1];$

$E=0.1:0.1:0.5;$

$Eg1=g1+E;$ %Energi gap1 (eV)

$Eg2=g2+E;$ %Energi gap2 (eV)

$Eg3=[2,2,2,2,2];$ %Energi Gap lapisan p

$Eg4=[1.1,1.1,1.1,1.1,1.1];$ %Energi Gap lapisan n

$P=[0.3,0.45,0.55,0.6,0.7];$ %panjang gelombang (mikrometer)

$h=4.14*10^{-15};$ %Konstanta Planck (eV.det)

$c=3*10^{14};$ %Cepat rambat cahaya (mikrometer/dtk)

$Pg1=h.*c./Eg1;$ %Panjang gelombang bergantung energi gap1 (mikrometer)

$Pg2=h.*c./Eg2;$ %Panjang gelombang bergantung energi gap2 (mikrometer)

$Pg3=h.*c./Eg3;$

$Pg4=h.*c./Eg4;$

$A1=[7.516*10^5*P/1.242].*[(1.242./P)-(1.242./Pg1)].^2;$

$A2=[7.516*10^5*P/1.242].*[(1.242./P)-(1.242./Pg2)].^2;$

$A3=[7.516*10^5*P/1.242].*[(1.242./P)-(1.242./Pg3)].^2;$

$A4=[7.516*10^5*P/1.242].*[(1.242./P)-(1.242./Pg4)].^2;$

$A5=A3;$

$a1=-A1.*10^4;$

$a2=-A2.*10^4;$

$a3=-A3.*10^4;$

$a4=-A4.*10^4;$

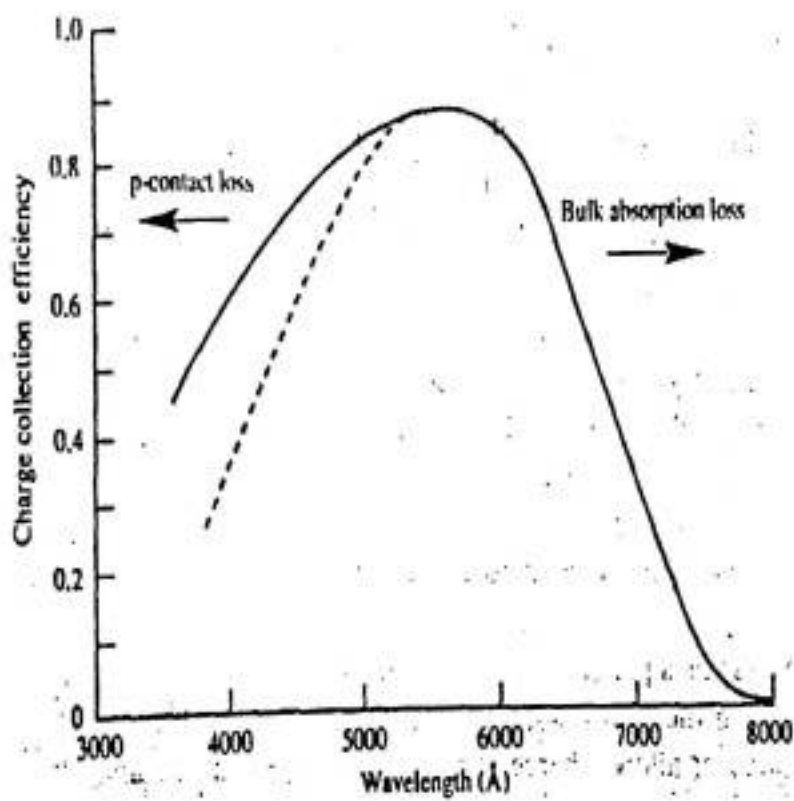
```

a5=a3;
a6=a4;
A=A1+A2+A3+A4+A5;
a=-A.*10^4;
q=-1.6*10^-19;    %Muatan (C)
k=1.38*10^-23;    %Tetapan Boltzman (eV/molekul.K)
Nph=[0,0.7,0.9,0.85,0.3];
L=[0.5*10^-4,0.5*10^-4,0.5*10^-4,0.5*10^-4,0.5*10^-4]; %cm
sc1=q*Nph.*a.*L.*[1-(a1.*L)];
sc2=q*Nph.*a.*L.*[1-(a2.*L)];
Jsc1=(sc1+sc2)/2;
sc4=q*Nph.*a.*L.*[1-(a4.*L)];
sc5=q*Nph.*a.*L.*[1-(a5.*L)];
Jsc2=(sc4+sc5)/2;
Jsc=(Jsc1+Jsc2)/2
T=300;           %Suhu (K)
ni=1.45*10^10;   %cm^-3
D=[2,5,10,20,50]; %koefisien difusi (cm^2/s)
t=L.*L./D
J1=-q.*ni.*L./2.*t;
Jo=J1.*10^3
x=(Jsc./Jo)+1;
y=[0,27.5488,26.8411,3.1433,0.8007]; %ln(Jsc/Jo + 1)
n=1:0.2:1.8;
Voc=(n*k*T/-q).*y
FF=[0.4,0.5,0.6,0.7,0.8];
Pi=100.*L.*L;
N=Jsc.*Voc.*FF./Pi.*100;
Pm=Jsc.*Voc.*FF;
plotyy(N,Eg1,N,Eg2)

```

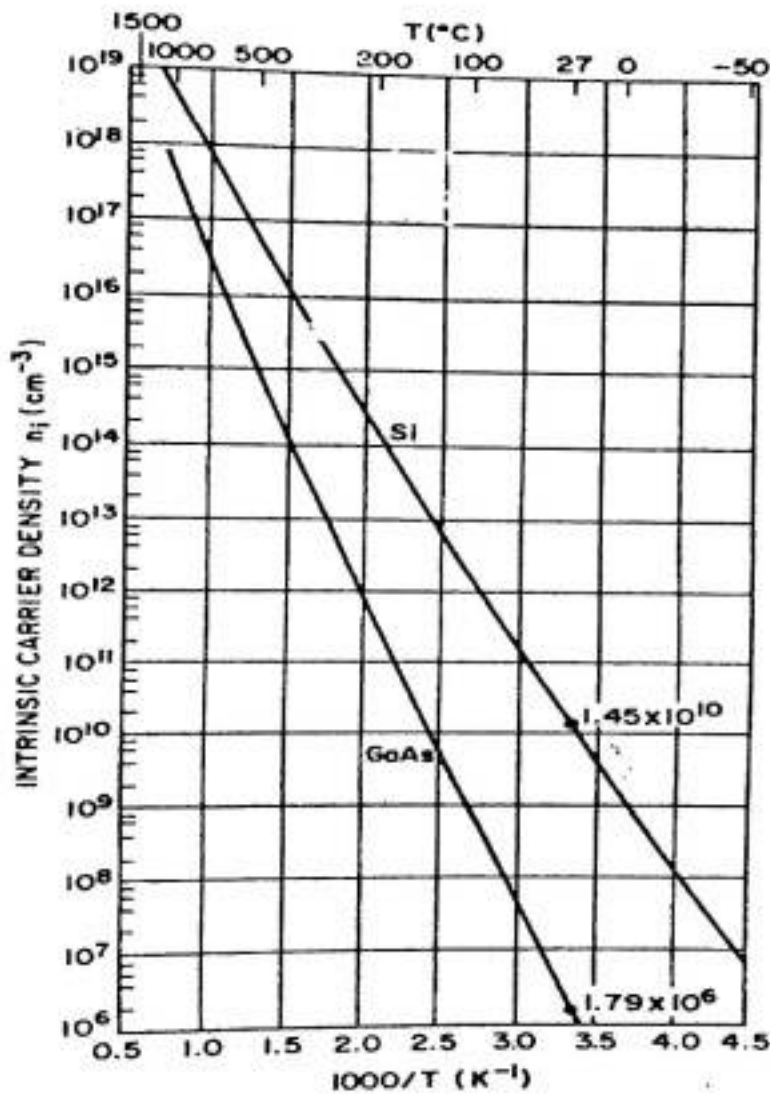
Lampiran 2

Grafik spektrum cahaya matahari



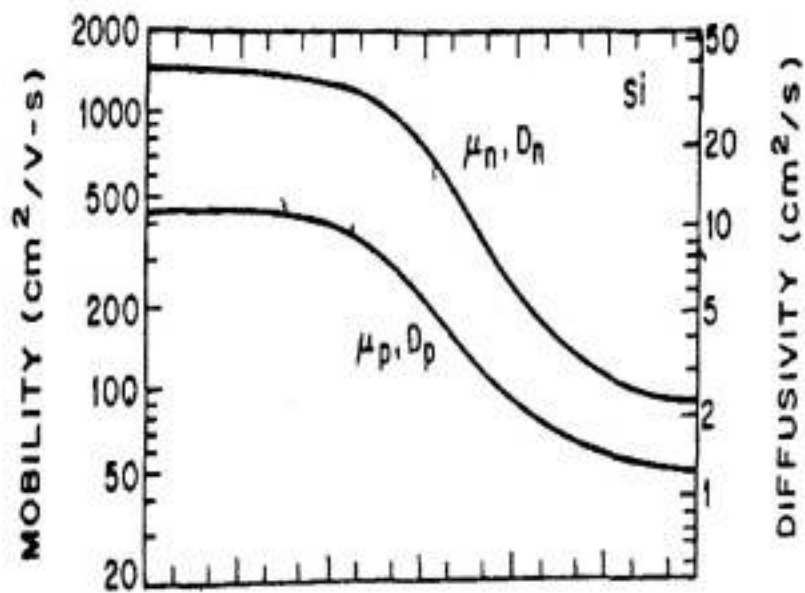
Lampiran 3

Grafik rapat pembawa muatan intrinsik



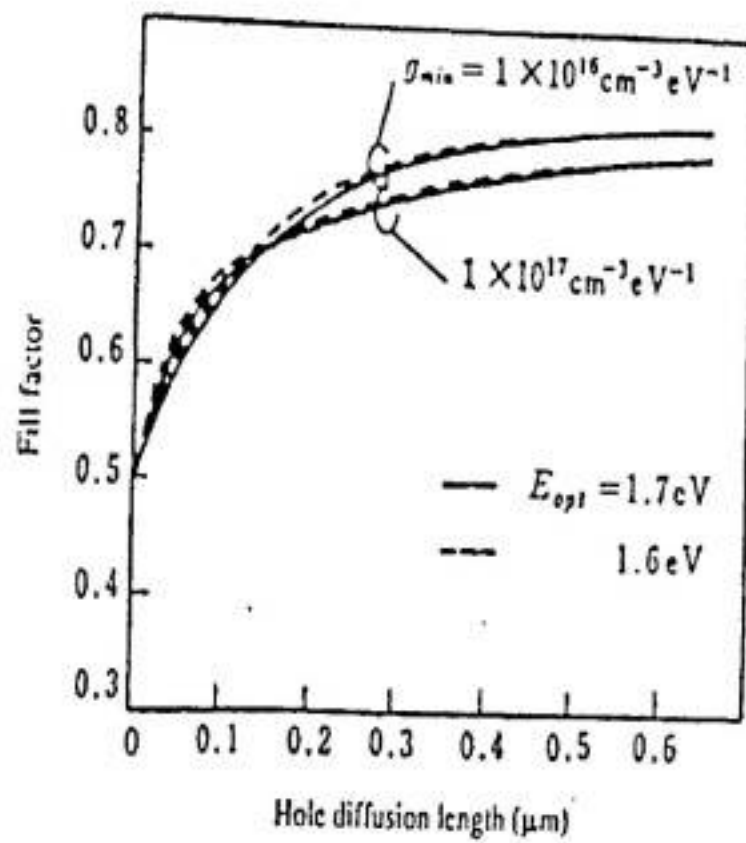
Lampiran 4

Grafik koefisien difusi



Lampiran 5

Grafik Fill factor



Lampiran 6

Data Voc dan FF

Tabel IV.1 Tabel data Voc dan FF pada Sel Surya Tandem a-Si:H

Voc(V)	FF
0.085	0.66
0.13	0.22
0.1805	0.31
0.25	0.51
0.281	0.54

Sumber data:

Abdul Haris, Studi awal Sel Surya Tandem p-i-n a-Si:H

Tabel IV.2 Tabel data Voc, FF dan Efisiensi pada sel surya single junction

Voc (V)	FF	η (%)
0.479	0.650	7.2
0.969	0.749	9.3
0.50	0.610	6.0
0.911	0.670	9.0
0.934	0.720	12.9

*Ambillah dari angin sepoi-sepoi kelembutannya,
dari minyak misik keharumannya, dan
dari gunung ketegaran dan kekokohannya
(Aidh Bin Abdullah Al-Qarni)*

Petiklah pelajaran dari kegagalan anda