

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Berdasarkan jurnal penelitian Ahmat, Achmat Rifai, Nursi, Rendra Rianda H, Muchlis dari Universitas Negeri Makasar (2012), yang berjudul Pembangkit Listrik Tenaga Surya yang membahas mengenai Pembangkit Listrik Tenaga Surya itu konsepnya sederhana. Yaitu mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik. Cahaya matahari merupakan salah satu bentuk energi dari sumber daya alam. Sumber daya alam matahari ini sudah banyak digunakan untuk memasok daya listrik di satelit komunikasi melalui sel surya. Sel surya ini dapat menghasilkan energi listrik dalam jumlah yang tidak terbatas langsung diambil dari matahari, tanpa ada bagian yang berputar dan tidak memerlukan bahan bakar. Sehingga sistem sel surya sering dikatakan bersih dan ramah lingkungan.

Berdasarkan jurnal penelitian Dr. Ariswan Dosen Fisika FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta yang membahas mengenai Fotovoltaik Sebagai Sumber Energi Alternatif Di Indonesia bahwa Indonesia menerima energi surya tiap satuan waktu harian rata-rata $4,8 \text{ kW/m}^2$ dengan selang waktu siang tahunan relatif panjang di banding 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

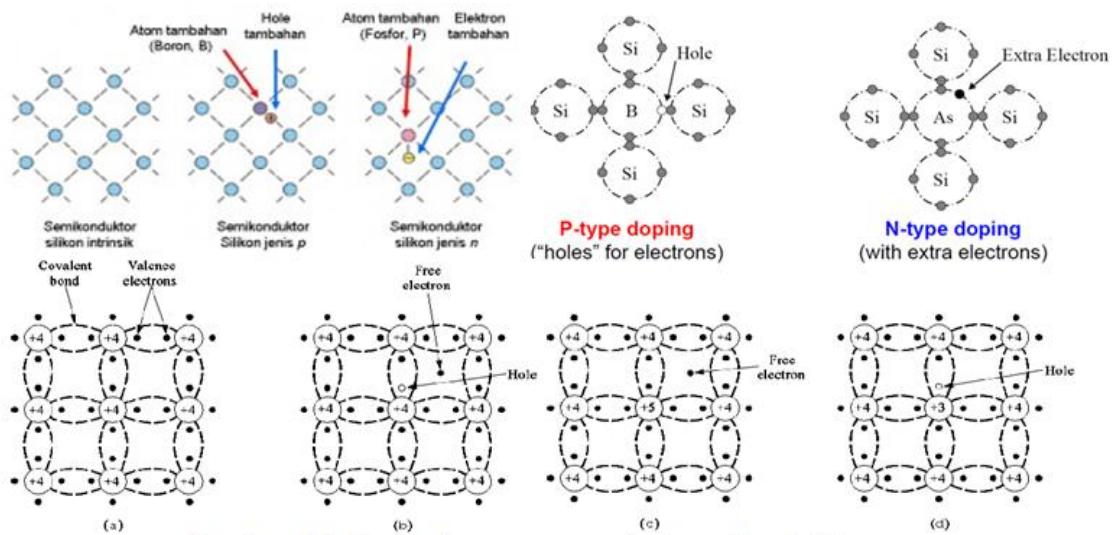
spektrum energi surya. Hal ini jelas memerlukan penelitian yang sangat panjang dan secara terus menerus di laboratorium.

Berdasarkan pendapat Kreith (1978), energi surya merupakan sumber energi yang tak habis-habisnya berpotensi memenuhi sebagian besar energi masa depan dengan konsekuensi minimal yang merugikan lingkungan. Ini mengindikasi bahwa energi surya adalah yang paling menjanjikan sumber energi konservasi.

2.2 Landasan Teori

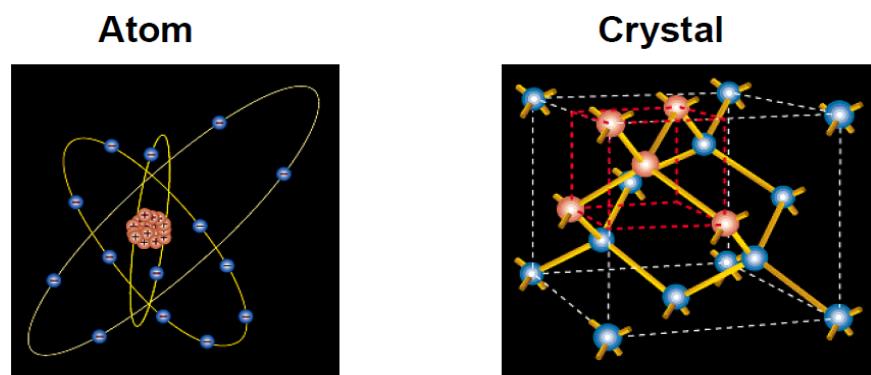
2.2.1 Prinsip Kerja Modul Surya

Proses pengubahan atau konversi cahaya surya menjadi listrik ini dimungkinkan karena bahan material yang menyusun sel surya berupa semikonduktor. Lebih tepatnya tersusun atas dua jenis semikonduktor yakni jenis *n* dan jenis *p*. Semikonduktor jenis *n* merupakan semikonduktor yang memiliki kelebihan elektron, sehingga kelebihan muatan negatif (*n* = negatif). Sedangkan semikonduktor jenis *p* memiliki kelebihan *hole*, sehingga kelebihan muatan positif (*p* = positif) karena. Caranya, dengan menambahkan unsur lain ke dalam semikonduktor, maka kita dapat mengontrol jenis semikonduktor tersebut, sebagaimana diilustrasikan pada gambar 2.1 di bawah ini.



Gambar 2.1 Ilustrasi Cara Mengontrol Semikonduktor

Pada awalnya, pembuatan dua jenis semikonduktor ini dimaksudkan untuk meningkatkan tingkat konduktifitas atau tingkat kemampuan daya hantar listrik dan panas semikonduktor alami. Di dalam semikonduktor alami (disebut dengan semikonduktor intrinsik) ini, elektron maupun *hole* memiliki jumlah yang sama. Kelebihan elektron atau *hole* dapat meningkatkan daya hantar listrik maupun panas dari sebuah semikonduktor.

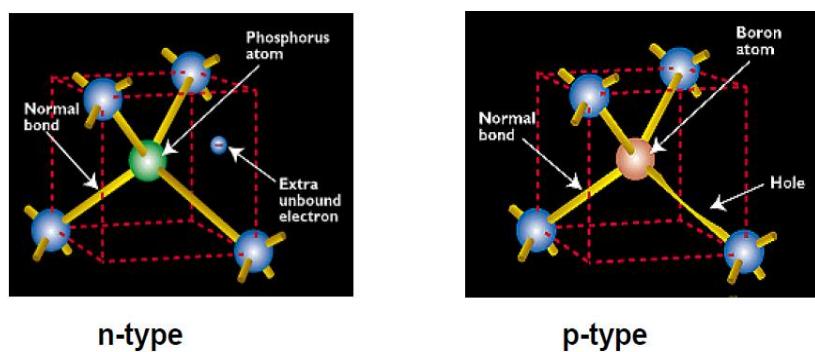


Atomic number: 14
Atomic weight: 28.08
Ground state
electron configuration:
 4 valence electrons

Covalent bond
Basic unit: 5 Si atoms
Crystal lattice:

- diamond lattice unit
- **lattice constant 5.4 Å**

Gambar 2.2 Struktur Atom Dan Kristal Silikon



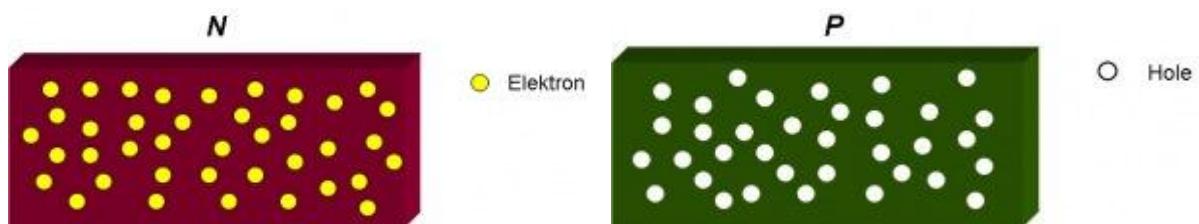
Introducing Phosphorus
 Phosphorus atom:
 5 valence electrons

Introducing Boron
 Boron atom:
 3 valence electrons

Gambar 2.3 Struktur Semikonduktor Kristal Silikon

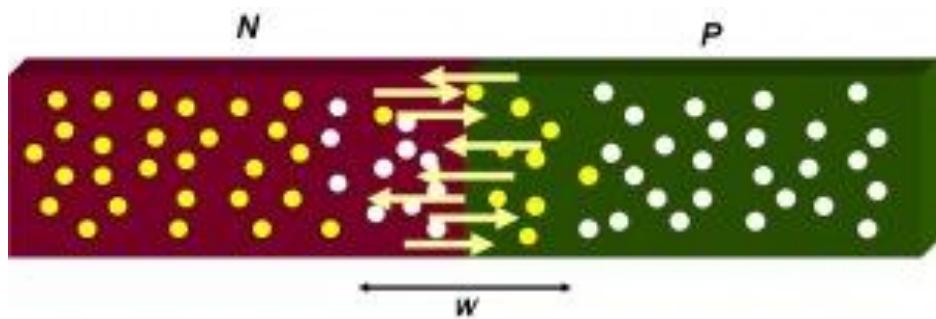
Semikonduktor jenis *p*, biasanya dibuat dengan menambahkan unsur Boron (B), Aluminum (Al), Gallium (Ga) atau Indium (In) ke dalam Si. Unsur tambahan ini akan menambah jumlah *hole*. Sedangkan semikonduktor jenis *n* dibuat dengan menambahkan Nitrogen (N), Fosfor (P) atau Arsen (As) ke dalam Si. Dari sini, tambahan elektron dapat diperoleh. Usaha menambahkan unsur tambahan ini disebut dengan *doping* yang jumlahnya tidak lebih dari 1 % dibandingkan dengan berat Si yang hendak di-*doping*. Dua jenis semikonduktor *n* dan *p* ini jika disatukan akan membentuk sambungan *p-n* atau dioda *p-n* (istilah lain menyebutnya dengan sambungan metallurgi atau *metallurgical junction*) yang dapat digambarkan sebagai berikut gambar 2.4.

- a. Semikonduktor jenis *p* dan *n* sebelum disambung.



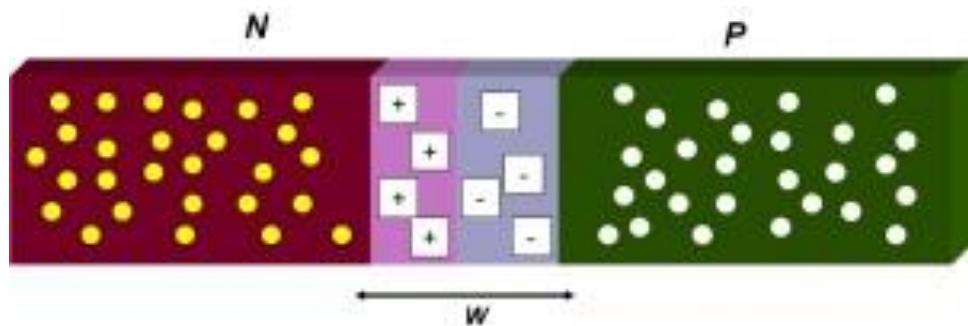
Gambar 2.4 Semikonduktor Jenis *p* dan *n* Sebelum Disambung

- b. Sesaat setelah dua jenis semikonduktor ini disambung, terjadi perpindahan elektron-elektron dari semikonduktor *n* menuju semikonduktor *p*, dan perpindahan *hole* dari semikonduktor *p* menuju semikonduktor *n*. Perpindahan elektron maupun *hole* ini hanya sampai pada jarak tertentu dari batas sambungan awal.



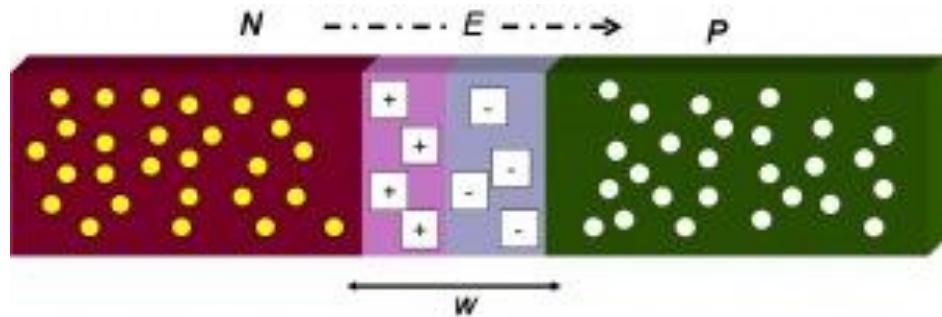
Gambar 2.5 Setelah Dua Jenis Semikonduktor Ini Disambung

- c. Elektron dari semikonduktor n bersatu dengan *hole* pada semikonduktor p yang mengakibatkan jumlah *hole* pada semikonduktor p akan berkurang. Daerah ini akhirnya berubah menjadi lebih bermuatan negatif. Pada saat yang sama, *hole* dari semikonduktor p bersatu dengan elektron yang ada pada semikonduktor n yang mengakibatkan jumlah elektron di daerah ini berkurang. Daerah ini akhirnya lebih bermuatan positif.



Gambar 2.6 Elektron Dari Semikonduktor n Bersatu Dengan *Hole* Pada Semikonduktor p

- d. Daerah negatif dan positif ini disebut dengan daerah deplesi (*depletion region*) ditandai dengan huruf W.
- e. Baik elektron maupun *hole* yang ada pada daerah deplesi disebut dengan pembawa muatan minoritas (*minority charge carriers*) karena keberadaannya di jenis semikonduktor yang berbeda.
- f. Dikarenakan adanya perbedaan muatan positif dan negatif di daerah deplesi, maka timbul dengan sendirinya medan listrik internal E dari sisi positif ke sisi negatif, yang mencoba menarik kembali *hole* ke semikonduktor p dan elektron ke semikonduktor n . Medan listrik ini cenderung berlawanan dengan perpindahan *hole* maupun elektron pada awal terjadinya daerah deplesi (nomor 1 di atas).

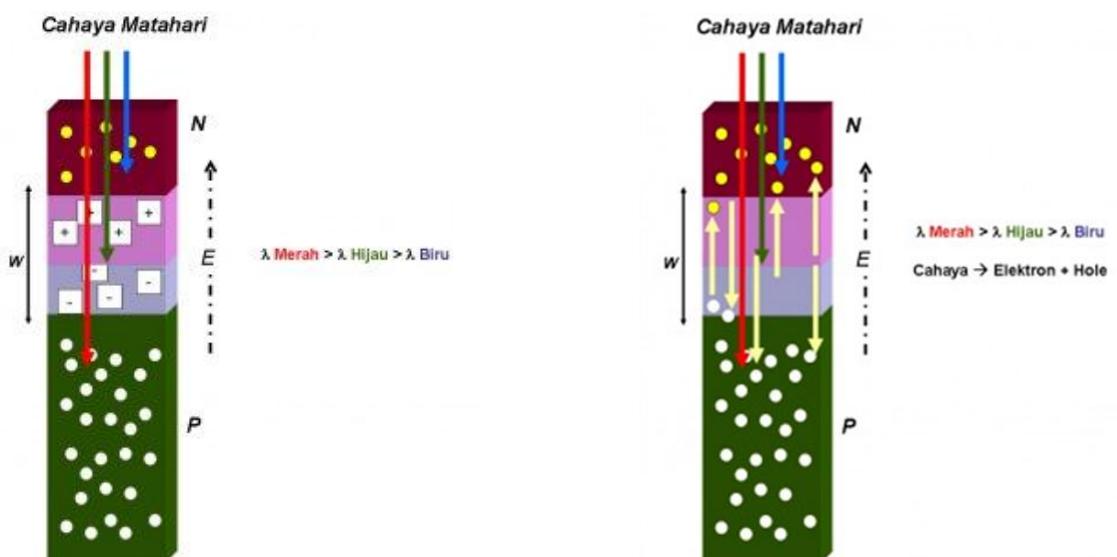


Gambar 2.7 Tarik Menarik Hole ke Semikonduktor p Dan Elektron Ke Semikonduktor n

- g. Adanya medan listrik mengakibatkan sambungan $p-n$ berada pada titik setimbang, yakni saat di mana jumlah *hole* yang berpindah dari semikonduktor p ke n dikompensasi dengan jumlah *hole* yang tertarik kembali kearah semikonduktor p akibat medan listrik E . Begitu pula dengan jumlah elektron yang berpindah dari smikonduktor n ke p , dikompensasi dengan mengalirnya kembali elektron ke semikonduktor n akibat tarikan medan listrik E . Dengan kata lain, medan listrik E mencegah seluruh elektron dan *hole* berpindah dari semikonduktor yang satu ke semikonduktor yang lain.

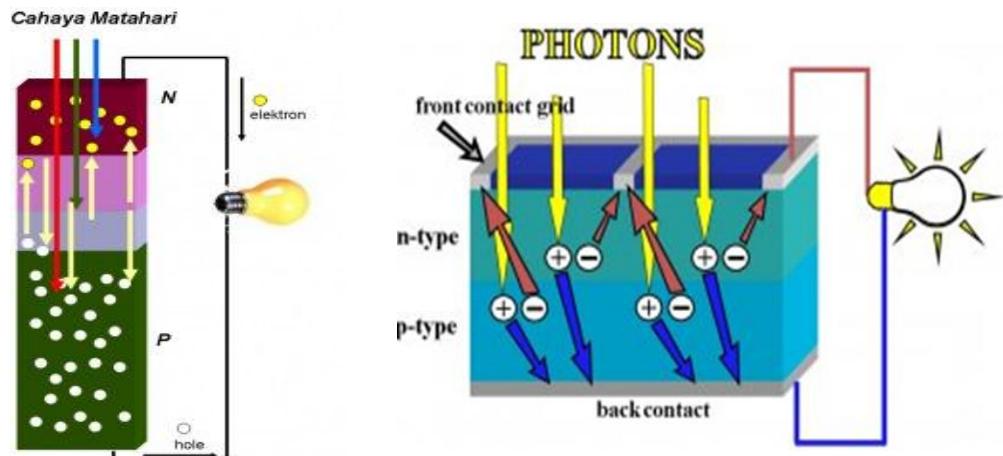
Pada sambungan $p-n$ inilah proses konversi cahaya surya menjadi listrik terjadi. Untuk keperluan sel surya, semikonduktor n berada pada lapisan atas sambungan p yang menghadap kearah datangnya cahaya surya, dan dibuat jauh lebih tipis dari semikonduktor p , sehingga cahaya surya yang jatuh ke permukaan sel surya dapat terus terserap dan masuk ke daerah deplesi dan semikonduktor p .

Ketika sambungan semikonduktor ini terkena cahaya surya, maka elektron mendapat energi dari cahaya surya untuk melepaskan dirinya dari semikonduktor n , daerah deplesi maupun semikonduktor. Terlepasnya elektron ini meninggalkan *hole* pada daerah yang ditinggalkan oleh elektron yang disebut dengan fotogenerasi *electron-hole* (*electron-hole photogeneration*), yakni terbentuknya pasangan *electron* dan *hole* akibat cahaya surya. Cahaya surya dengan panjang gelombang yang berbeda, membuat fotogenerasi pada sambungan $p-n$ berada pada bagian sambungan $p-n$ yang berbeda pula.



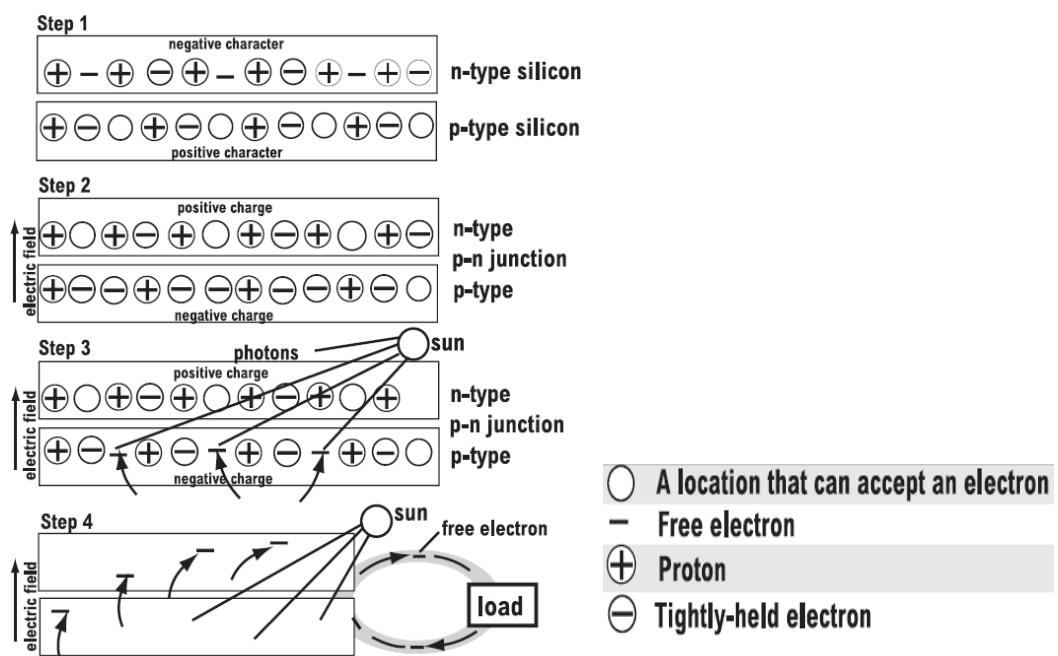
Gambar 2.8 Cahaya Matahari

Spektrum merah dari cahaya surya yang memiliki panjang gelombang lebih panjang, mampu menembus daerah deplesi hingga terserap di semikonduktor p yang akhirnya menghasilkan proses fotogenerasi di sana. Spektrum biru dengan panjang gelombang yang jauh lebih pendek hanya terserap di daerah semikonduktor n .



Gambar 2.9 Spektrum Cahaya

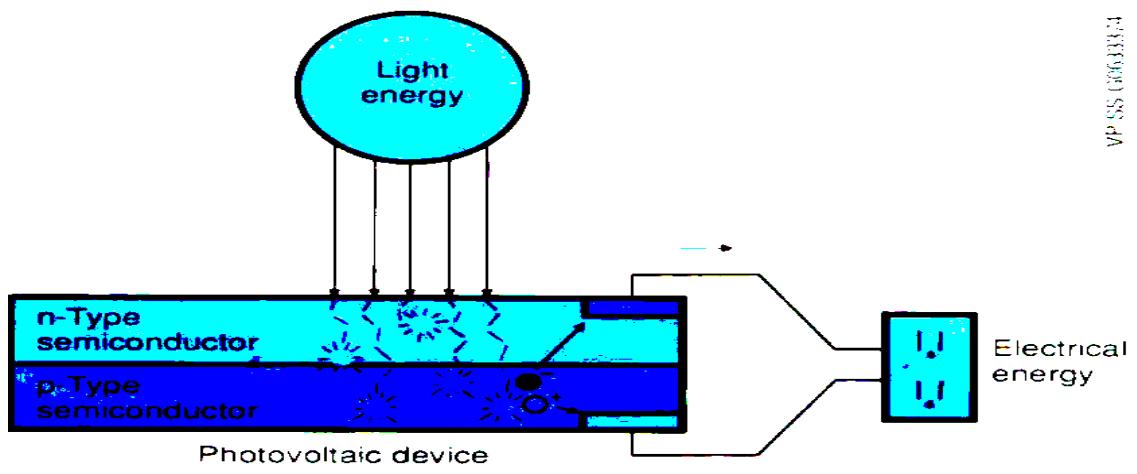
Selanjutnya, dikarenakan pada sambungan *p-n* terdapat medan listrik E, elektron hasil fotogenerasi tertarik ke arah semikonduktor *n*, begitu pula dengan *hole* yang tertarik ke arah semikonduktor *p*. Apabila rangkaian kabel dihubungkan ke dua bagian semikonduktor, maka elektron akan mengalir melalui kabel. Jika sebuah lampu kecil dihubungkan ke kabel, lampu tersebut menyala dikarenakan mendapat arus listrik, dimana arus listrik ini timbul akibat pergerakan elektron.



Gambar 2.10 Rangkaian Kabel Pada Dua Bagian Semikonduktor

2.2.2 Mekanisme Konversi Energi Sel Surya Modul Surya

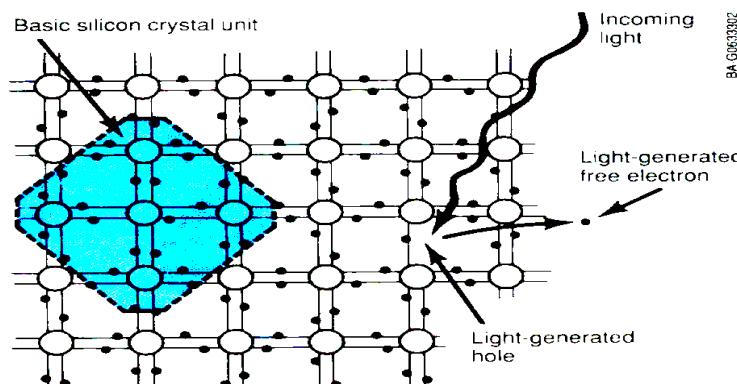
Sel pada modul surya adalah perangkat konversi energi surya menjadi listrik, yang terdiri dari *p-n junction* dalam suatu semikonduktor (lihat gambar dibawah). Mekanisma konversi energi cahaya karena adanya perpindahan elektron bebas di dalam suatu atom. Kondutifitas elektron atau kemampuan transfer elektron suatu material terletak pada banyaknya elektron valensi material tersebut. Sel pada modul surya pada umumnya menggunakan material semikonduktor sebagai penghasil elektron bebas, suatu material padat seperti logam yang konduktifitas elektriknya tergantung pada elektron valensinya. Konduktifitas semikonduktor akan naik sesuai kenaikan temperaturnya.



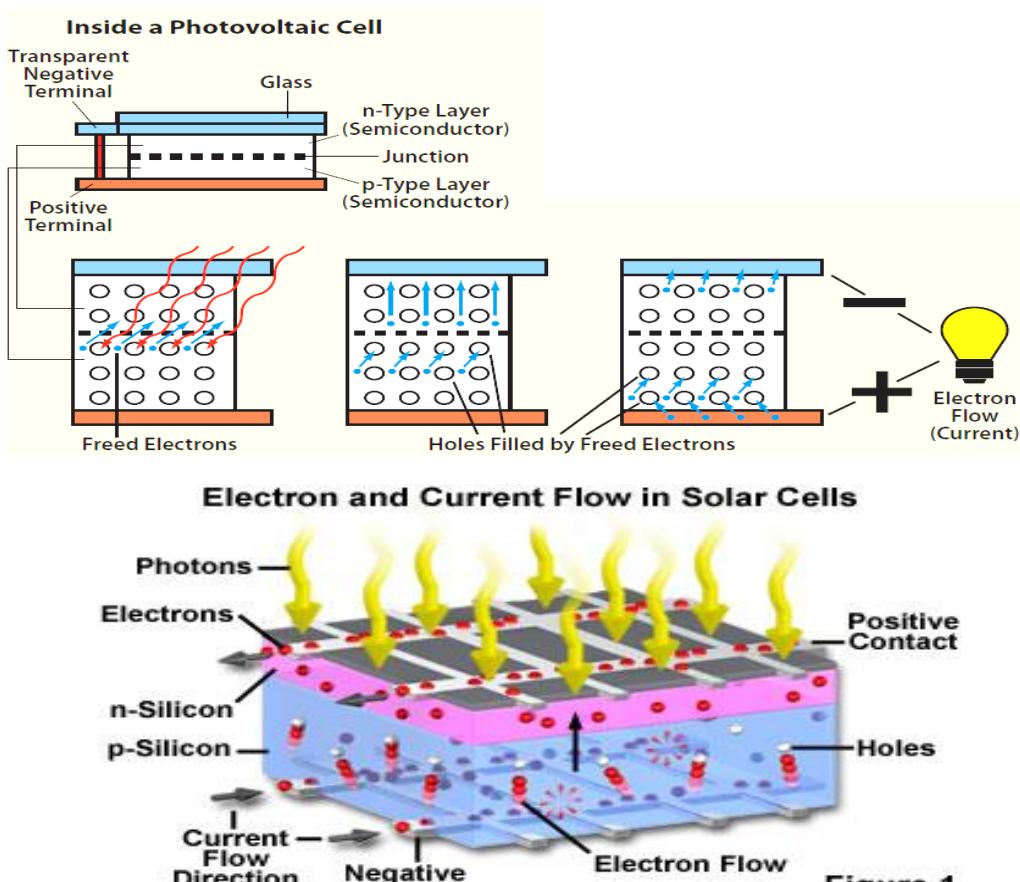
Gambar 2.11 Konversi Energi Surya Menjadi Energi Listrik Pada Semikonduktor

Ketika foton dari sumber cahaya membentur suatu elektron valensi atom semikonduktor dengan energi yang cukup besar menyebabkan elektron terlepas dari atomnya. Elektron tersebut bermuatan negatif bergerak bebas pada daerah pita konduksi dalam kristal semikonduktor. Lepasnya elektron dari atom mengakibatkan suatu kekosongan (*hole*) pada kristal yang bermuatan positif. Skema ilustrasi mekanisma pelepasan elektron dari struktur atom kristal semikonduktor dapat dilihat pada Gambar 2.12 berikut ini.

Daerah semikonduktor dengan elektron bebas yang bersifat negatif dan berfungsi sebagai donor elektron, disebut sisi *n*-type (tipe negatif). Daerah semikonduktor dengan *hole* yang bersifat positif dan berfungsi sebagai penerima (acceptor) elektron, disebut sisi *p*-type (tipe positif).



Gambar 2.12 Skema Ilustrasi Mekanisme Pelepasan Elektron Dari Struktur Atom Kristal Semikonduktor

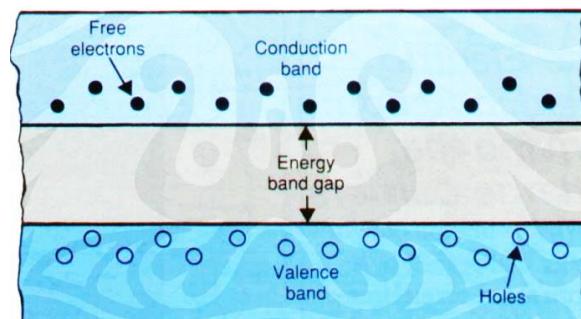


Gambar 2.13 *p-n* Junction Ini Dihubungkan Dengan Beban

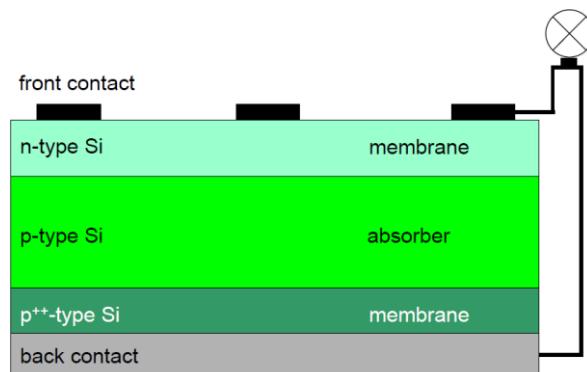
Ikatan kedua sisi disebut sambungan positif dengan negatif (*p-n junction*) menghasilkan energi listrik internal yang akan menyebabkan elektron bebas dan *hole* bergerak ke arah berlawanan. Elektron akan bergerak meninggalkan sisi negatif menuju sisi positif, sedangkan *hole* bergerak meninggalkan sisi positif menuju sisi negatif. Jika *p-n junction* ini dihubungkan dengan beban (sebuah lampu), akan mengalir arus listrik melalui beban (lampu menyala) – gambar 2.13 di atas.

2.2.3 Bahan semikonduktor

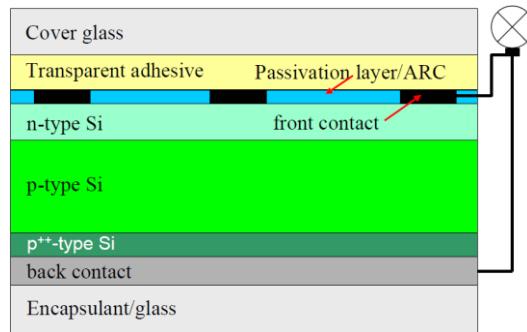
Lebar pita (band gap) suatu semikonduktor sangat menentukan intensitas (banyaknya) spektrum cahaya yang mampu diserap oleh sel surya PV. Hanya energi cahaya yang setara dengan atau lebih besar dari band gap yang diserap dan melepas elektron. Pergerakan elektron bebas dari pita konduktif dan pergerakan *hole* dari pita valensi melewati band gap inilah yang merupakan energi listrik, seperti ditunjukkan oleh gambar 2.14 dibawah ini.



Gambar 2.14 Pergerakan Elektron Bebas Dari Pita Konduktif Dan Pergerakan *Hole* Dari Pita Valensi Melewati Band Gap Inilah Yang Merupakan Energi Listrik

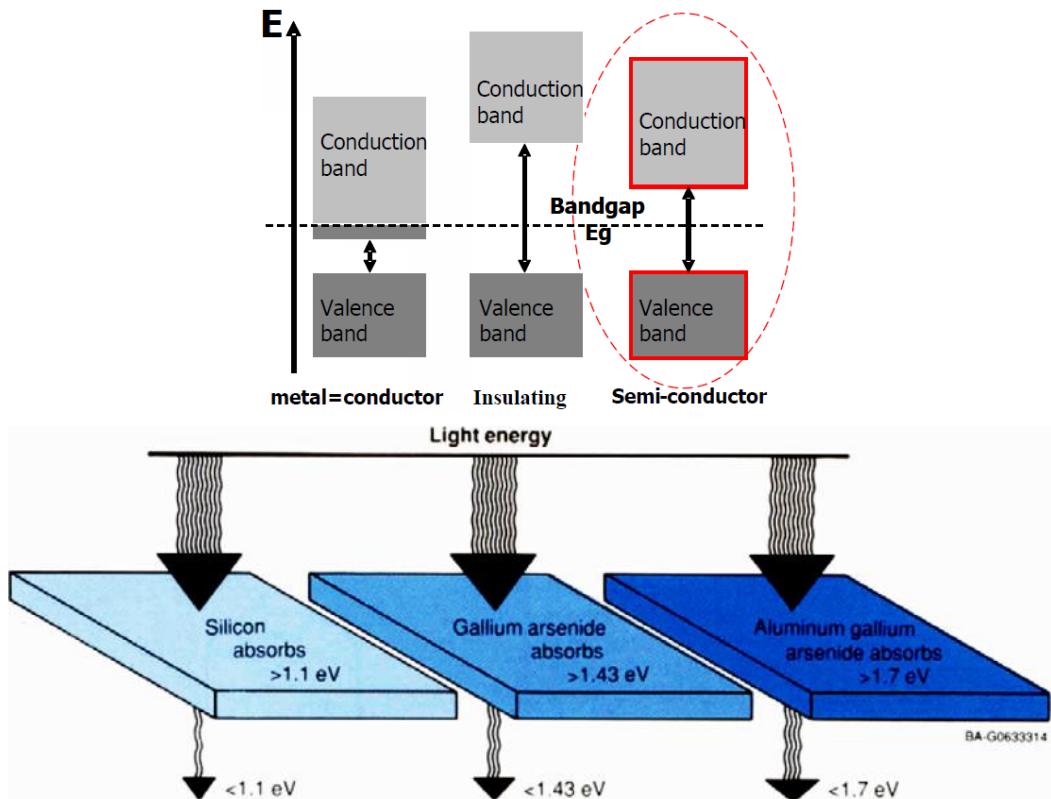


Gambar 2.15 *p-n Junction Of Semiconductor Based Solar Cells*



Gambar 2.16 Solar Cell Materials

Energi cahaya yang lebih rendah akan dipantulkan atau ditembuskan oleh sel modul surya. Sedangkan energi yang lebih tinggi akan diserap dan sebagian berubah menjadi panas. Sehingga bahan dengan band gap yang lebih rendah akan mampu memanfaatkan spektrum cahaya yang lebih banyak dan menghasilkan arus listrik yang lebih besar tetapi dengan tegangan yang rendah, lihat gambar 2.17 dibawah ini.



Gambar 2.17 Ilustrasi Jika Bahan Dengan Band Gap Yang Lebih Rendah Akan Mampu Memanfaatkan Spektrum Cahaya Yang Lebih Banyak Dan Menghasilkan Arus Listrik Yang Lebih Besar Tetapi Dengan Tegangan Yang Rendah

Band gap juga mempengaruhi besar/kuat medan listrik yang dihasilkan. Material/bahan yang memiliki band gap yang lebih tinggi akan menghasilkan tegangan (*voltage*) listrik yang lebih tinggi, tetapi dengan arus yang lebih rendah. Semikonduktor dengan band gap antara 1 – 1,8 eV terbukti lebih efektif digunakan sebagai sel modul surya.

2.2.4 Struktur Modul Surya (*Photovoltaic PV*)

Struktur inti sel surya pada umumnya terdiri dari satu atau lebih jenis material atau bahan semikonduktor dengan dua daerah berbeda yaitu, daerah positif dan negatif yang berfungsi sebagai elektroda. Untuk menghasilkan dua daerah muatan yang berbeda umumnya digunakan dopant dengan golongan periodik yang berbeda, hal ini dimaksudkan agar dopant pada daerah negatif akan berfungsi sebagai pendoror elektron, sedangkan dopant pada daerah positif akan berfungsi sebagai penerima (*acceptor*) elektron.

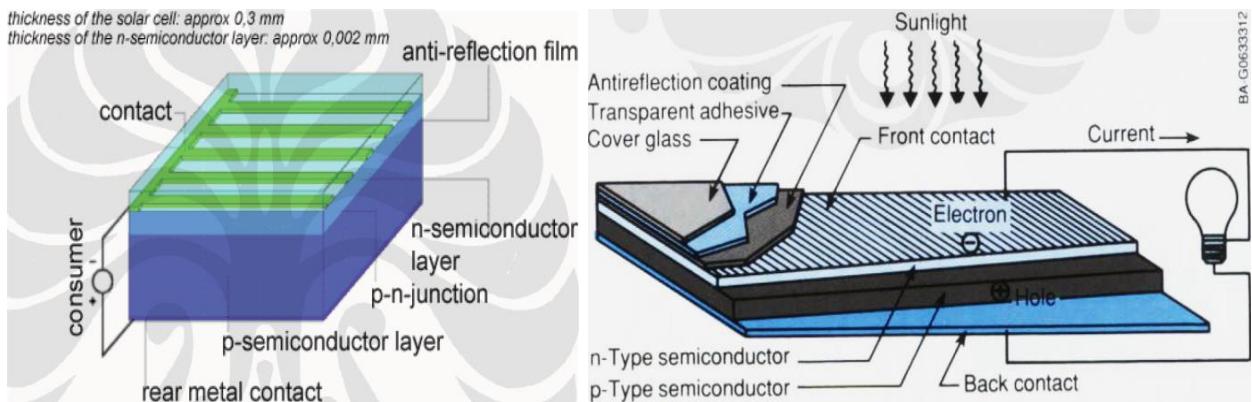
Pada sel surya modul surya digunakan bahan silikon (golongan IV pada tabel periodik) sebagai semikonduktor. Untuk menghasilkan dua muatan yang berbeda, maka pada satu sisi diberi dopant dari golongan periodik V yang mempunyai elektron valensi lima. Hal ini mengakibatkan silikon mempunyai kelebihan elektron (*n-type*). Sedangkan pada sisi yang lain digunakan dopant dari golongan periodik III yang mempunyai elektron valensi tiga yang mengakibatkan silikon kekurangan elektron (*p-type*). Oleh karena untuk membentuk suatu struktur yang stabil dibutuhkan empat elektron, maka kekurangan satu elektron akan diperoleh dari donor n-type.

The periodic table displays elements from atomic number 1 to 118. Key features include:

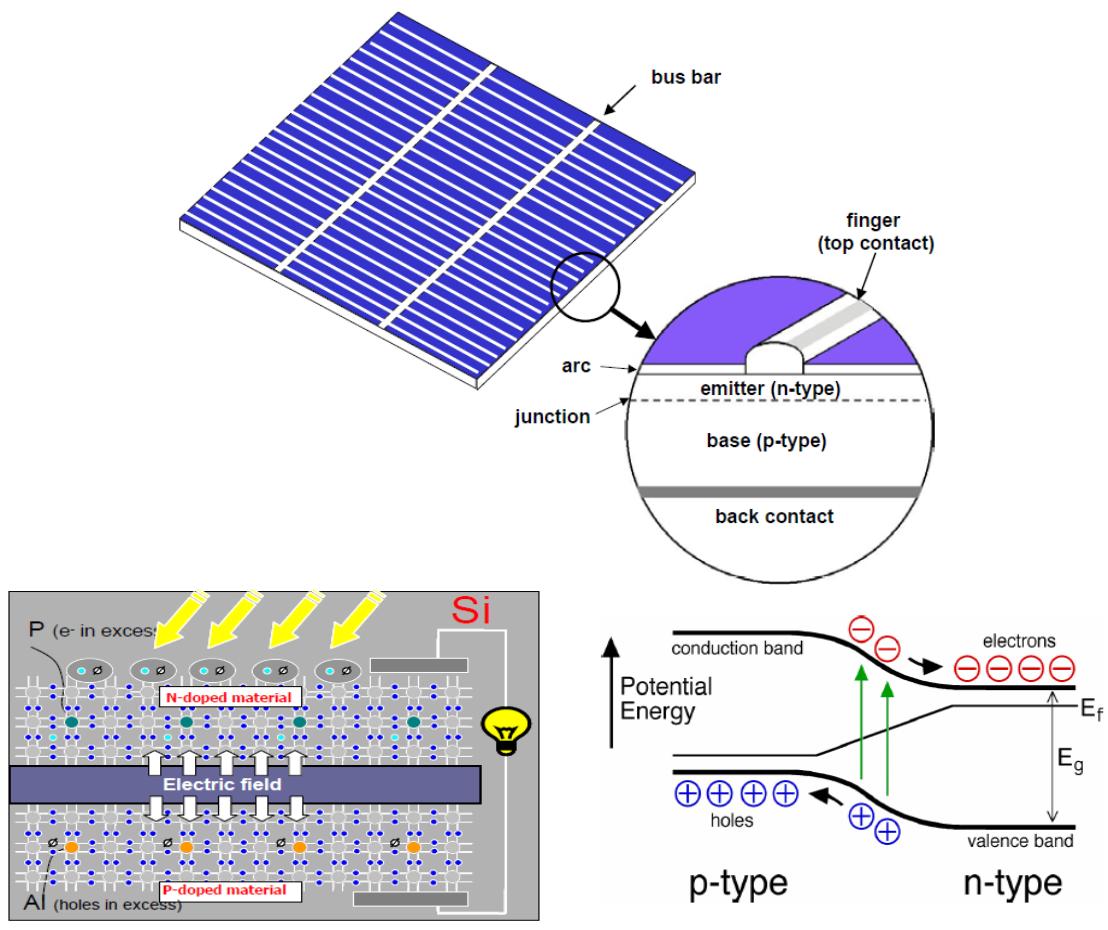
- Properties:** Column C shows Solid, Liquid, Gas, and Unknown states.
- Groups:** Groups 13-18 are labeled as Metals, Nonmetals, and Noble gases.
- Periods:** Periods 1-7 are shown at the bottom.
- Elements:** Specific elements are highlighted in blue boxes: Scandium (Sc), Yttrium (Y), Lanthanides (Ce-Lu), Actinoids (Th-Lr), Francium (Fr), Radium (Ra), and Ununhexium (Uus).
- Atomic Data:** Includes Atomic Number (1-118), Symbol, Name, and Atomic Mass.

Gambar 2.18. Tabel Periodik

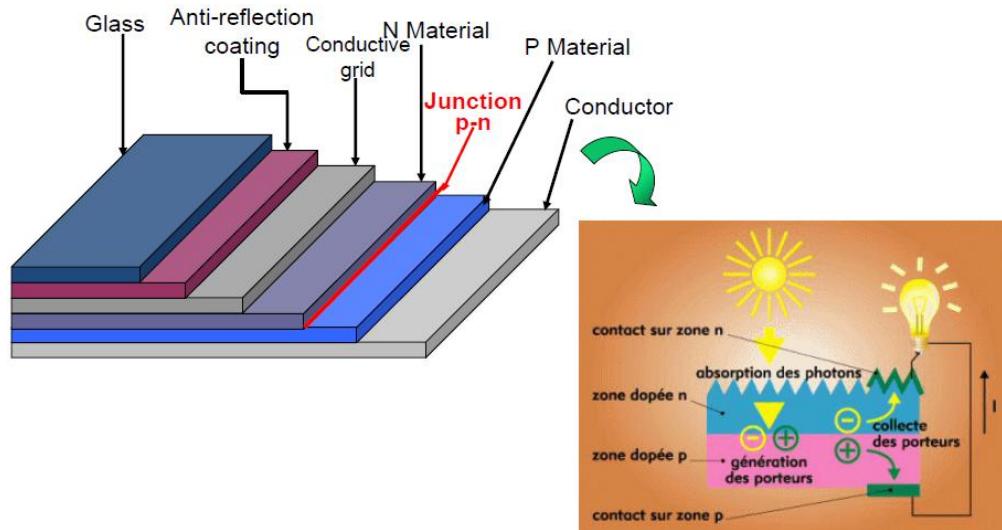
Selain itu pada sel di modul surya dipasang lapisan antirefleksi, dan substrat logam sebagai tempat mengalirnya arus dari lapisan *n-type* (*electron*) dan *p-type* (*hole*). Lihat gambar 2.19 .



Gambar 2.19 Struktur Sel Photovoltaic

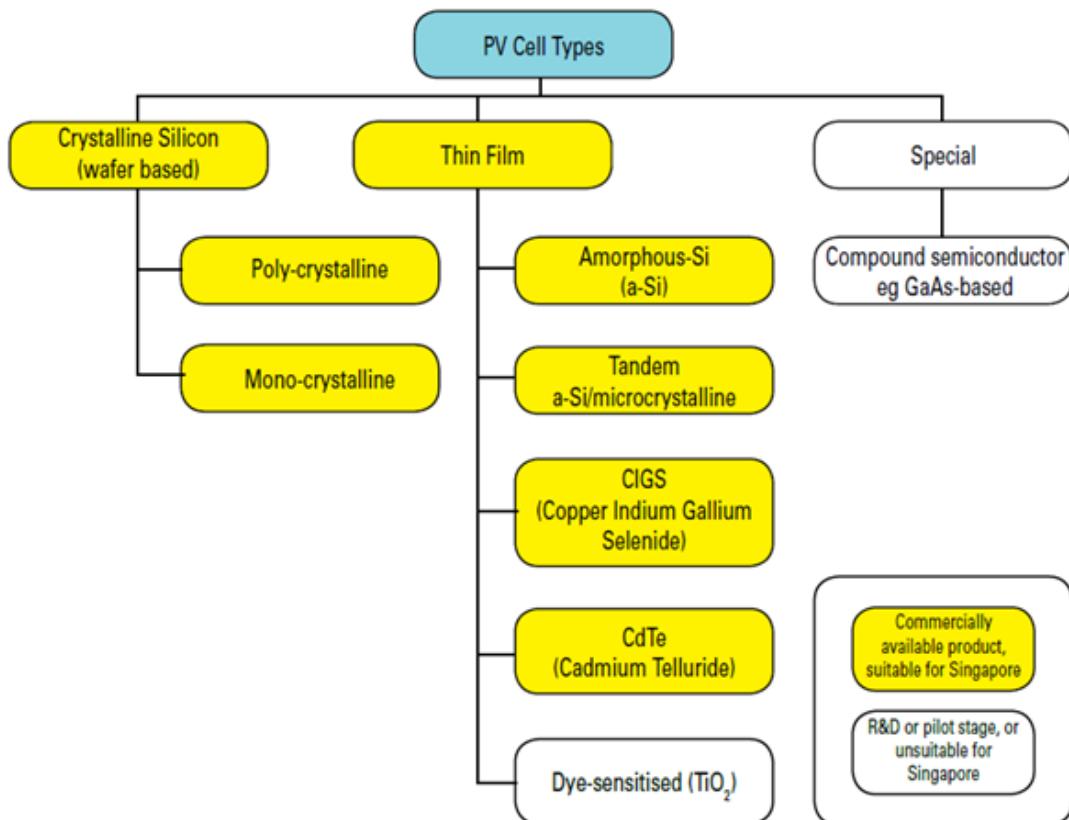


Photons $E > E_g$ enable the formation of pairs electrons-holes



Gambar 2.20 Struktur Sel Modul Surya Silikon

2.2.5 Jenis Modul Surya



Gambar 2.21 Jenis-Jenis Modul Surya

Secara garis besar jenis modul surya dapat dibagi dua, yaitu kristal silikon dan thin film (lapisan tipis) seperti penjelasan sebagai berikut :

a. Kristal Silikon (*Single Crystal*)

Kristal silikon merupakan jenis Modul Surya (*PV cell*) yang pertama kali dikembangkan dengan menggunakan teknologi semikonduktor *p-n junction*.

Terdiri dari dua jenis kristal, yaitu :

1. *Mono Crystalline*

Jenis *mono-crystalline* dibuat dari keping (wafer) silikon kristal tunggal yang dicirikan dengan susunan atom yang teratur dan hanya mempunyai satu orientasi kristal, yaitu semua atom tersusun secara simetris. Dibandingkan dengan jenis poli kristal, sel ini memiliki efisiensi yang relatif lebih tinggi (14 % - 19%), namun lebih mahal. Secara umum, mono kristal memiliki kemurnian material yang tinggi yang mencapai 99,99 %. Ciri umum yang melekat adalah berwarna biru gelap kehitaman.

2. *Poly Crystalline*

Sel photovoltaic poli kristal dibuat dengan teknologi *casting* berupa balok silikon dan dipotong-potong tipis (*wire-sawing*) menjadi kepingan, dengan ketebalan sekitar 250–350 *micrometer*. Metode ini relatif tidak memerlukan ketelitian dan biaya tinggi, namun menghasilkan sel surya dengan efisiensi lebih rendah dibandingkan mono kristal.

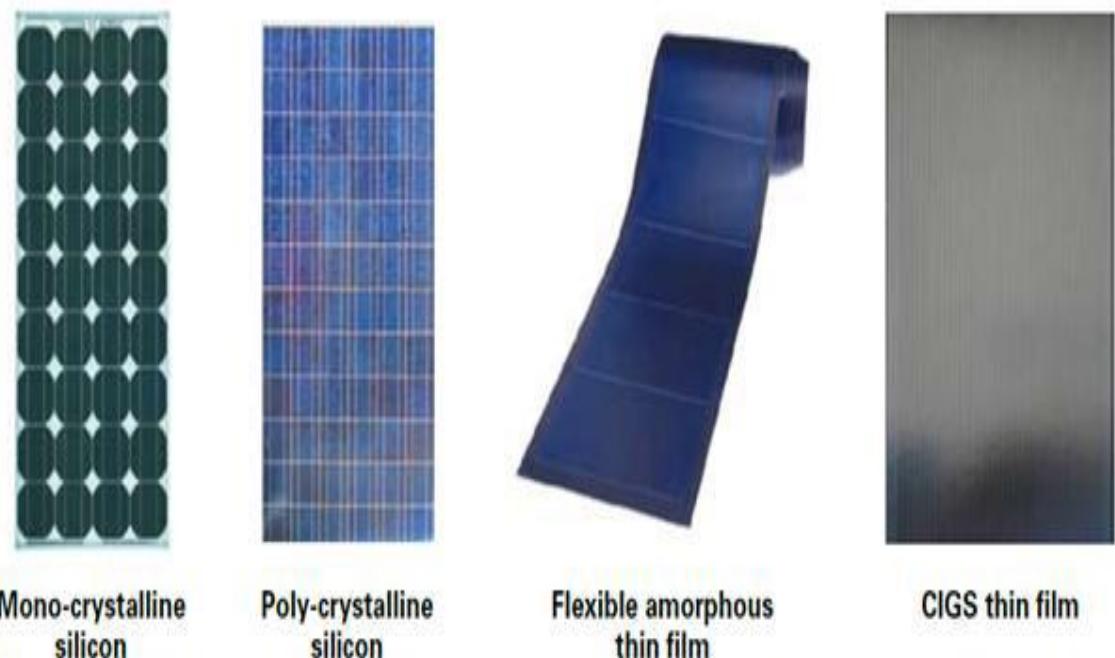
b. Lapisan Tipis (*Thin Film*)

Jenis lapisan ini bentuknya lebih tipis dengan ketebalan sekitar 10 mm dan fleksibel sehingga bisa mengikuti bentuk permukaan dari

benda yang akan ditempati . seperti misalnya bentuk atap mobil atau gedung.

Terdiri dari berbagai tipe sebagai berikut :

1. *Amorphous Silikon*
2. *Tandem mikro-crystalline.*
3. *CIGS(Copper Indium Gallium Selenide)*
4. *CdTe (Cadmium Telluride)*



Mono-crystalline
silicon

Poly-crystalline
silicon

Flexible amorphous
thin film

CIGS thin film

Gambar 2.22 Bentuk Beberapa Jenis Modul Surya

Efisiensi modul dan luasan modul yang diperlukan untuk menghasilkan daya sebesar 1 kWp, di jelaskan pada Tabel 2.1. Sedangkan koefisien temperatur untuk masing-masing tipe modul surya tercantum pada Tabel 2.2 dibawah ini.

Tabel 2.1 Efisiensi Modul Surya

CELL MATERIAL	MODULE EFFICIENCY	SURFACE AREA NEED FOR 1 kWp
Monocrystalline silicon	13–19%	5–8 m ²
Polycrystalline silicon	11–15%	7–9 m ²
Micromorphous tandem cell (a-Si/μc-Si)	8–10%	10–12 m ²
Thin film copper-indium/gallium-sulfur/diselenide (CI/GS/Se)	10–12%	8–10 m ²
Thin-film cadmium telluride (CdTe)	9–11%	9–11 m ²
Amorphous silicon (a-Si)	5–8%	13–20 m ²

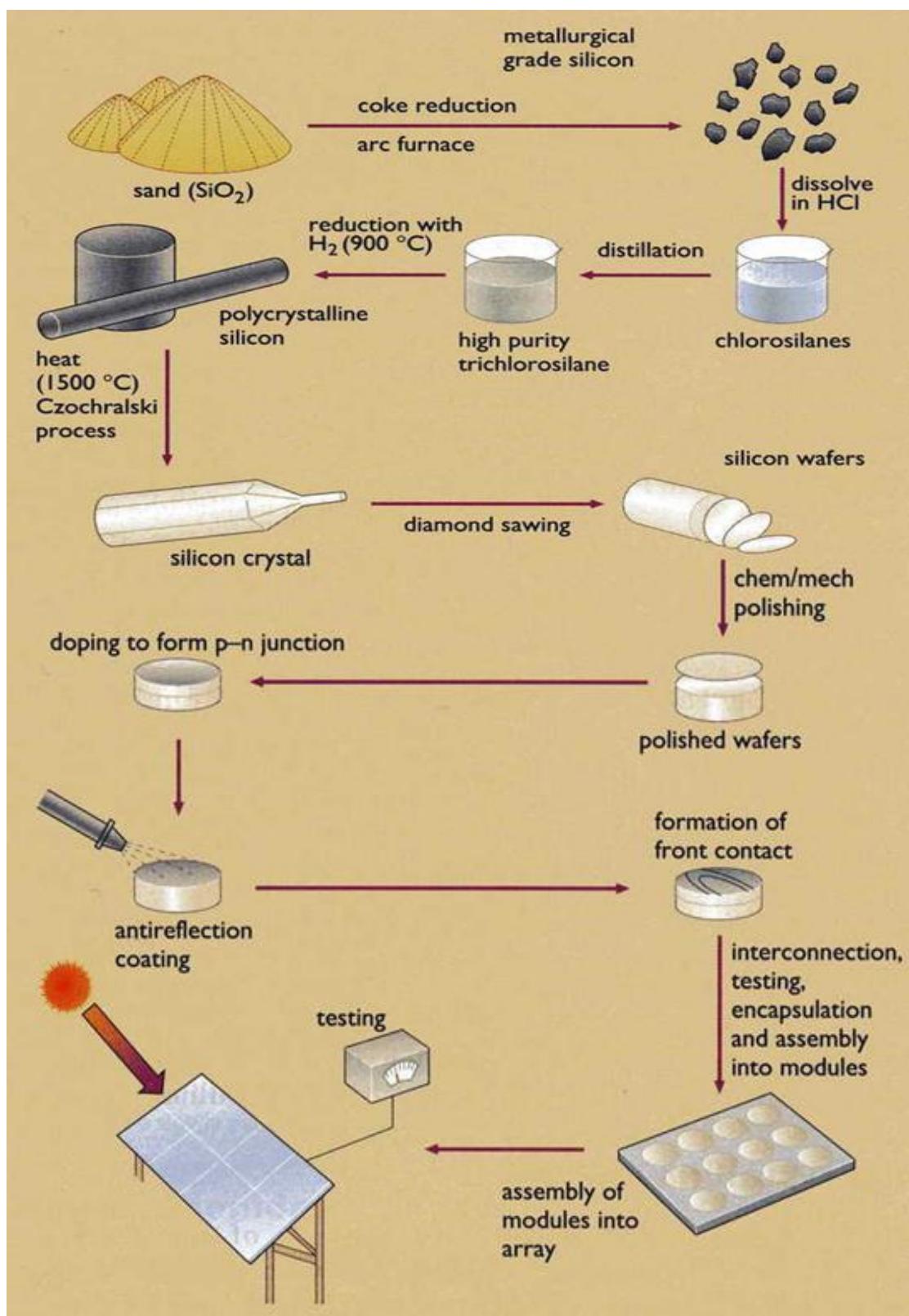
Tabel 2.2 Koefisien Temperatur Modul Surya

Technology	Temperature Coefficient [%/°C]
Crystalline silicon	-0.4 to -0.5
CIGS	-0.32 to -0.36
CdTe	-0.25
a-Si	-0.21

2.2.6 Fabrikasi Modul Surya (*PV Cell*).

Untuk proses pembuatan modul surya, bahan dasar semikonduktor yang banyak digunakan adalah silikon (Si), karena mudah didapat, jumlahnya banyak, murah dan proses pembuatannya mudah. Silikon adalah bahan yang tidak beracun dan mudah didapat dimana-mana. Proses fabrikasi bahan silikon sampai menjadi bahan semikonduktor berbentuk wafer dan menjadi *PV Cell*,

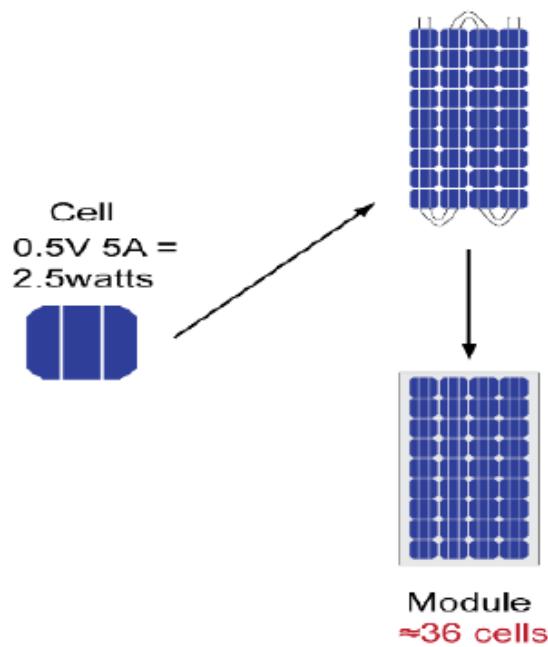
digambarkan pada gambar 2.23 berikut ini.



Gambar 2.23 Proses Fabrikasi SiO_2 Sampai Menjadi PV Cell

2.2.7 Konstruksi Modul Surya

Konstruksi fisik modul surya, seperti terlihat pada gambar 2.24. Modul surya dengan tegangan output nominal $V_{oc} = 12$ Volt, terdiri dari 36 buah *cell* modul surya yang masing-masing tegangannya adalah 0.5 Volt. Ke 36 *cell* ini dihubungkan secara seri, sehingga total dihasilkan tegangan modul surya sebesar 18 volts, namun karena adanya beberapa tegangan *drop* dan rugi-rugi tegangan, maka didapat tegangan nominal modul surya sebesar 12 Volts, yang dapat digunakan untuk mengisi *battery* 12 Volts.

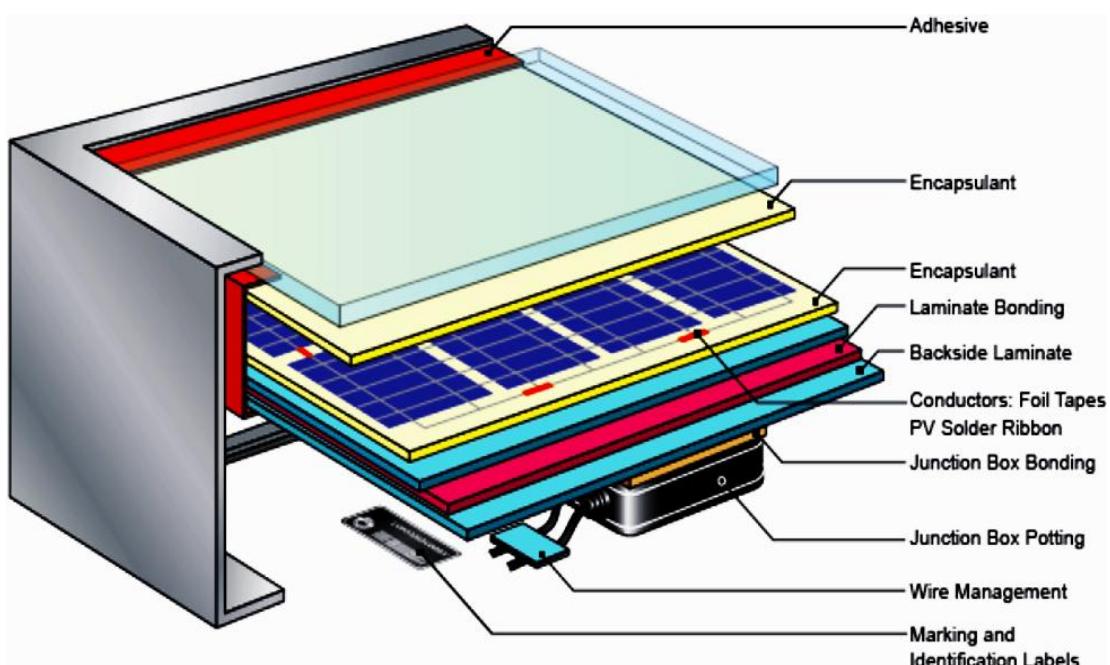


Gambar 2.24 Kondisi Fisik Konstruksi Modul Surya

Pada umumnya modul surya mampu bertahan 20 hingga 25 tahun, khususnya untuk modul *mono-crystalline*. Modul tipe ini dirancang untuk masa operasi 30 tahun pada saat perancangan dengan acuan kondisi *lab-test*. Sel-sel silikon itu sendiri tidak mengalami kerusakan atau degradasi bahkan setelah puluhan tahun pemakaian. Namun demikian, output modul akan mengalami penurunan dengan berjalan waktu. Degradasinya ini diakibatkan oleh dua faktor utama, yaitu rusaknya lapisan atas sel (*ethylene vinyl acetate-EVA*) dan lapisan bawah (*polyvinyl fluoride film*) secara perlahan-lahan, serta kerusakan secara

alami EVA yang terjadi secara bertahap di antara lapisan gelas dan sel-sel itu sendiri.

Lapisan laminasi modul berfungsi melindungi modul dari uap air akibat kelembaban udara, meskipun tidak mungkin 100% kedap. Lapisan dirancang sedemikian rupa sehingga saat suhu modul naik, uap air yang masuk ke modul akan dikeluarkan kembali melalui peningkatan suhu.



Gambar 2.25 Modul *Photovoltaic* Silikon Terdiri Dari Berbagai Bahan Material Meliputi Silikon, Kaca/Glass, And Alumunium

Karena modul terekspos ke sinar matahari secara terus menerus, sinar ultraviolet (UV) mengakibatkan kerusakan materi laminasi secara perlahan, dari yang bersifat elastis menjadi plastik. Lambat laun uap air akan tetap terperangkap di dalam dan menyebabkan korosi pada koneksi sel, yang akan menjadi tahanan bagi koneksi antar sel dan menurunkan tegangan operasi modul. Dan seperti yang telah disebutkan, timbulnya kerusakan alami secara perlahan antara lapisan gelas dan sel-sel silikon menyebabkan berkurangnya sinar matahari yang dapat diserap sel.

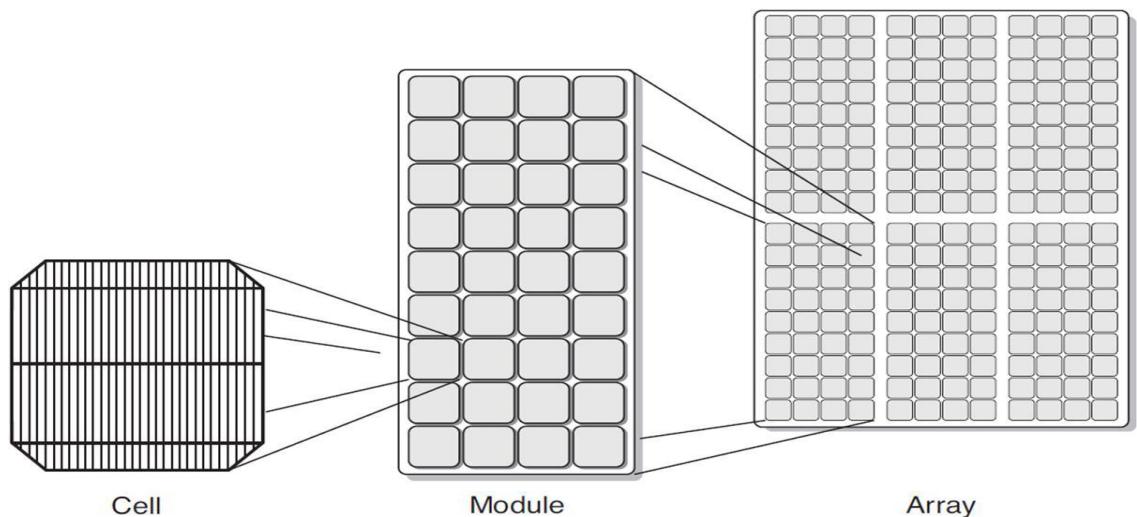
Pada modul silikon kristalin terbaru, permukaan depan/atas modul selalu terdiri dari kaca/glass, dikuatkan agar kuat secara fisik dengan kandungan besi yang rendah sehingga memudahkan penyebaran gelombang pendek dari spektrum cahaya surya. Permukaan belakang modul dapat dibuat dari berbagai macam bahan yang paling umum adalah *Tedlar*, meskipun bahan plastik lain dapat digunakan. Jika suatu level transparansi diperlukan, maka mungkin menggunakan lembaran *Tedlar translucent* (tembus cahaya) atau yang paling umum suatu lembar kedua dari kaca. Struktur kaca-kaca (*glass-glass*) lebih populer untuk aplikasi arsitektural, terutama untuk bagian depan gedung ataupun atap.

Modul kaca *Tedlar* biasanya dibuat dengan teknik laminasi (pelapisan). Sel-sel yang tersambung secara listrik diapit oleh dua lembar pelapis *encapsulant*, misalnya Eva (*ethylene vinyl acetate*), dan ditempatkan pada lembaran kaca yang menjadi permukaan atas modul. Kemudian ditambahkan lembar plastik belakang dan keseluruhan struktur ditempatkan pada laminator. Udara dihilangkan/dikosongkan dan kemudian diletakkan di atas suatu membran perapat fleksibel di atas modul untuk memberikan tekanan. Kemudian modul dipanaskan sehingga pelapis *encapsulant* mencair dan melapisi sel-sel. Bahan *encapsulant* tambahan juga diliputkan di seluruh pinggiran modul untuk menjamin perapatan yang sempurna di sisi pinggiran modul.

Dalam pengoperasian, modul selalu bertemperatur antara 50 hingga 80 °C ketika beroperasi pada kondisi surya cerah dan dengan temperatur udara luar 25 – 30 °C. Meskipun temperatur operasi ini tidak berlebihan, perbedaan pemuaian panas (*thermal expansion*) berbagai komponen harus diperhitungkan. Juga, kemungkinan pemuaian dengan temperatur yang lebih tinggi pada saat pembuatan modul, sekalipun dengan waktu yang sangat singkat. Rangkaian sel ini harus memungkinkan perbedaan Rangkaian sel ini harus memungkinkan perbedaan pemuaian panas sepanjang *ribbon* antara setiap sel. Sambungan listrik juga dibuat pada dua tempat dalam setiap sel (*double tabbing*) untuk memungkinkan setiap masalah dengan pemuaian panas dan tegangan lainnya selama pembuatan dan operasi.

Modul surya juga harus menyediakan perpindahan panas yang baik untuk menjaga temperatur sel serendah mungkin. *Encapsulant* juga dibutuhkan untuk menjadi isolasi listrik dan pelindung fisik, sehingga koefisien perpindahan panas yang tinggi tidak mungkin. Temperatur operasi juga dipengaruhi bahan lapisan luar modul, dengan struktur kaca-kaca biasanya beroperasi dengan temperatur lebih tinggi dari pada modul kasa *Tedlar* pada kondisi operasi yang sama. Warna lapisan film *Tedlar* belakang juga berpengaruh. Misalnya modul dengan belakang *Tedlar* berwarna putih akan menolak panas lebih banyak dari pada modul dengan belakang Tedlarnya berwarna hitam, sehingga beroperasi lebih efisien.

Modul biasanya disiapkan dengan rangka (*frame*) dari metal agar dapat langsung dipasang pada struktur penyangganya.



Gambar 2.26 Cell, Module, Array

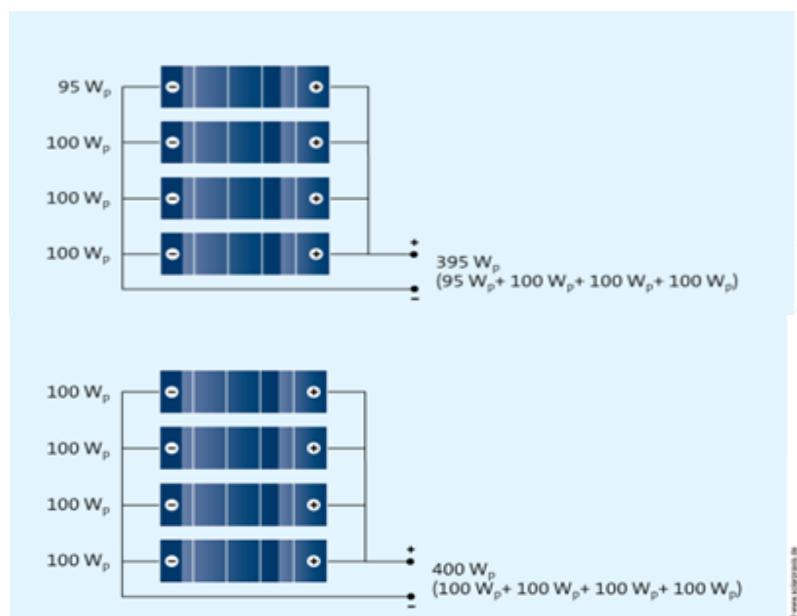
Modul-modul dapat dibentuk menjadi berbagai konfigurasi *Array* atau *String* dalam bentuk hubungan seri atau paralel atau kombinasi seri-paralel, seperti terlihat pada gambar 2.26.

2.2.8 Array atau Rangkaian Modul Surya

Sistem-sistem photovoltaik atau lebih dikenal dengan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA) dibuat berdasarkan kebutuhan catu daya dan sistem tegangan yang diinginkan oleh beban. Untuk membuat rangkaian modul surya dilakukan dengan cara menghubungkan modul surya secara seri dan paralel. Seperti dijelaskan sebagai berikut :

a) Hubungan Paralel Modul Surya

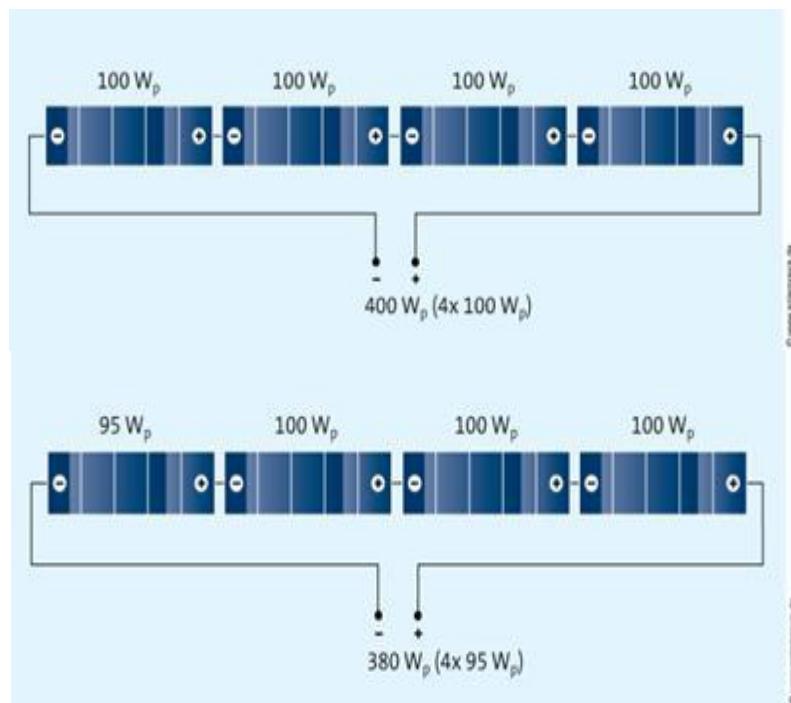
Untuk mendapatkan arus listrik yang lebih besar dari pada keluaran arus listrik dari setiap modul surya, maka modul surya dihubungkan secara parallel, dengan cara menghubungkan kutub-kutub yang sama (kutub negatif saling dihubungkan dan kutub positif juga saling dihubungkan), seperti terlihat pada gambar 2.27. Apabila 4 buah modul surya masing-masing modul surya mempunyai tegangan kerja 12 Volt dan menghasilkan daya listrik sebesar masing-masing 100 Wp, kemudian keempatnya dihubungkan secara paralel maka akan didapatkan daya total sebesar 400 Wp sedangkan tegangan total akan sama dengan tegangan masing-masing modul surya yaitu 12 Volt. Namun jika dari empat modul tersebut ada satu modul dengan daya 95 Wp, maka daya totalnya adalah 395 Wp.



Gambar 2.27 Konfigurasi Hubungan Paralel Modul Surya

b) Hubungan Seri Modul Surya

Untuk mendapatkan tegangan yang diinginkan modul surya dihubungkan secara seri yaitu dengan cara menghubungkan kutub positif dan kutub negatif seperti terlihat pada gambar 2.28. Tegangan total yang didapatkan dengan cara menghubungkan seri empat buah modul masing-masing mempunyai tegangan 12 Volt adalah merupakan jumlahnya yaitu 48 Volt, tetapi arus listrik total yang dihasilkan adalah sama dengan masing arus setiap modul . Jika daya masing-masing modul adalah 100 W_p, maka daya totalnya adalah 400 W_p. Tetapi jika dari empat modul tersebut ada salah satu saja yang besarnya 95 W_p, maka daya totalnya menjadi $4 \times 95 \text{ W}_p = 380 \text{ W}_p$.

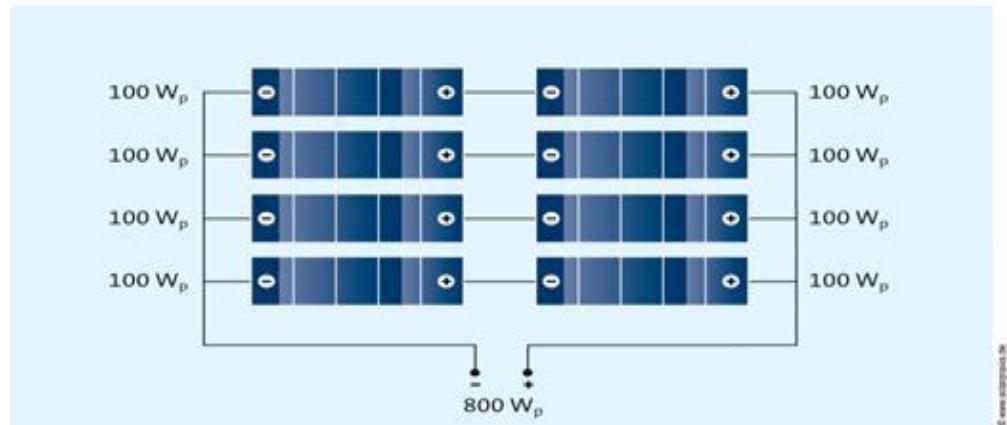


Gambar 2.28 Konfigurasi Hubungan Seri Modul Surya

c) Hubungan Seri-Paralel Modul Surya

Untuk mencapai daya sistem-sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya yang diinginkan, maka perlu untuk menggabungkan sejumlah modul surya secara seri maupun parallel seperti terlihat pada gambar 2.29.

Pada gambar terlihat bahwa *array* atau rangkaian modul surya untuk mencatu daya sistem terdiri dari 2 buah modul surya yang dihubungkan secara seri dan 4 buah modul surya yang dihubungkan secara paralel. Tegangan kerja sistem tersebut adalah 12 Volt dan daya listrik masing-masing modul adalah sebesar 100 W_p, sehingga daya total adalah 800 W_p, dengan tegangan 24 Volts.



Gambar 2.29 Konfigurasi Hubungan Seri-Paralel Modul Surya

2.2.9 Struktur Penyangga

Fungsi utama struktur penyangga adalah untuk memegang modul-modul pada posisi yang diinginkan tanpa menimbulkan tegangan yang tak semestinya. Struktur juga sebagai saluran kabel kelistrikan dan berdiri bebas. Struktur penyangga adalah kerangka metal, dengan aman ditegakkan ditanah, harus cukup mampu menahan tekanan lingkungan seperti beban angin di lokasinya. Seperti halnya persoalan mekanikal, penyangga (*mounting*) berpengaruh pada temperatur operasi sistem, tergantung pada seberapa mudah panas dihilangkan oleh modul.



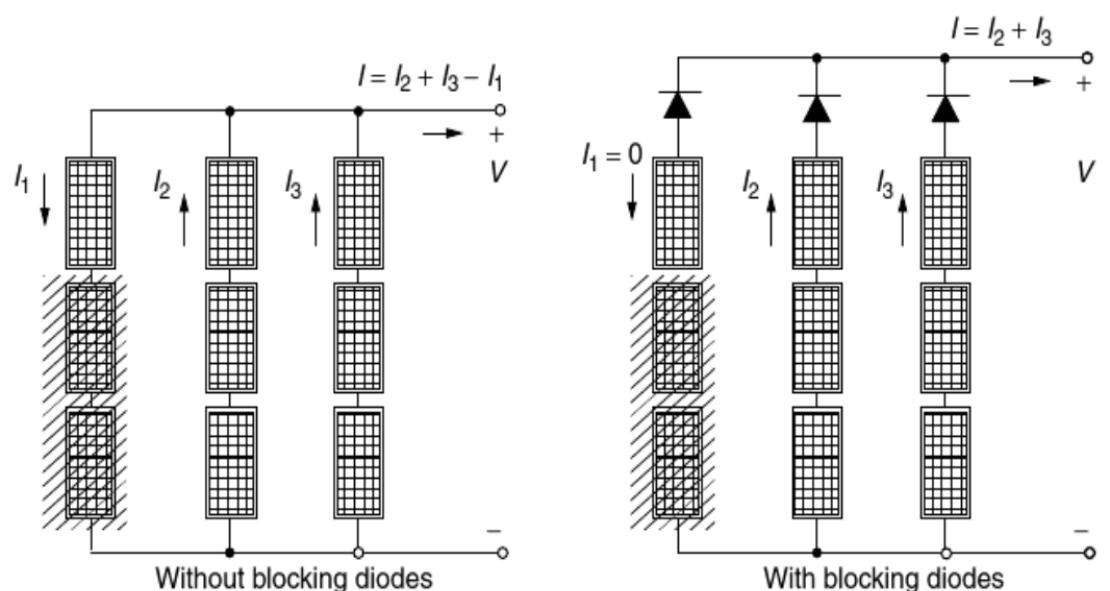
Gambar 2.30 Penyangga Modul Surya Pembangkit Listrik Tenaga Surya 400 kWp Gili Trawangan

2.2.10 Proteksi Modul Surya

Adapun proteksi modul surya yaitu sebagai berikut :

- Dioda *Blocking*

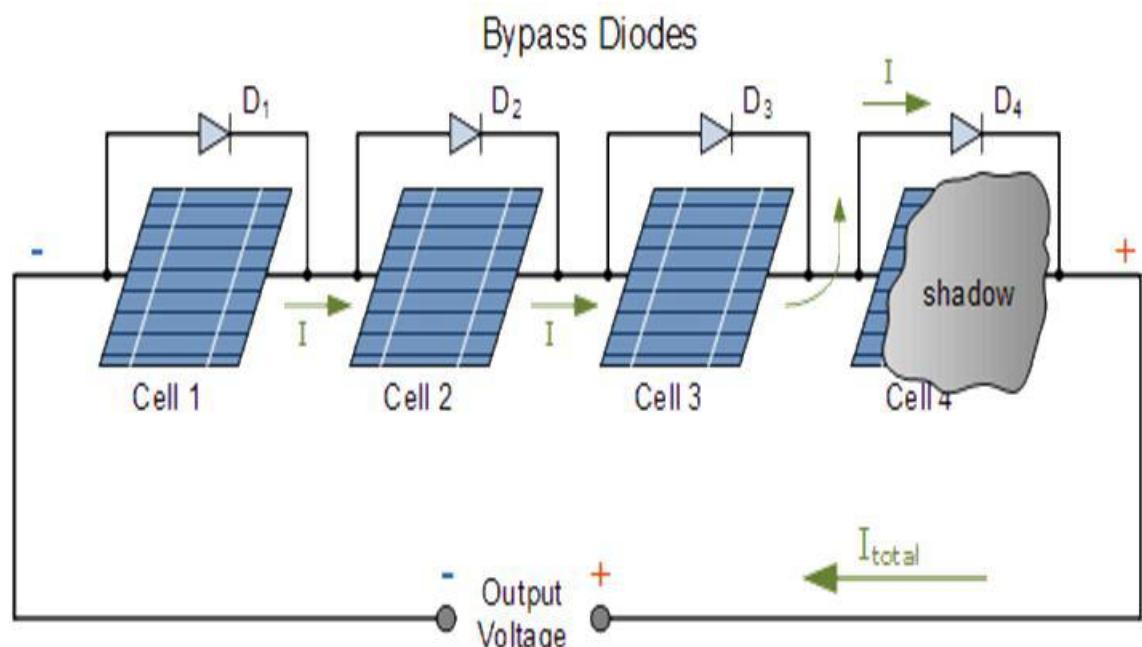
Dioda *blocking* digunakan untuk mencegah arus mengalir kembali ke paralel seri *string* atau *array* yang tidak terpapar sinar matahari sehingga perlakunya sebagai beban, *discharge* seluruh energi yang dihasilkan oleh seri *string* lainnya dan atau energi yang tersimpan pada baterai pada malam hari.



Gambar 2.31 Prinsip Kerja Dioda *Blocking*

➤ Dioda Bypass

- a. Dioda yang dipergunakan sebagai bypass dipasang diantara string yang terpasang secara seri.
- b. Tahanan yang ada pada dioda akan menjadi lebih besar dibandingkan dengan sel surya (atau modul surya) jika terpapar sinar matahari sehingga arus mengikuti alur dari yang terendah resistansinya setiap urutan sel surya (atau modul surya) pada string.
- c. Saat sel atau modul surya yang terhubung seri pada string terhalang paparan sinar matahari (menjadi beban) tahanan pada sel akan meningkat secara drastis membuat dioda bypass memiliki tahanan yang rendah, dengan demikian arus mengalir dari yang beresistansi rendah melalui shunt dioda bypass dan sirkuit alternatif disekitar sel modul surya ke sel modul surya atau modul surya yang menghasilkan daya pada string. Kehilangan tegangan hanya terjadi pada sel yang tidak aktif.



Gambar 2.32 Prinsip Kerja Dioda Bypass

2.2.11 Problematika Dilapangan Pada Peralatan Modul Surya

Sebuah faktor penting dalam mengurangi biaya sistem modul surya adalah dengan meningkatkan keandalan dan masa pemakaian dari peralatan modul surya. Peralatan modul surya mengalami tekanan-tekanan yang berat dalam keadaan lingkungan dengan suhu dan kelembaban yang bervariasi. Apalagi peralatan juga harus bertahan selama 25 tahun dalam kondisi demikian dengan presentase penurunan daya maksimum sebesar 20%, yang mana merupakan pemenuhan syarat untuk sebagian besar penerapan. Hal ini menjadi perlu untuk diperhatikan bagi para pabrikan agar tidak sekedar mengambil seluruh tindakan pencegahan dan perawatan sekaligus, tetapi juga memahami berbagai kekurangan dalam peralatan sebelum memastikan keandalan jangka panjang dan proses perbaikan yang berkelanjutan. Berdasarkan *International Energy Agency*, permasalahan dalam peralatan modul surya dapat dikelompokkan sebagai kegagalan awal (*early failure*), kegagalan pertengahan (*midlife failure*), dan kegagalan total (*wear out failure*), yang mana setiap kategori memiliki jenis kegagalannya masing-masing seperti dijelaskan di bawah ini :

1. Kegagalan Awal (*Early Failure*)

Kegagalan-kegagalan seperti ini terjadi pada permulaan semasa operasi dari suatu peralatan modul surya. Berbagai macam permasalahan seperti kegagalan kontak, pemutusan kawat, kerusakan kaca, rangka yang longgar, kegagalan kotak hubung, dan lainnya dikelompokkan ke dalam jenis kegagalan ini.

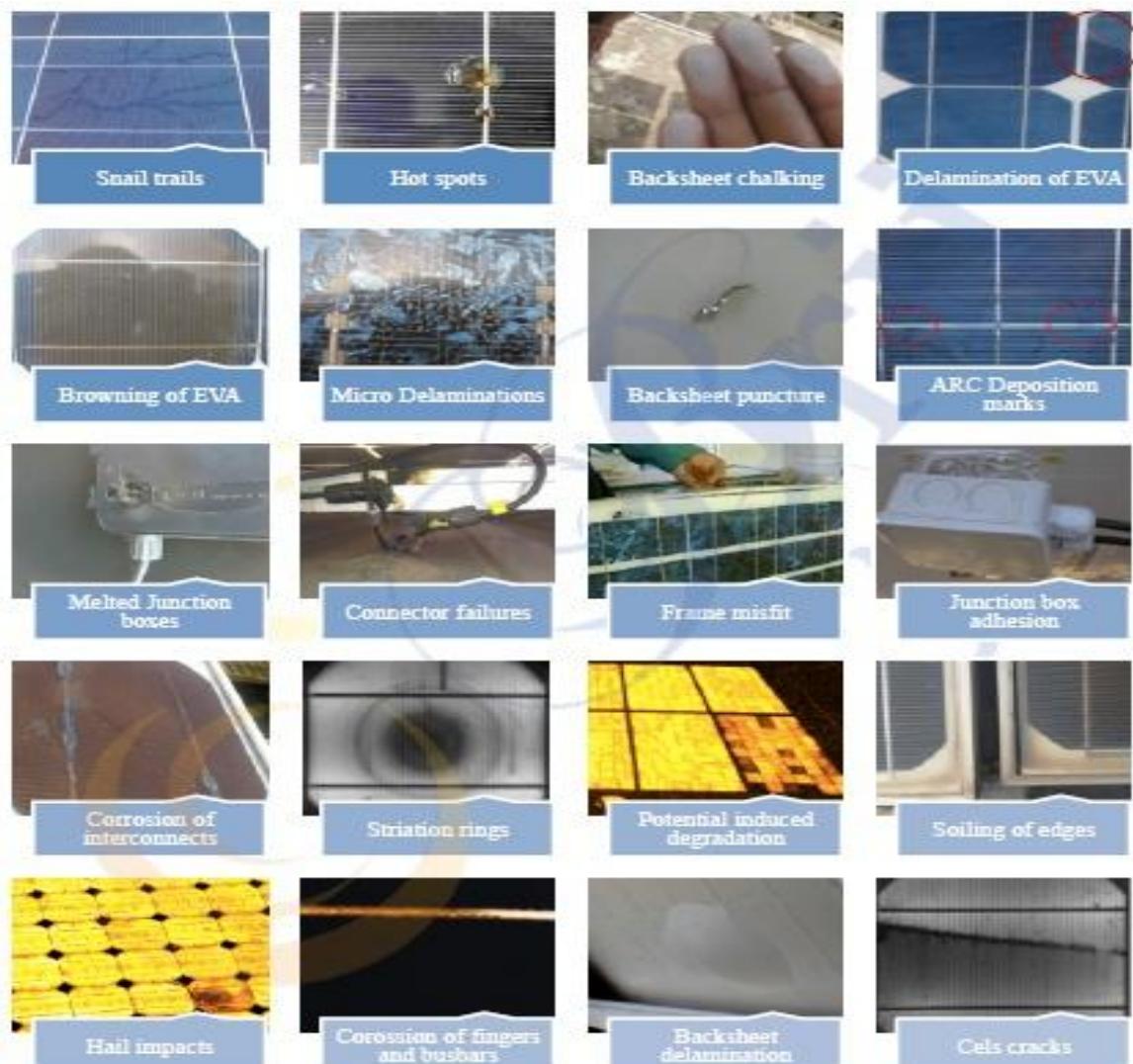
2. Kegagalan Pertengahan (*Midlife Failure*)

Kegagalan-kegagalan yang terjadi setelah 10 – 15 tahun masa operasi disebut kegagalan pertengahan (*midlife failure*). Berbagai permasalahan seperti penurunan tegangan induksi, kegagalan dioda, kerusakan interkoneksi sel, kerusakan kaca, perubahan warna EVA, berkurangnya ikatan antar lapisan, sel yang retak, jalur siput, dan lainnya muncul dari jenis kegagalan ini.

3. Kegagalan Total (*Wear Out Failure*)

Permasalahan seperti korosi cell dan interkoneksi, lambatnya pemanasan dalam masa pemakaian peralatan muncul dari jenis kegagalan ini.

Lebih lanjutnya, jenis-jenis kegagalan dan penurunan juga dapat diwakilkan baik sebagai penuruanan bahan kemasan maupun penurunan alat semikonduktor, dengan lebih dahulu mengatasi segala penurunan dalam keseimbangan komponen peralatan dan kemudian mengatasi sel suryanya saja.



Gambar 2.33 Kerusakan Modul Surya

➤ PENURUNAN BAHAN KEMASAN

Ketika berbicara menganai penurunan bahan kemasan, dapat dijelaskan seperti dibawah ini :

a. Penurunan lapisan pelindung (*Enkapsulan*)

Pencahayaan ekstensif dari peralatan modul surya terhadap matahari mengakibatkan penurunan lapisan pelindung, yaitu penurunan EVA, atas pencahayaan terhadap sinar UV dan suhu tinggi. Hal ini tidak hanya menyebabkan perubahan warna, tetapi juga menghasilkan aldehida dan asam asetat yang nantinya dapat mengorosi lapisan logam pada sel surya dan hubungan pita.



Gambar 2.34 *Encapsulan*

b. Kegagalan kotak hubung atau dioda

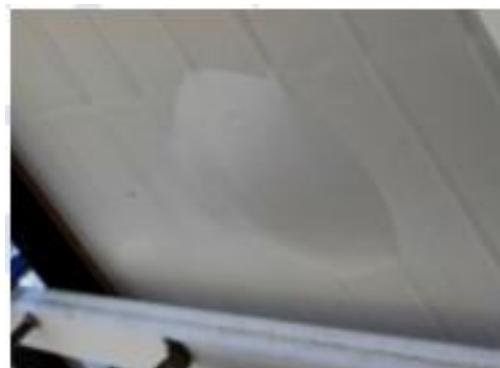
Kotak hubung yang merumahkan terminal keluaran dan *diode bypass* suatu peralatan modul surya akan memproteksinya dari masuknya air dan debu. Jika rangka dari kotak hubung berada di bawah standar atau penyegelannya tidak sesuai, air hujan dapat menjangkau terminal dan mengorosinya, kemudian menuntun kepada resistansi seri yang lebih tinggi, dan akhirnya menurunkan daya yang dihasilkan, serta menimbulkan busur api.



Gambar 2.35 Kegagalan Kotak Hubung Atau Dioda

c. Penurunan lapisan pelindung belakang (*Backsheet*)

Lapisan pelindung belakang merupakan garis pertahanan awal peralatan modul surya dari sisi belakang. Selain dari segala dampak fisik, penurunan lapisan belakang umumnya disebabkan oleh pencahayaan sinar UV secara langsung dengan intensitas tinggi pada bagian muka panel, serta sinar UV yang ditransmisikan dan dibelokkan pada bagian belakang yang menyebabkan retakan, penguningan, delaminasi (berkurangnya ikatan antar lapisan), pengapuran, dan terbentuknya gelembung. Delaminasi pada bagian ujung mungkin menyediakan suatu jalur bagi air yang langsung memasuki peralatan. Begitu pula daerah delaminasi beroperasi sedikit lebih panas karena panas tidak mengalir keluar melalui bagian belakang dengan sesuai.



Gambar 2.36 Penurunan Lapisan Pelindung Belakang (*Backsheet*)

d. Rugi adhesi

Sel surya pada peralatan modul surya dilapisi dengan *enkapsulan* untuk menyediakan perlindungan terhadap lingkungan. *Etilen Vinil Asetat* (EVA) biasanya digunakan dan juga bertindak sebagai perekat antara *enkapsulan* dan *backsheets*. Rusaknya ikatan antara enkapsulan dan backsheet merupakan contoh dari rugi adhesi atau delaminasi.



Gambar 2.37 Rugi Adhesi

e. Intrusi kelembaman

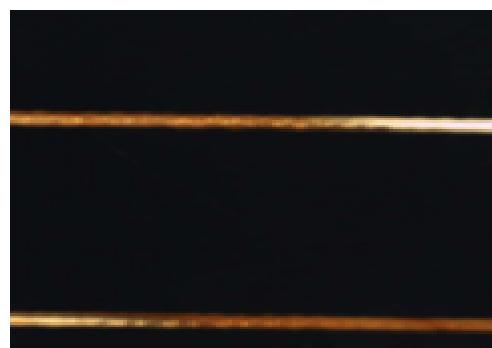
Kelembaman dapat masuk ke dalam peralatan modul surya melalui ujung-ujung lapisan atau backsheets sehingga menghasilkan korosi dan meningkatkan arus bocor. Korosi mengakibatkan kegagalan kontak antara *grid line* dan sel sehingga menyebabkan rugi kelistrikan. Kehadiran kelembaman dalam peralatan juga dapat meningkatkan penurunan performa. Hal tersebut juga dapat menurunkan kekuatan rekatan antar berbagai lapisan komponen.



Gambar 2.38 Instruksi Kelembaman

f. Korosi interkoneksi

Perubahan pada rangka atau geometri sambungan solder yang disebabkan oleh pemisahan logam (SbPb) dalam paduan solder mengakibatkan penurunan interkoneksi. Perubahan struktur demikian halnya dalam bahan solder terjadi disebabkan oleh kelelahan mekanis termal yang mengakibatkan bertambahnya resistansi seri dan berkurangnya resistansi. Selain bertambahnya resistansi seri, panas berlebih peralatan modul surya, bangkitnya daerah terbakar (*hot spots*), busur api pada sambungan solder, dan terbakarnya *backsheets* merupakan contoh dari penurunan interkoneksi.



Gambar 2.39 Penurunan Interkoneksi

g. Penurunan panas

Suhu yang sangat tinggi dan medan listrik yang dialami oleh sel surya dalam peralatan modul surya mengakibatkan perpindahan ion karena cacat terus terjadi. Munculnya cacat ini di dalam rangka sel surya mempengaruhi karakteristik kelistrikan dari sel. Penurunan suhu kebanyakan mengakibatkan bertambahnya resistansi seri atau berkurangnya resistansi paralel dan juga menuntun kepada penurunan kualitas pelapisan anti refleksi.

h. Arus bocor yang bertambah

Arus bocor disebabkan oleh interkoneksi atau masuknya kelembaman dapat menuntun kepada masalah keamanan tegangan tinggi, oleh karenanya menyebabkan bahaya keamanan.

i. Penurunan performa

Berdasarkan pada delaminasi atau penguningan, terjadinya bahwa cahaya matahari tidak dapat meraih sel, mengakibatkan penurunan performa. Selain itu, cacat-cacat ini juga memengaruhi disipasi (kehilangan) panas yang mengakibatkan suhu operasi sel yang lebih tinggi lagi untuk mengarah kepada kerusakan lebih jauh.

➤ PENURUNAN ALAT SEMIKONDUKTOR

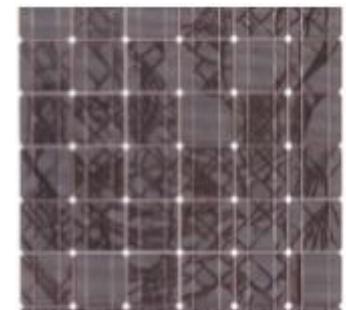
a. Daerah terbakar

Daerah terbakar terjadi dalam peralatan ketika arus operasinya melebihi arus hubung singkat dari sel gelap atau sekelompok sel diantaranya. Penyebab kemungkinan terbentuknya daerah terbakar adalah pencahayaan tidak seragam, penurunan sel pribadi karena retakan, atau rugi sebagian rangkaian seri paralel karena interkoneksi rangkaian terbuka. Hal ini juga dapat disebabkan oleh cacat sambungan $p-n$ dan penanganan yang tidak tepat.



b. Jejak siput

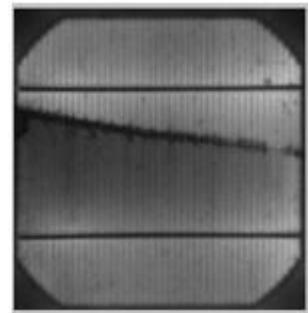
Suatu jejak siput adalah perubahan warna menjadi hitam atau abu-abu dari awalnya perak hasil dari pelapisan logam pada layar depan sel surya. Pada peralatan modul surya, hasilnya terlihat seperti jalur siput. Perubahan warna terjadi pada ujung sel surya dan biasanya di sepanjang retakan



sel yang tidak kasat mata. Perubahan warna umumnya terjadi 3 bulan hingga 1 tahun pasca pemasangan peralatan modul surya dan terjadinya disebabkan oleh masuknya kelembaman melalui retakan kecil yang mengarah pada perubahan posisi perak dari busbar ke dalam EVA.

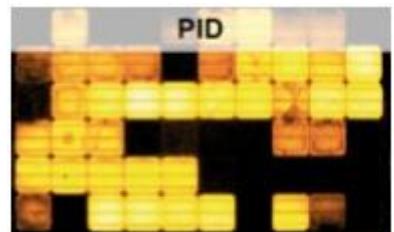
c. Sel yang pecah

Irisan wafer, produksi sel, senar, dan proses tertanam lainnya selama produksi sel surya dan peralatan dapat menyebabkan retakan sel yang pada pencahayaan lebih lanjut dapat menuntun pada menurunnya hasil keluaran peralatan dan membentuk daerah terbakar yang tidak diinginkan. Sekali saja retakan sel muncul dalam peralatan modul surya, terdapat peningkatan resiko yang mana selama beroperasi dapat berkembang menjadi retakan yang lebih panjang dan lebih luas, yang menyebabkan masalah keamanan dan performa.



d. Penurunan tegangan induksi

Penurunan tegangan induksi merupakan suatu karakteristik yang tidak diinginkan dari peralatan modul surya, yang terjadinya ketika tegangan peralatan dan arus bocor mengerakkan ion di antara bahan semikonduktor dan elemen lain peralatan (contoh kaca dan bingkai) sehingga menyebabkan kapasitas daya keluaran menurun. Penurunan tegangan induksi merupakan pengaruh dari tekanan tegangan tinggi pada kestabilan jangka panjang panel surya.



e. Penggoresan cincin

Penggoresan merupakan tidak homogennya pertambahan induksi yang menghambat penerapan kristal solid dalam penerapan modul surya. Hal ini yang disebabkan oleh ketidak-stabilan konvektif selama pertumbuhan kristal, tetapi merupakan hal yang tidak diinginkan untuk memengaruhi operasi lapangan.

f. Penurunan cahaya induksi

Penurunan cahaya induksi terjadi dalam sel silikon krisal dalam beberapa jam awal dari pencahayaan dan mengurangi arus hubung singkat sebesar 1 – 5%. Pengaruh penurunan cahaya induksi telah dikaitkan dengan cacat oksigen boron dalam lapisan tipe-P yang didoping boron, yang dibuat oleh proses *Czochralski* (CZ). Bagaimanapun, hal ini juga tidak dilihat sebagai permasalahan sebagian besar di lapangan dalam sel kristal surya dan peralatan. Daftar permasalahan lapangan tidak pernah berakhir, tetapi hal tersebut penting bagi para pabrikan komponen dan peralatan untuk memahami dan mengetahui hal-hal yang penting dalam perbaikan produk yang berkelanjutan. Dengan lebih dari 25 tahun pengalaman memproses EVA dan komunikasi yang terjaga terhadap organisasi riset di seluruh dunia, tim R&D di *Brij* menganalisa berbagai macam permasalahan dan memastikan bahwa *Brij* EVA melapisi setiap meter persegi peralatan modul surya untuk seumur hidup.

2.2.12 Faktor Yang Mempengaruhi Energi Listrik Yang Dihasilkan Oleh Modul Surya

1. Tingkat radiasi matahari (*solar irradiance*).

Lamanya peninjauan sangat tergantung pada orientasi permukaan modul surya terhadap matahari serta penggunaan sistem *tracking* pada penyangga modul surya. Tingkat radiasi matahari juga tergantung dari

lokasi atau keberadaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya dan besarnya sudut kemiringan modul surya yang dipasang (jika tidak menggunakan sistem *tracking*).

2. Kapasitas *output* modul surya pada kondisi STC (*Standar Test Conditions*).

Hasil analisa dari beberapa teknologi modul surya menunjukkan pada kebanyakan modul surya dengan kapasitas yang sama memiliki beda toleransi kapasitas tidak lebih dari 5%.

3. Temperatur operasi.

Temperatur operasi mempengaruhi jumlah produksi energi listrik dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya menjadi turun sekitar 2% - 10%. Hal ini tergantung dari desain modul surya, kecepatan angin, cara pemasangan dan temperatur udara sekitar.

4. Besarnya tegangan pada daya maksimum.

Modul surya yang berbahan dasar silikon memiliki kecendrungan nilai tegangan pada daya maksimum yang lebih tinggi pada tingkat radiasi matahari yang rendah.

5. Kondisi tanah atau lahan di lokasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya.

Kondisi tanah atau lahan di tempat Pembangkit Listrik Tenaga Surya dapat menurunkan jumlah produksi energi sampai dengan 10% dari total produksi.

6. Variasi pada spektrum sinar matahari.

Modul surya dengan teknologi *Amorphous Silicon* adalah yang paling sensitif terhadap variasi waktu atau jam penyinaran matahari, tetapi hasil penelitian pada umumnya menunjukkan tingkat penurunan produksi hanya dibawah 3%.

2.2.13 Klasifikasi Modul Surya

1. Menurut tingkat keandalan dan umur, modul surya diklasifikasikan sebagai berikut :
 - Modul tipe I, yaitu suatu modul surya untuk penggunaan yang tidak mensyaratkan keandalan tinggi atau umur yang panjang.
 - Modul tipe II, yaitu suatu modul surya untuk penggunaan yang mensyaratkan keandalan tinggi dan umur yang panjang.
2. Menurut besarnya tegangan sistem, modul surya terbagi atas :
 - Modul kelas A, yaitu modul yang dirancang dan dirakit sehingga memenuhi syarat untuk digunakan pada sistem dengan tegangan tidak lebih dari 50 Volt.
 - Modul kelas B, yaitu modul yang dirancang dan dirakit sehingga memenuhi syarat untuk digunakan pada sistem dengan tegangan di atas 50 Volt sampai 100 Volt.

2.2.14 Syarat Konstruksi/Mekanik Modul Surya Menurut Standar SNI 04-3850.1 – 1995.

1. Modul surya harus terbuat dari bahan dan komponen yang tidak akan rusak bila bila ditempatkan pada udara terbuka selama 5 tahun (untuk tipe I) dan 15 tahun (untuk tipe II) pada berbagai keadaan cuaca di Indonesia, dan memberikan perlindungan terhadap gangguan mekanik dan pengaruh lingkungan dari komponen-komponen yang terbungkus. Bahan yang digunakan pada bagian luar modul harus tahan atau dapat mencegah serangan burung dan binatang lainnya.
2. Permukaan pelindung yang disinari tidak boleh mengikat debu atau kotoran lainnya. Bahan yang digunakan untuk permukaan pelindung ini harus dapat memperkecil pengumpulan kotoran dan dapat dibersihkan secara alami oleh angin atau hujan.
3. Bahan untuk rangka modul surya, tempat penyambungan antar modul dan terminal listriknya, tidak diperkenankan dari bahan yang

mudah/cenderung untuk “*premature ageing*”, korosi dan luntur. Juga harus diperhatikan agar bahan dari “*sealing*” tidak mengotori, melunturi atau menutupi bagian permukaan yang disinari.

4. Modul surya, bila dipasang sesuai dengan petunjuk pabrik pembuat, harus tahan terhadap tekanan angin tetap dengan kecepatan sampai 200 km/jam dan tahan terhadap kondisi hembusan angin ribut berkecepatan sampai dengan 160 km/jam.
5. Pelindung harus tahan terhadap semburan air garam, hujan lebat, gumpalan salju dan hujan es tanpa mengurangi untuk kerja sifat listriknya.
6. Modul harus dirakit dengan cara yang dapat memperkecil pengaruh negatif perbedaan permukaan pada seluruh bagian.
7. Modul harus dirakit sehingga dapat memperkecil kenaikan suhu dari sel dan bahan pelindungnya.
8. Bila menggunakan dioda pengaman yang dipasang pada tempat penyambungan antar modul, maka pemasangannya harus sedemikian rupa sehingga mudah diganti dan juga dilengkapi terminal untuk hubungan ke luar.
9. Terminal sambungan luar atau ujung sambungan listrik harus dibuat dari bahan konduktor yang tahan cuaca dan bagian yang berhubungan dengan terminal modul fotovoltaik harus kedap udara.
10. Rangka/bingkai modul harus di anodise bila menggunakan logam aluminium dan harus digalvanize bila menggunakan besi, masing-masing dengan ketebalan 400 g/m².
11. Semua modul dengan model/tipe yang sama dan dari pabrik yang sama harus dapat saling dipertukarkan baik secara fisik maupun fungsinya.

2.3 Kerangka Pemikiran

