



Transformasi Teknologi dalam Sel Surya Film Tipis Generasi Kedua

Shakila Anandia Putri¹, Arini Dini Farhani¹, Alena Shania Anjani¹, Albert Daniel Saragih³, Putri Nuri Nilam Sari¹, Noto Susanto Gultom^{1,2*}

¹Department of Physics, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Universitas Padjadara, Jalan Raya Bandung-Sumedang 11 45363, Indonesia

²Functional Nano Powder, University Center of Excellence, Universitas Padjadjaran, Jalan Raya Bandung-Sumedang KM 21, Jatinangor, Sumedang 45363, Indonesia

³Department of Mechanical Engineering, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia
Corresponding author: noto.susanto.gultom@mail.unpad.ac.id*

Abstract

Efficiency and cost are important points in the development of the renewable energy industry, especially solar cells. While the first generation of crystalline silicon-based solar cells had the biggest constraint in cost, the second generation of thin-film solar cells is trying to offer innovations with relatively lower cost but high flexibility compared to the first generation. This article explores the essential developments in the invention of second-generation thin-film solar cells, including materials, performance, and technology. Through their respective fabrication processes, ultra-thin-film solar cells based on various materials such as amorphous silicon, Cadmium Telluride/Cadmium Sulfide (CdTe/CdS), and Copper Indium Gallium Selenide/Copper Zinc Tin Sulfide (CIGS/CZTS) were discovered. With these types of thin-film cells as well, the use of solar cells is more flexible for various applications mainly due to their lighter weight. Although the efficiency of their photovoltaic effect or light-to-electricity conversion is generally lower than that of crystalline silicon solar cells, these thin-film solar cells are efficient in absorbing light in dimmer conditions.

Keywords: Amorphous Silicon, CdTe, CdS, CIGS, CZTS Second Generation Solar Cells

Abstrak

Efisiensi dan biaya menjadi poin penting dalam perkembangan industri energi terbarukan, khususnya sel surya. Apabila generasi pertama yang berbasis silikon kristal memiliki kendala terbesar di biayanya, maka generasi kedua sel surya yang berbasis film tipis mencoba menawarkan inovasi dengan biaya yang relatif lebih rendah namun fleksibilitas tinggi dibandingkan generasi pertama. Artikel ini mengeksplorasi perkembangan esensial dalam penemuan sel surya film tipis generasi kedua, termasuk material, kinerja, dan teknologi. Melalui proses fabrikasinya masing-masing, ditemukan sel surya dengan lapisan sangat tipis berbasiskan berbagai bahan seperti silikon amorf, Cadmium Telluride / Cadmium Sulfide (CdTe/CdS), dan Copper Indium Gallium Selenide / Copper Zinc Tin Sulfide (CIGS/CZTS). Dengan jenis sel film tipis ini juga, penggunaan sel surya lebih fleksibel untuk berbagai aplikasi terutama karena beratnya yang lebih ringan. Meskipun efisiensi efek fotovoltaik atau konversi cahaya menjadi listrik mereka umumnya lebih rendah daripada sel surya kristal silikon, sel surya film tipis ini efisien dalam menyerap cahaya di kondisi yang lebih redup.

Kata kunci: Silikon Amorf, CdTe, CdS, CIGS, CZTS Sel Surya Generasi Kedua.

1. Pendahuluan

Sel surya telah menjadi salah satu inovasi terobosan dalam industri energi terbarukan. Dalam upaya mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, sel surya telah menjadi solusi yang menjanjikan dengan kemampuannya untuk

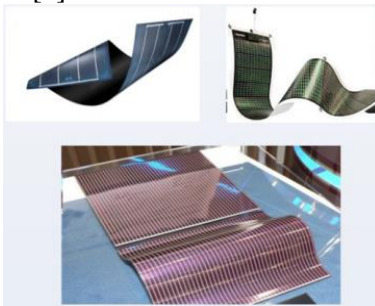
mengubah energi matahari menjadi energi listrik. Namun, sel surya harus dapat diandalkan dan hemat biaya untuk bersaing dengan sumber energi konvensional. Silikon kristal (c-Si) telah lama menjadi pilihan yang populer di pasaran karena beberapa keunggulannya. Salah satu keunggulan utamanya adalah kinerja yang tinggi, dengan

efisiensi mencapai sekitar 26,7%. Selain itu, c-Si juga tergolong mudah untuk diproduksi dan bersifat ramah lingkungan [1]. Keuntungan lain c-Si adalah umur pakainya panjang.

Ironisnya, c-Si memiliki kelemahan sebagai penyerap cahaya yang kurang efisien, biaya fabrikasi yang mahal dan tidak fleksibel serta rentan terhadap kerusakan ketika berada dalam struktur amorf yang tidak teratur. Dan untuk mengatasi kekurangan sel surya generasi c-Si ini dikembangkanlah sel surya film tipis yang memiliki biaya fabrikasi yang lebih rendah serta lebih fleksibel, sehingga memungkinkan penggunaan yang lebih luas dan integrasi yang lebih mudah dengan berbagai aplikasi.

Kemunculan sel surya generasi kedua dengan teknologi film tipis merupakan hasil dari desakan kebutuhan yang dilakukan untuk mengoptimalkan manfaat dari teknologi fotovoltaik yang diharapkan bisa memiliki bahan yang alami, tidak beracun, dan stabil terhadap lingkungan [2]. Selain itu, faktor biaya produksi juga diperhatikan mengingat produksi sel surya generasi pertama membutuhkan modal yang sangat tinggi.

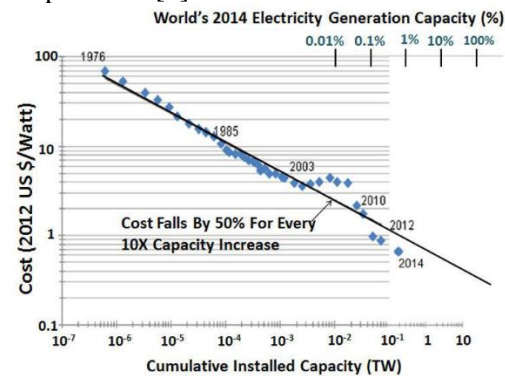
Gambar 1 menunjukkan sel surya generasi kedua dengan fleksibilitas yang lebih unggul jika dibandingkan dengan generasi pertama yang masih rigid. Produksi sel-sel untuk generasi kedua pun memakan biaya yang lebih rendah karena hanya memerlukan sedikit bahan dan pembuatannya sederhana [3].



Gambar 1. Sel surya generasi kedua [4]

Biaya produksi sel surya generasi kedua yang rendah ini dapat menguasai pasar dengan didukung oleh Swanson's Law. Swanson's Law atau Hukum Swanson adalah sebuah observasi yang menyatakan bahwa harga modul fotovoltaik (PV) menurun dengan kecepatan tetap seiring dengan peningkatan kapasitas kumulatif produksi [5]. Ini digambarkan sebagai plot kurva antara kinerja biaya produksi sel surya (d disesuaikan dengan inflasi) dengan kapasitas terpasang kumulatif pada 40 tahun terakhir seperti yang divisualisasikan pada Gambar 2. Kurva ini digunakan oleh Richard

Swanson pada tahun 2006 untuk memperkirakan bahwa biaya produksi sel surya akan cukup jauh turun di bawah \$1/W untuk dapat bersaing dengan gas alam dan batu bara dalam pembangkitan listrik untuk jaringan listrik, dan keseimbangan akan tercapai pada tahun 2012 [6], [7]. Penurunan harga ini disebabkan oleh beberapa faktor, termasuk peningkatan efisiensi dalam proses produksi, inovasi teknologi, dan ekonomi skala. Semakin besar volume produksi, semakin rendah biaya per unit karena distribusi biaya tetap dan peningkatan proses produksi [5].



Gambar 2. Kurva Swanson's Law [5]

Swanson's Law yang dapat memprediksi turunnya biaya sel surya sebanyak 20% ini hampir sama dengan Hukum Moore yang sama-sama memprediksi penurunan biaya namun pada perangkat transistor. Penurunan biaya sel surya seiring dengan meningkatnya manufaktur sel surya sebanyak dua kali lipat secara global ini mampu mendorong penggunaan energi terbarukan. Meskipun pada saat ini mayoritas energi fosil yang digunakan, tidak menutup kemungkinan energi terbarukan khususnya sel surya akan mengambil alih pasar sesuai prediksi dari Swanson's Law. [8]

Sel surya generasi kedua ini tersusun dari lapisan sangat tipis yang berasal dari bahan semikonduktor seperti silikon amorf, kadmium, tellurium, indium, dan gallium. Dibandingkan silikon murni, bahan-bahan tersebut harganya jauh lebih murah untuk tahap produksi. Tentu saja bahan memiliki pengaruh penting dalam kinerja sel surya. Disamping harga yang lebih murah, tingkat efisiensi sel surya film tipis justru lebih rendah daripada generasi sebelumnya. Namun, hal tersebut tidak membuat eksistensi sel surya film tipis jatuh karena masih ada keunggulan yang ditonjolkan. Tingkat ketebalan sel surya film tipis sangat rendah sekitar satuan nanometer sampai puluhan mikrometer saja. Hal inilah yang membuat sel surya film tipis sangat ringan dan fleksibel. Selain itu, hambatan yang dimiliki sel surya film tipis juga

lebih rendah jika dibandingkan dengan sel surya generasi pertama [4], [9]. Pada review artikel ini, akan dibahas mengenai proses fabrikasi, struktur, efisiensi, celah pita, masa pakai, kelebihan dan kekurangan, serta aplikasi dari masing - masing jenis sel surya yang termasuk ke dalam sel surya generasi kedua.

Tabel 1. Komparasi jenis solar sel generasi ke-2

Komponen Perbandingan	a-Si	CdTe/ Cds	CIGS	CZTS	Ref.
Koef. Absorpsi	1,7442 ×10 ⁶ cm ⁻¹	>5 × 10 ⁵ /cm	> 10 ⁵ cm ⁻¹	> 10 ⁴ cm ⁻¹	[1], [10]
Efisiensi Konversi (%)	14,0	22,1	23,4	12,6	[11], [12], [13], [14]
Band gap (eV)	1,6 - 1,8 (langsung)	1,45 (langsung)	1,06 – 1,7 (langsung)	1,5 (tidak langsung)	[15] [16]
Ketebalan Lapisan	1 μm	4 - 6 μm	1,5 - 2 μm	0,9 μm	[17], [18]
Koef. suhu (%/°C)	-0,1 - -0,2	-0,24	-0,36	0,17 %/K	[10], [19]
Material berbahaya	Tidak ada	Cadmium	Tidak ada	Tidak ada	[1]
Kestabilan	Kurang stabil	Sangat stabil	Stabil	Stabil	[17], [20]
Biaya minimum bahan baku	Mahal	Sangat mahal	Murah	Sangat Murah	[21]
Pemintan	71%	14%	9%	6%	[21]
Ketersediaan Bahan Baku	Sangat Banyak	Sedikit	Banyak	Banyak	[21]

2. Metode Penelitian

Pada penelitian ini penulis menggunakan metode studi literatur. Studi literatur merupakan metode pengumpulan data dan informasi dari berbagai sumber tertulis seperti jurnal empiris, jurnal review dan buku yang relevan dengan topik pembahasan. Pendekatan ini dilakukan dengan cara menelusuri,

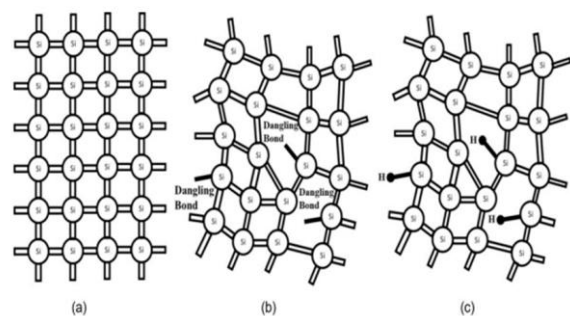
membaca dan mengidentifikasi serta mengkompilasi seluruh pembahasan yang berkaitan dengan transformasi sel surya film tipis generasi kedua mulai dari proses fabrikasi, struktur hingga kelebihan dan kekurangan dari masing-masing teknologi transformasi.

3. Sel Surya Generasi Kedua

3.1 Sel Surya Amorphous Silicon (a-Si)

Basis solar sel thin film yang paling umum adalah solar sel yang terbuat dari silikon amorf. Gambar 3b menunjukkan struktur amorphous silicon (a-Si) yang merupakan bahan non-kristalin dengan kapasitas absorpsi yang tinggi. Karena amorphous silicon dikategorikan sebagai sel surya generasi kedua, ukurannya jelas lebih tipis dibandingkan dengan silikon kristal generasi pertama yang di representasikan oleh Gambar 3a . Jika ketebalan penyerap cahaya pada sel surya generasi pertama adalah 200-300 μm, maka pada generasi kedua ini telah berkurang menjadi 10 μm [22].

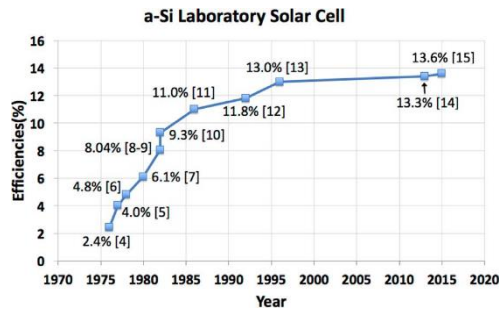
α-Si bersifat direct band gap, yang memungkinkan penyerapan sebagian besar sinar matahari dalam lapisan tipis berukuran mikrometer [23]. Namun, karena bersifat amorf, diperlukan penambahan hidrogen agar dapat berfungsi sebagai semikonduktor tipe-p dan tipe-n. Maka dari itu, terbentuklah silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) dengan struktur yang diilustrasikan pada gambar 3c, dimana setiap atom hidrogen terikat dengan cacat pada silikon amorf, sehingga memungkinkan bahan ini untuk didoping dan digunakan di berbagai aplikasi semikonduktor atau perangkat sambungan [24].



Gambar 3. Skema struktur silikon kristal (a), silikon amorf (b), dan silikon amorf terhidrogenasi (c) [24]

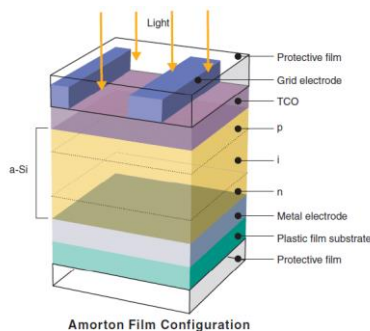
Efisiensi sel surya berbasis silikon amorf terus mengalami perkembangan dari segi efisiensi setiap tahunnya. Gambar 4 menunjukkan efisiensi sel surya berbasis silikon amorf yang pada awalnya sekitar 2-3% untuk single junction bahan ini

meningkat menjadi $\pm 13\%$ dengan penggunaan struktur ganda dan paduan silikon.



Gambar 4. Perkembangan efisiensi sel surya berbasis amorf silikon [1]

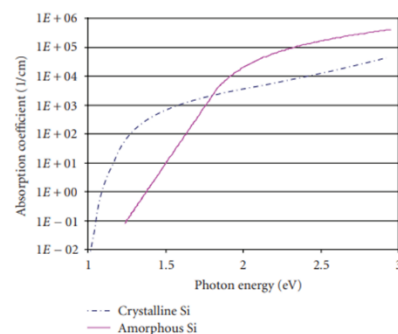
Kunci utamanya adalah pada tahap fabrikasi dengan mencari struktur dan nilai yang sesuai untuk material agar mencapai efisiensi yang tinggi [25]. Proses fabrikasi sel surya silikon amorf (a-Si) biasanya melibatkan proses yang bernama *Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD)*, atau teknik lainnya seperti sputtering atau *Hot-Wire Chemical Vapour Deposition (HW-CVD)*. Proses PECVD sering digunakan karena menggunakan campuran gas silan (SiH_4) dan hidrogen untuk mendepositkan lapisan yang sangat tipis pada substrat, seperti kaca, plastik, atau logam, yang telah dilapisi dengan lapisan oksida penghantar transparan. Pilihan teknik fabrikasi ini tergantung pada kasus dan syarat khusus sel surya yang akan dibuat.



Gambar 5. Struktur sel surya silikon amorf [26]

Gambar 5 menunjukkan struktur konfigurasi sel surya film tipis berbasis silikon amorf yang pada umumnya menggunakan struktur p-i-n (bisa juga n-i-p). Penempatan lapisan tipe-p di atas didorong oleh mobilitas hole yang lebih rendah, yang memungkinkan pergerakan hole yang lebih terkendali menuju kontak atas dalam jarak yang lebih dekat. Struktur panel yang sering digunakan mencakup kaca sebagai lapisan depan, lapisan konduktif transparan (TCO), lapisan film tipis

silikon, kontak belakang, laminasi polivinil butiral (PVB), dan kaca sebagai lapisan belakang [1]. Peningkatan efisiensi dan kinerja juga disebabkan oleh pengembangan sel dan modul multijunction, yang memiliki banyak band gap sehingga memungkinkan untuk merespons pada berbagai panjang gelombang. Tidak hanya itu, dicapai efisiensi yang lebih tinggi menggunakan pemisahan spektrum dengan triple junction [27]. Pada 2017, Rahmani dkk [28] mendemonstrasikan desain sel surya silikon amorf film tipis plasmonik, di mana logam nanopartikel logam dari berbagai bahan ditempatkan di dalam daerah deplesi persimpangan p-n. Nanopartikel logam ditempatkan 10 nm di bawah lapisan ITO tepat di bawah lapisan n+, di mana daerah penipisan dihasilkan. Hasilnya, nanopartikel perak mengalami peningkatan efisiensi sebesar 20,45%, nanopartikel emas mengalami peningkatan efisiensi sebesar 19,77% dan nanopartikel aluminium mengalami peningkatan efisiensi sebesar 15% dibandingkan dengan sel referensi. Ini membuktikan bahwa peningkatan efisiensi dari silikon amorf masih dapat dikembangkan dan dapat berpotensi menjadi basis utama dari solar sel. [28] Sel surya silikon amorf ini dapat menyerap spektrum cahaya dengan rentang panjang gelombang yang lebih lebar, bahkan sampai infrared dan sedikit ultraviolet, karena band gapnya yang mencapai 1,7 eV. Penyerapan secara efisien ini dikarenakan struktur internalnya yang tidak homogen dibandingkan silikon kristal sehingga berpengaruh pada hamburan cahaya internal. [24]



Gambar 6. Hubungan antara koefisien absorpsi dengan energi foton pada silikon kristal dan silikon amorf [29]

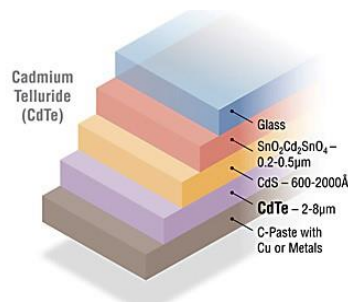
Dapat dilihat dari grafik pada Gambar 6, silikon amorf memiliki koefisien absorpsi yang lebih besar. Ini berarti penangkapan cahaya oleh sel surya akan lebih baik, bahkan dalam kondisi cahaya redup atau menyebar. Ini menjadi salah satu alasan keunggulan sel surya a-Si dibandingkan sel

surya c-Si untuk penggunaan di dalam ruangan [29].

Walaupun lebih tipis dan memiliki koefisien absorpsi yang lebih besar, sel surya berbasis silikon amorf menunjukkan kekurangannya dengan penurunan efisiensi yang signifikan setelah beberapa jam digunakan. Diketahui adanya efek Staebler-Wronski, yang merupakan perubahan konduktivitas yang diinduksi oleh cahaya berkepanjangan pada bahan terkait yang digunakan dalam sel. Meskipun efek dapat dihilangkan dalam beberapa menit pada suhu sekitar 160°C, ini tetap berpengaruh pada efisiensi modul. [30]

2.2 Sel Surya Cadmium Telluride / Cadmium Sulfide (CdTe/CdS)

Sel surya *Cadmium Telluride / Cadmium Sulfide* (CdTe/CdS) merupakan jenis sel surya teknologi film tipis generasi kedua yang paling terkenal, karena teknologi sel surya ini paling banyak digunakan dan menguasai sekitar 50% dari permintaan sel surya film tipis.[31] Sel surya CdS/CdTe juga memiliki band gap yang ideal sebagai sel surya, dengan penyerapan optik dan stabilitas kedua material yang baik. [32] Sebagaimana divisualisasikan pada Gambar 7, dalam struktur panel surya CdTe/CdS, CdTe berperan sebagai semikonduktor tipe-p atau lapisan yang berguna sebagai penyerap cahaya pada sel surya, dengan nilai densitas penerima (acceptor density) $7 \times 10^{16} - 7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, sedangkan CdS memiliki peran sebagai semikonduktor tipe-n atau sebagai lapisan yang membentuk p-n junction dalam sel surya dengan nilai densitas donor $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

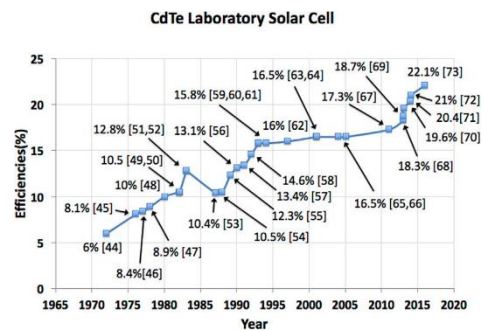


Gambar 7. Struktur sel surya CdTe [33]

Cadmium Telluride (CdTe) adalah senyawa dari golongan II-VI yang dapat digunakan sebagai bahan untuk sel surya film tipis [34]. CdTe memiliki energi gap sebesar 1,45 eV di suhu ruang [35] dan memiliki koefisien absorpsi sebesar $5 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ dalam rentang daerah cahaya tampak [36]. Karena CdTe memiliki koefisien absorpsi

yang terbilang besar membuat CdTe menjadi bahan yang ideal untuk digunakan dalam panel surya film tipis [37]

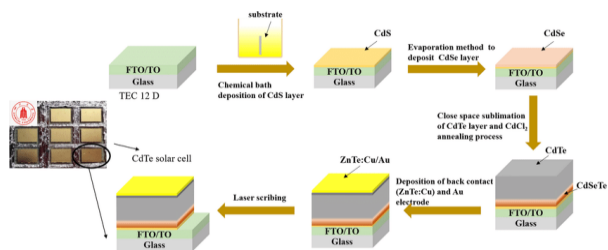
Cadmium Sulfide merupakan senyawa golongan II - VI. semikonduktor CdS ini memiliki energi gap sebesar 2,4 eV [38] dapat meneruskan cahaya dengan energi sekitar 2,4 eV. Pada sel surya film tipis semikonduktor CdS ini biasa digunakan sekitar 1-2 µm [39] yang dimana ketebalan ini dipercaya dapat menghasilkan efisiensi yang paling optimal. Namun, ada juga yang menggunakan CdS pada sel surya dengan ketebalan 10-50 µm untuk memberikan performa yang maksimum. [40]



Gambar 8. Perkembangan efisiensi sel surya CdTe [1]

Gambar 8 memberikan pandangan terkait dengan perkembangan efisiensi yang pesat dari kedua struktur utama sel surya CdTe/CdS yang mencapai efisiensi sebesar 18%. Sebelumnya di tahun 1972 dikembangkan sel surya heterojunction celah CdTe-CdS p-n lapisan tipis dengan efisiensi 6% [41] dan sel surya CdTe-CdS ini terus berkembang sampai tahun 2016 dengan efisiensi sebesar 22,1%. [42]

Selain efisiensinya yang tergolong tinggi sel surya CdTe/CdS ini juga memiliki besar band gap sekitar 1,45 eV dan dapat bertahan selama 20 tahun pemakaian.



Gambar 9. Fabrikasi Sel surya CdTe/CdS [43]

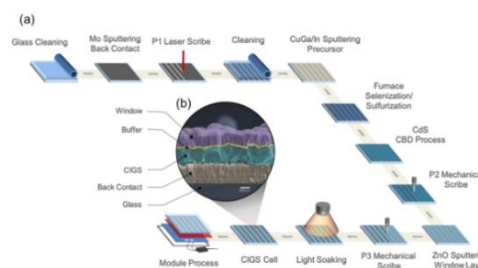
Untuk membuat sebuah sel surya dengan efisiensi yang tinggi dibutuhkan proses fabrikasi yang sesuai, proses fabrikasi sel surya CdTe/CdS dapat dipahami lebih lanjut melalui Gambar 9. Prosesnya dimulai dengan menyiapkan substrat kaca yang

dilapisi dengan lapisan konduktif transparan. Kemudian, lapisan tipis CdS didepositkan di atas substrat sebagai lapisan jendela menggunakan metode seperti chemical bath deposition atau sputtering. Lapisan CdTe yang lebih tebal didepositkan di atas CdS, umumnya dengan deposisi uap kimia atau deposisi lapisan tipis fisik, berfungsi sebagai lapisan penyerap cahaya utama. Perlakuan panas dilakukan untuk meningkatkan kualitas kristal CdTe dan pembentukan persimpangan p-n dengan CdS. Selanjutnya, lapisan kontak belakang logam seperti nikel didepositkan di atas CdTe untuk mengumpulkan muatan. Langkah terakhir meliputi pemotongan ukuran, pelapisan anti-reflektif, dan pemasangan lapisan pelindung untuk melindungi sel surya. [44] Selain proses fabrikasi yang tergolong mudah sel surya CdTe/Cds ini juga memiliki kelebihan dapat menyerap sinar matahari lebih banyak, dan bahan kadmium yang digunakan dalam sel surya ini juga berlimpah yang membuat harganya tergolong rendah daripada sel surya film tipis lainnya. Namun, sel surya CdTe/Cds ini dapat menyebarkan polusi karena bahan kadmium merupakan salah satu logam berat yang beracun maka dari itu pembuangan sel surya ini harus sangat diperhatikan, selain itu sel surya ini juga terbuat dari salah satu bahan langka yakni pada unsur teluriumnya, sehingga ketersediaan telurium nantinya akan membatasi jumlah sel surya yang diproduksi.

2.3 Sel Surya Copper Indium Gallium Selenide / Copper Zinc Tin Sulfide (CIGS/CZTS)

Sel surya film tipis ini merupakan gabungan dari bahan semikonduktor golongan I (Ag, Cu), golongan III (In, Ga), dan golongan VI (S, Se). Penggabungan ini terbukti stabil dengan hasil panel yang ringan, fleksibel, estetik, dan memiliki kinerja yang bagus. Pada sel surya CIGS juga minim terjadi degradasi yang biasa dialami oleh sel surya silikon generasi pertama. Oleh karena itu, CIGS sering digunakan sebagai bahan bangunan atau konstruksi dalam pengaplikasiannya pada bangunan seperti jendela dan atap. Jika dibandingkan dengan sel surya generasi pertama, CIGS ini memiliki kelebihan dari segi penggunaan bahan yang lebih sedikit dan lebih hemat energi dalam produksi. Sel surya film tipis CIGS juga sangat ideal untuk diaplikasikan pada skala industri. Hal ini dikarenakan semikonduktor CIGS dapat ditempatkan pada substrat yang fleksibel sehingga cocok untuk diaplikasikan pada mobil listrik dan kendaraan lainnya seperti bus, kereta api, bahkan truk. Hanya saja, CIGS lebih

mahal dibandingkan dengan sel surya film tipis lainnya dan bahannya mengandung racun. [3], [9], [45]

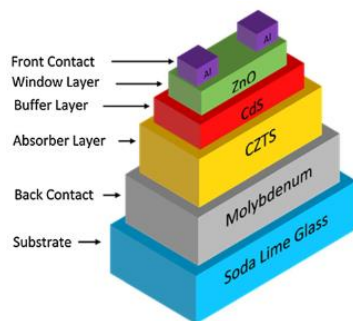


Gambar 10. Fabrikasi sel surya CIGS (a), Struktur sel surya CIGS [46]

Gambar 10a menunjukkan proses fabrikasi sel surya film tipis CIGS. Diawali dengan pembersihan kaca untuk menghilangkan kotoran yang menempel pada substrat yang akan digunakan. Kemudian, ditambahkan *back contact* (Mo) dengan metode *sputtering*. *Back contact* ini berfungsi untuk mereduksi bayangan, meningkatkan refleksi, dan mengurangi resistansi. Langkah berikutnya yaitu pembentukan pola dengan menggunakan laser. Setelah itu, dilanjutkan dengan proses pembersihan dan ditambahkan lapisan semikonduktor Cu/Ga/In dengan menggunakan metode *sputtering* yang membuat prekursor terdeposit di atas substrat. Lalu, dilakukan pemanasan lapisan tipis dalam sebuah furnace yang mengandung gas Selenium (Se) atau Sulfur (S). Selanjutnya, dibentuk lapisan tipis Kadmium Sulfida (CdS) dengan menggunakan metode *Chemical Bath Deposition* (CBD) dan kembali dilakukan pembentukan pola dengan alat mekanis. Setelah itu, dilakukan *sputtering* kembali untuk menambahkan lapisan tipis *Zinc Oxide* (ZnO) sebagai jendela pada sel surya film tipis CIGS. Lalu, dibentuk kembali pola dengan menggunakan alat mekanis dan dipaparkan cahaya pada lapisan tipis untuk stabilisasi. Terakhir, lapisan yang sudah membentuk sel lapisan tipis digabung dengan sel - sel serupa supaya menjadi panel dan dapat digunakan. Pada Gambar 10b, ditunjukkan hasil *scanning electron microscope* (SEM) struktur sel surya film tipis CIGS yang terdiri dari tiga lapisan utama yaitu lapisan *back contact*, lapisan penyerap, dan lapisan jendela. Adapun kaca sebagai substrat sel surya film tipis CIGS ini. [46], [47], [48].

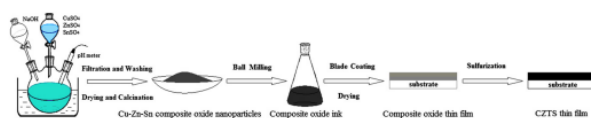
Efisiensi dari sel surya film tipis berbahan dasar CIGS ini adalah 20% dengan nilai tertinggi hingga mencapai 23,4%. Angka ini setara dengan efisiensi sel surya silikon teratas. Ditinjau dari segi daya

serap, nilai celah pita yang dimiliki CIGS di rentang 1 sampai 2,6 eV. Angka ini cukup tinggi bagi koefisiensi serapan. Selain itu, parameter cacat internal CIGS memungkinkan pembawa muatan minoritas, seperti elektron dan lubang, memiliki masa pakai yang cukup tinggi dengan angka 12 tahun. Artinya, pembawa muatan minoritas bertahan cukup lama di dalam bahan semikonduktor sebelum pada akhirnya mengalami rekombinasi dengan pembawa muatan mayoritas penyebab pengurangan efisiensi pada kinerja sel surya [3].



Gambar 11. Struktur CZTS [49]

Copper Zinc Tin Sulfide atau CZTS merupakan sel surya film tipis yang lebih murah dan memiliki efisiensi yang tinggi dibandingkan dengan CIGS. Efisiensi dari CZTS sendiri mencapai angka 12,6% dengan band gap sekitar 1,13 eV. Struktur dasar CZTS terdiri dari kontak depan, lapisan jendela, lapisan penyangga, lapisan penyerap, kontak belakang, dan substrat, seperti ditunjukkan Gambar 11 [19], [49], [50].



Gambar 12. Fabrikasi CZTS [19]

Gambar 12 mendemonstrasikan proses fabrikasi CZTS meliputi sintesis Cu-Zn-Sn sehingga menjadi komposit oksida nanopartikel, kemudian tinta komposit oksida akan melalui deposisi menggunakan blade coating. Setelah itu, dilakukan pengeringan sebelum dilakukan sulfurisasi di ruang vakum dengan suhu tinggi sekitar 550°C. Proses sulfurisasi sangat berpengaruh pada sifat komposisi, struktural, morfologi, optik dan listrik dari CZTS. [19], [50]

3 Kesimpulan

Sel surya dengan basis film tipis di generasi kedua ini menawarkan inovasi yang lebih baik di

aspek fleksibilitas dan biaya. Dengan mengadopsi teknologi film tipis dari berbagai bahan semikonduktor, seperti silikon amorf (a-Si), Cadmium Telluride / Cadmium Sulfide (CdTe/CdS), dan Copper Indium Gallium Selenide / Copper Zinc Tin Sulfide (CIGS/CZTS), generasi ini memungkinkan pembuatan sel surya yang lebih efisien. Meskipun begitu, masih banyak kekurangan yang perlu ditingkatkan terutama dalam hal efisiensi pemakaian dan konversi energi matahari menjadi energi listrik. Penggunaan sel surya antara generasi pertama sampai generasi kedua ini dapat disesuaikan dengan kebutuhan dan kepentingan

Daftar Rujukan

- [1] T. D. Lee and A. U. Ebong, "A review of thin film solar cell technologies and challenges," 2017. doi: 10.1016/j.rser.2016.12.028.
- [2] C. Mebarkia, D. Dib, H. Zerfaoui, and R. Belghit, "Energy efficiency of a photovoltaic cell based thin films CZTS by SCAPS," *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, vol. 8, no. 2, 2016, doi: 10.4314/jfas.v8i2.13.
- [3] J. Pastuszak and P. Węgierek, "Photovoltaic Cell Generations and Current Research Directions for Their Development," 2022. doi: 10.3390/ma15165542.
- [4] T. Zhang, M. Wang, and H. Yang, "A review of the energy performance and life-cycle assessment of building-integrated photovoltaic (BIPV) systems," 2018. doi: 10.3390/en11113157.
- [5] L. Partain, R. Hansen, S. Hansen, D. Bennett, A. Newlands, and L. Fraas, "'Swanson's Law' plan to mitigate global climate change," in *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2016. doi: 10.1109/PVSC.2016.7750284.
- [6] R. M. Swanson, "A vision for crystalline silicon photovoltaics," 2006. doi: 10.1002/pip.709.
- [7] D. Cardwell, "Solar and Wind Energy Start to Win on Price vs. Conventional Fuels," *The New York Times*, pp. 2–5, 2014, [Online]. Available: http://www.nytimes.com/2014/11/24/business/energy-environment/so?onafuels.html?emc=edit_tnt_20141123&nliid=61001495&tntemail0=y
- [8] BruceM, "Have You Heard of Swanson's Law?," xray-delta.com.

- [9] V. Muteri *et al.*, “Review on life cycle assessment of solar photovoltaic panels,” 2020. doi: 10.3390/en13010252.
- [10] M. Abderrezek, M. Fathi, and F. Djahli, “Comparative study of temperature effect on thin film solar cells,” *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 10, no. 2, 2018, doi: 10.21272/jnep.10(2).02027.
- [11] A. M. Adeyinka, O. V. Mbelu, Y. B. Adediji, and D. I. Yahya, “A Review of Current Trends in Thin Film Solar Cell Technologies,” *International Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 17, no. 1, pp. 1–10, 2023.
- [12] I. E. Tinedert, F. Pezzimenti, M. L. Megherbi, and A. Saadoun, “Design and simulation of a high efficiency CdS/CdTe solar cell,” *Optik (Stuttg)*, vol. 208, 2020, doi: 10.1016/j.ijleo.2019.164112.
- [13] G. Contento, B. Lorenzi, A. Rizzo, and D. Narducci, “Efficiency enhancement of a-Si and CZTS solar cells using different thermoelectric hybridization strategies,” *Energy*, vol. 131, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.05.028.
- [14] C. Yan *et al.*, “Cu₂ZnSnS₄ solar cells with over 10% power conversion efficiency enabled by heterojunction heat treatment,” *Nat Energy*, vol. 3, no. 9, 2018, doi: 10.1038/s41560-018-0206-0.
- [15] A. M. Ali *et al.*, “A computational study on the energy bandgap engineering in performance enhancement of CdTe thin film solar cells,” *Results Phys*, vol. 7, 2017, doi: 10.1016/j.rinp.2017.02.032.
- [16] Y. Osman, M. Fedawy, M. Abaza, and M. H. Aly, “Solar cell performance enhancement with optimized CIGS absorber bandgap and buffer layer,” in *Journal of Physics: Conference Series*, 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1447/1/012057.
- [17] M. Zeman, “Thin-film silicon PV technology,” *Journal of Electrical Engineering*, vol. 61, no. 5, 2010, doi: 10.2478/v10187-010-0039-y.
- [18] H. Firoozi and M. Imanieh, “Improvement performance CIGS thin film solar cells by changing the thickness Cd_S layer,” *Journal of Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 6, 2018.
- [19] D. Tang *et al.*, “An alternative route towards low-cost Cu₂ZnSnS₄ thin film solar cells,” *Surf Coat Technol*, vol. 232, 2013, doi: 10.1016/j.surfcoat.2013.04.052.
- [20] C. J. Cleveland, *Encyclopedia of Energy*. Boston, United States: Elsevier Science, 2004.
- [21] M. Jiang and X. Y., “Cu₂ZnSnS₄ Thin Film Solar Cells: Present Status and Future Prospects,” in *Solar Cells - Research and Application Perspectives*, 2013. doi: 10.5772/50702.
- [22] B. P. Singh, S. K. Goyal, and P. Kumar, “Solar pv cell materials and technologies: Analyzing the recent developments,” in *Materials Today: Proceedings*, 2021. doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.003.
- [23] K. L. Chopra, P. D. Paulson, and V. Dutta, “Thin-film solar cells: An overview,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 12, no. 2–3, 2004, doi: 10.1002/pip.541.
- [24] H. Kang, “Crystalline Silicon vs. Amorphous Silicon: The Significance of Structural Differences in Photovoltaic Applications,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021. doi: 10.1088/1755-1315/726/1/012001.
- [25] I. Usman, D. Ismail, H. Sutanto, and T. Winata, “Penumbuhan lapisan tipis silikon mikrokrystal terhidrogenasi dengan teknik HWC-VHF-PECVD,” *Reaktor*, vol. 13, no. 1, 2010.
- [26] L. M. Fraas, *Low-cost solar electric power*, vol. 9783319075303. 2014. doi: 10.1007/978-3-319-07530-3.
- [27] J. Yang, A. Banerjee, and S. Guha, “Triple-junction amorphous silicon alloy solar cell with 14.6% initial and 13.0% stable conversion efficiencies,” *Appl Phys Lett*, vol. 70, no. 22, 1997, doi: 10.1063/1.118761.
- [28] A. Rahmani and S. Vatankeh, “Improving the Efficiency of Thin Film Amorphous Silicon Solar Cell by Changing the Location and Material of Plasmonic Metallic Nanostructures,” in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2017, pp. 8–12. doi: 10.1016/j.egypro.2017.11.003.
- [29] G. Beaucarne, “Silicon thin-film solar cells,” *Adv Optoelectron*, vol. 2007, 2007, doi: 10.1155/2007/36970.
- [30] X. Deng, X. Liao, S. Han, H. Povolny, and P. Agarwal, “Amorphous silicon and silicon germanium materials for high-efficiency triple-junction solar cells,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 62, no. 1, 2000, doi: 10.1016/S0927-0248(99)00139-7.
- [31] G. Morris, “Thin-film solar panels : What you need to know,” energysage.
- [32] J. Toušková, D. Kindl, and J. Toušek, “Photovoltaic cells on CdS/CdTe heterojunctions,” *physica status solidi (a)*, vol.

- 142, no. 2, 1994, doi: 10.1002/pssa.2211420230.
- [33] A. Mohammad Bagher, "Types of Solar Cells and Application," *American Journal of Optics and Photonics*, vol. 3, no. 5, 2015, doi: 10.11648/j.ajop.20150305.17.
- [34] G. H. Tariq and M. Anis-Ur-Rehman, "Annealing effects on physical properties of doped CdTe thin films for photovoltaic applications," *Mater Sci Semicond Process*, vol. 30, 2015, doi: 10.1016/j.mssp.2014.09.012.
- [35] N. A. Khan *et al.*, "Effect of laser annealing on thermally evaporated CdTe thin films for photovoltaic absorber application," *Solar Energy*, vol. 173, 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.08.023.
- [36] M. S. Hossain *et al.*, "Impact of CdTe thin film thickness in ZnxCd1-xS/CdTe solar cell by RF sputtering," *Solar Energy*, vol. 180, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.01.019.
- [37] R. Zia, F. Saleemi, and S. Nasseem, "Optical properties of thermally evaporated CdTe thin films by varying substrate temperature," *Optik (Stuttg)*, vol. 127, no. 4, 2016, doi: 10.1016/j.ijleo.2015.11.069.
- [38] Wirjoadi, B. Siswanto, and Sudjarmoko, "Analisis Sifat Mikro Lapisan Tipis TIN pada Substrat Al Hasil Plasma Sputtering," in *Prosiding PPI - PDIPN*, 1st ed., Yogyakarta: Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan - BATAN, 2009.
- [39] B. E. McCandless and R. W. Birkmire, "Analysis of post deposition processing for CdTe/CdS thin film solar cells," *Solar Cells*, vol. 31, no. 6, 1991, doi: 10.1016/0379-6787(91)90095-7.
- [40] T. M. Razykov, C. S. Ferekides, D. Morel, E. Stefanakos, H. S. Ullal, and H. M. Upadhyaya, "Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects," *Solar Energy*, vol. 85, no. 8, 2011, doi: 10.1016/j.solener.2010.12.002.
- [41] D. Bonnet, "Chapter 149 - CdTe Thin Film Modules — Progress towards Manufacture," in *World Renewable Energy Congress VI*, A. A. M. Sayigh, Ed., Oxford: Pergamon, 2000, pp. 737–742. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-008043865-8/50149-5>.
- [42] E. Wesoff, "First Solar Hits Record 22.1% Conversion Efficiency for CdTe Solar Cell," greentechmedia.com.
- [43] C. Li *et al.*, "Performance improvement of CdS/CdTe solar cells by incorporation of CdSe layers," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 32, no. 14, 2021, doi: 10.1007/s10854-021-06425-0.
- [44] J. Britt and C. Ferekides, "Thin-film CdS/CdTe solar cell with 15.8% efficiency," *Appl Phys Lett*, vol. 62, no. 22, 1993, doi: 10.1063/1.109629.
- [45] N. Kant and P. Singh, "Review of next generation photovoltaic solar cell technology and comparative materialistic development," *Mater Today Proc*, vol. 56, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.11.116.
- [46] J. Park *et al.*, *Transparent Conductive Electrode for Low Power Conversion Efficiency Loss in CIGS Solar Cell Industry*. 2015.
- [47] J. Chen, H. Shen, Z. Zhai, and Y. Li, "Effect of e-beam evaporated elemental metal stack precursors on the property of Cu(InGa)Se₂ thin films through two-step process," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 29, no. 23, 2018, doi: 10.1007/s10854-018-0108-8.
- [48] N. Mufti *et al.*, "Review of CIGS-based solar cells manufacturing by structural engineering," 2020. doi: 10.1016/j.solener.2020.07.065.
- [49] S. Enayati Maklavani and S. Mohammadnejad, "Enhancing the open-circuit voltage and efficiency of CZTS thin-film solar cells via band-offset engineering," *Opt Quantum Electron*, vol. 52, no. 2, 2020, doi: 10.1007/s11082-019-2180-6.
- [50] K. Ito, *Copper Zinc Tin Sulfide-Based Thin-Film Solar Cells*. 2015. doi: 10.1002/9781118437865.