



Analisis Efisiensi Sel Surya a-Si:H Berdasarkan Penyusun Lapisan Aktif

Soni Prayogi

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Industri, Universitas Pertamina
Jl. Teuku Nyak Arief, Simprug, Kebayoran Lama, Jakarta 12220
Penulis korespondensi : soni.prayogi@universitaspertamina.ac.id

Abstract

Our study discusses the manufacture of a-Si:H (Hydrogenated Amorphous Silicon) solar cells using the Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) technique. The a-Si:H solar cell that we produce is deposited on an Indium Tin Oxide (ITO) glass substrate which has a conductive layer on its coating. Making an active layer on a-Si:H solar cells by mixing silane and hydrogen gas together in a PECVD chamber. Meanwhile, the passive layer of a-Si:H solar cells is maintained with a fixed structure. After the a-Si:H solar cell is added, a metal layer is formed on the back which functions as an electric contact and light reflector. In addition, physical properties, namely thickness-morphology, optical properties, namely band gap, electrical properties, namely electrical conductivity, and I-V characterization of a-Si:H solar cells are characterized by solar simulators and sunlight. Our results show that the active layer a-Si:H solar cell obtained from this work has a fairly good conversion efficiency of 8.48%. We believe that the work we are doing is a good effort in solving the problem of renewable energy in Indonesia.

Keywords: a-Si:H solar cells; PECVD; active layer; efficiency

Abstrak

Studi yang kami lakukan membahas tentang pembuatan sel surya a-Si:H (Silikon Amorf Terhidrogenasi) dengan menggunakan teknik *Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition* (PECVD). Sel surya a-Si:H yang kami hasilkan dideposisi pada substrat kaca *Indium Tin Oxide* (ITO) yang memiliki lapisan konduktif pada lapisannya. Pembuatan lapisan aktif pada sel surya a-Si:H dengan cara mencampur gas silan dan hidrogen secara bersama didalam chamber PECVD. Sementara pada lapisan pasif sel surya a-Si:H dijaga dengan struktur yang tetap. Setelah sel surya a-Si:H terbentuk ditambah lapisan logam di bagian belakang yang berfungsi sebagai kontak listrik dan reflektor cahaya. Selain itu juga, sifat fisis yaitu ketebalan-morfologi, sifat optik yaitu celah pita, sifat elektrik yaitu konduktivitas listrik, dan karakterisasi I-V sel surya a-Si:H dikarakterisasi dengan simulator surya dan sinar matahari. Hasil kami memperlihatkan, sel surya a-Si:H lapisan aktif yang diperoleh dari pekerjaan ini, mendapatkan efisiensi konversinya yang cukup baik sebesar 8,48%. Kami meyakini bahwa pekerjaan yang kami lakukan menjadi upaya yang baik dalam menyelesaikan permasalahan energi terbarukan di Indonesia.

Kata kunci: sel surya a-Si:H; PECVD; lapisan aktif; efisiensi

PENDAHULUAN

Sel surya merupakan sumber energi yang tidak pernah habis saat matahari mengirimkan sinarnya ke Bumi (Irvine, 2007). Seiring dengan efisiensi konversi, banyak kemajuan yang juga terus meningkat hingga sel surya mulai menyentuh kehidupan manusia dan digunakan sebagai sumber energi listrik di berbagai pemukiman penduduk sejak tahun 1990. Sejak saat itu, sel surya mulai menarik perhatian banyak peneliti, karena sel surya diharapkan menjadi

kandidat pembangkit listrik dengan aplikasi yang sangat praktis, terutama dalam penyediaan energi di daerah terpencil (Despotou, 2012). Selain itu, sumber energi ini ramah lingkungan karena tidak ada polutan yang dihasilkan selama konversi. Secara umum, listrik tenaga surya merupakan sumber energi alternatif yang dapat diterima (Chittick et al., 1969). Permasalahan yang ada saat ini adalah harganya yang masih mahal dibandingkan listrik yang dihasilkan dari sumber energi lain, sehingga penggunaannya terbatas

Diterima 30 Oktober 2022, Disetujui 29 Desember 2022, Diterbitkan online 30 Desember 2022

© 2022 Universitas Brawijaya, e – ISSN : 2548-2181, p-ISSN : 2548-23

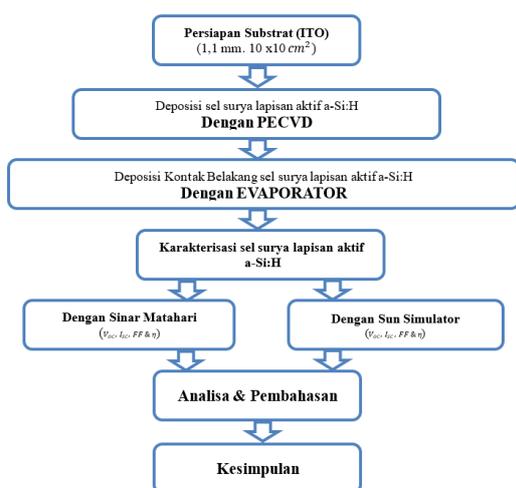
misalnya pada produk elektronik, dan juga digunakan sebagai pembangkit listrik di tempat-tempat yang masih sulit mengakses ke jaringan listrik (Phillips, 2019).

Tiga masalah utama sel surya, terutama silikon amorf terhidrogenasi, adalah efisiensi yang masih rendah, *Efek Staebler-Wronski* (SWE) dan masih mahal. Selain itu, perhatian terbesar dari sel surya silikon amorf adalah celah pita dari kelompok energi terlarang (Cahyono et al., 2017). Pada sel surya, terlalu banyak bandwidth menyebabkan sejumlah besar spektrum energi terbuang sia-sia karena transmisi (Prayogi et al., 2022). Pada saat yang sama, jika bandwidth energi terlarang terlalu kecil, kehilangan eksitasi elektron akan tinggi (Illiberi et al., 2011). Peningkatan efisiensi sel surya sangat bergantung pada seberapa baik sistem sel surya dapat menyerap energi matahari secara maksimal (Flewitt, 2016). Cahaya yang tidak diserap oleh lapisan atas ditransmisikan ke lapisan kedua dengan celah pita energi yang lebih kecil (Prayogi et al., 2021).

Penelitian dan pengembangan sel surya a-Si:H lapisan aktif belum banyak yang melaporkan. Lapisan aktif berbasis a-Si:H memegang peran paling penting untuk memanfaatkan energi surya untuk mengeksitasi elektron. Di sini, kami menyajikan pendekatan baru untuk menghasilkan lapisan aktif struktur silikon amorf dari SiH_4 dengan teknik PECVD dan memvariasikan setiap lapisan aktif melalui waktu pengendapan untuk menyelidiki efisiensi yang dihasilkan.

METODE PENELITIAN

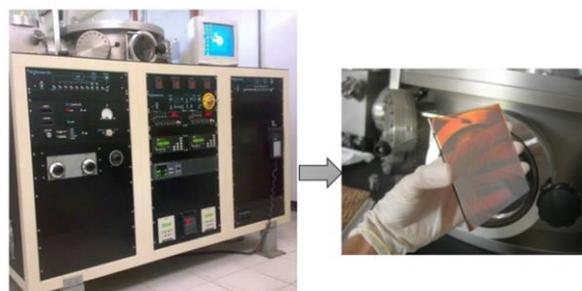
Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimen. Berikut ini uraian penelitian yang digunakan beserta cara kerja penelitiannya seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alur penelitian

Deposisi sel surya lapisan aktif a-Si:H dilakukan dengan menggunakan metode PECVD seperti terlihat pada Gambar 2. Untuk mendapatkan lapisan aktif, dilakukan pengenceran plasma silan dengan hidrogen, dengan rasio hidrogen dan silan

yang bervariasi, $R=\text{H}_2/\text{SiH}_4$. Lapisan aktif struktur sel surya a-Si:H akan diendapkan dengan menggunakan parameter pengendapan yang representatif untuk menghasilkan film tipis yang dapat menyerap spektrum energi matahari secara maksimal. Parameter deposisi yang ditentukan juga diharapkan dapat menghasilkan kualitas efisiensi sel surya yang lebih baik.



(a) (b)

Gambar 2. Skema preparasi sel surya a-Si:H. (a) Teknik PECVD dengan multi chamber, dan (b) Sel surya a-Si:H (10 cm x 10 cm) terintegrasi dengan film konduktif.

Pengolahan dan analisis hasil pengukuran parameter karakteristik sel surya pada kondisi iradiasi dilakukan melalui langkah-langkah sebagai berikut: 1) Plot kurva karakteristik arus terhadap tegangan (I-V) sel surya dari data pengukuran. 2) Tentukan V_{oc} , I_{sc} , dan $V_m I_m$ dari kurva karakteristik I-V. Ketika resistor variabel nol, amperemeter menunjukkan nilai I_{sc} dan tegangan yang terbaca pada voltmeter adalah nol. Besarnya arus berkurang dengan meningkatnya nilai resistor, hal ini menyebabkan tegangan naik perlahan. Sampai situasi di mana resistor mencapai nilai mendekati tak terhingga, besarnya arus adalah nol dan tegangan mencapai nilai V_{oc} . Sedangkan V_m dan I_m masing-masing adalah tegangan dan arus pada titik operasi optimum. 3) Tentukan faktor pengisian (FF) dan efisiensi (η) sel surya. FF adalah besaran tak berdimensi yang menyatakan rasio daya maksimum yang dihasilkan sel surya terhadap perkalian I_{sc} dan V_{oc} .

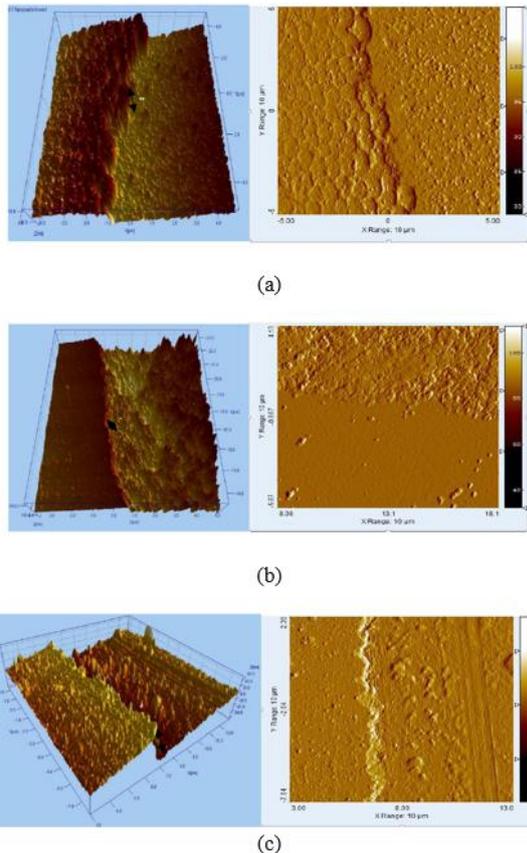
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil yang diharapkan dari deposisi ini adalah lapisan seragam berwarna coklat kehitaman seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 dari masing-masing sampel. Lapisan tersebut dianggap sebagai tanda homogen dari warna hitam kecoklatan yang seragam. Pada proses deposisi lapisan aktif, difusi gugus Si-H, terjadi ikatan silang sehingga molekul H_2 terperangkap di dalam lapisan, tegangan dan regangan tinggi menciptakan permukaan yang lemah. Ikatan lemah pada permukaan mudah putus dengan adanya energi aktivasi. Pemutusan ikatan menyebabkan pelepasan atom H_2 ke udara terbuka. Setelah pengendapan selesai, ia bertindak sebagai cabang yang

terus tumbuh dan kemudian lapisan a-Si:H terlepas dari substrat.

Untuk mengukur ketebalan dan morfologi sel surya a-Si:H menggunakan *Atomic Force Microscopy* (AFM), yang mengkarakterisasi bahan menggunakan gaya atom tip-substrat. AFM terdiri dari beberapa perangkat seperti *nozle*, *kantilever*, *sensor piezoelektrik* dan *detektor cahaya* (Dzedzickis et al., 2018). Pengukuran atau scan diambil dari batas antara coating dan substrat. Perubahan kemiringan ini memberikan informasi tentang kedalaman atau ketebalan lapisan (Pedrak et al., 2003). Dengan memindai daerah batas ini diperoleh informasi tentang perbedaan tinggi atau kedalaman yang menyatakan ketebalan lapisan tipis yang terbentuk.

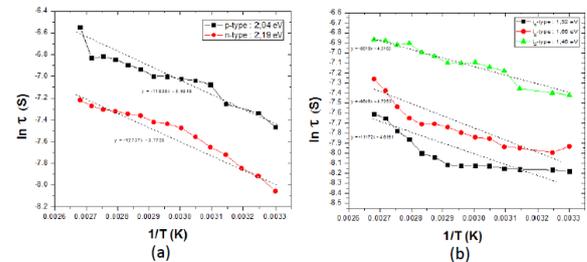
Informasi tentang kedalaman disediakan oleh perubahan kemiringan. Pemindaian di wilayah perbatasan ini menghasilkan data variasi ketinggian atau kedalaman yang mewakili ketebalan lapisan tipis. Gambar 3 menunjukkan hasil pengukuran yang dilakukan menggunakan AFM untuk setiap lapisan aktif.



Gambar 3. Morfologi permukaan lapisan aktif yang diukur menggunakan AFM (a) Lapisan aktif 1, (b) Lapisan aktif 2, dan (c) Lapisan aktif 3.

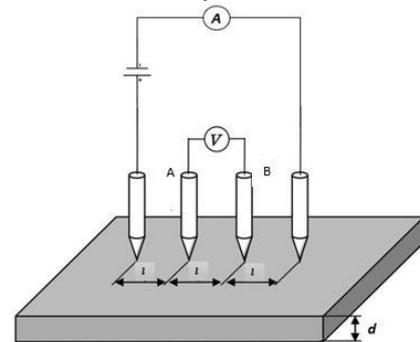
Celah energi sampel (E_g) dapat dihitung dengan mengukur konduktivitas sampel pada setiap kenaikan suhu (T), yang menghasilkan grafik $\ln \sigma$ vs $1/T$. Pengukuran ini untuk menghitung celah energi sampel dengan mengukur konduktivitas pada temperatur yang berbeda. Kemiringan grafik dapat

digunakan untuk menetapkan di mana E_g berada seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Menurut temuan pengukuran dan analisis UV-Vis menggunakan metode Tauc's Plot dan rasio \ln hingga $1/T$, setiap lapisan telah berhasil mengoptimalkan celah energi (Misalnya) pada lapisan aktif sampel sel surya a-Si:H.



Gambar 4. Pengukuran E_g menggunakan perbandingan $\ln \sigma$ dengan $1/T$ (a). Lapisan aktif, dan (b). Lapisan pasif.

Pada pengukuran konduktivitas sampel dipotong menjadi ukuran $1 \times 1 \text{ cm}^2$ untuk metode empat titik pengukuran konduktivitas listrik. Dengan maksud untuk menurunkan faktor koreksi pengukuran, daerah sampel dibuat sekecil mungkin (Prior, 2005). Bentuk sampel akan berdampak pada faktor koreksi pengukuran selain memastikan ukuran sampel sekecil mungkin (Morigaki & Ogihara, 2007). Faktor koreksi pengukuran juga harus diperhatikan jika bentuk sampel berbentuk lingkaran. Akibatnya, daripada menggunakan lingkaran sebagai bentuk sampel untuk pengukuran probe empat titik konduktivitas listrik, persegi berukuran $1 \times 1 \text{ cm}^2$ digunakan. Probe diberi jarak $0,25 \text{ cm}$ karena sampel berukuran $1 \times 1 \text{ cm}^2$.



Gambar 5. Skema rangkaian pengukuran konduktivitas menggunakan metode empat titik

Nilai konduktivitas diperoleh dari besarnya nilai konduktivitas listrik suatu sampel dipengaruhi oleh beberapa variable dapat dilihat pada Tabel 1. Diantaranya adalah tegangan, ketebalan lapisan, jarak antar probe, dan arus yang terbaca. Dengan mengalirnya arus listrik pada kedua probe terluar maka akan didapatkan nilai Tegangan (V) dari nilai tegangan yang diukur pada kedua probe terluar (Kasap et al., 2007).

Tabel 1. Hasil pengukuran daya hantar listrik lapisan intrinsik dan ekstrinsik pada kondisi terang

No	Sample	Voltage V_{a-b} (V)	Current I (mA)	Conductivity σ ($\times 10^{-3}$ S/cm)
1	Tipe-p	0,647	96,2	1,74
2	Tipe-n	0,461	64,3	3,15
3	Tipe-i ₁	0,847	277,2	65,1
4	Tipe-i ₂	0,747	176,2	35,4
5	Tipe-i ₃	0,844	246,2	60,6

Tabel 2. Hasil pengukuran daya hantar listrik lapisan intrinsik dan ekstrinsik pada kondisi gelap

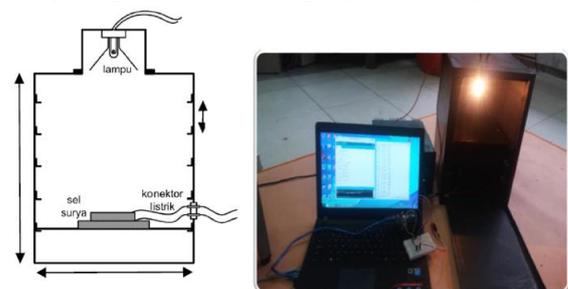
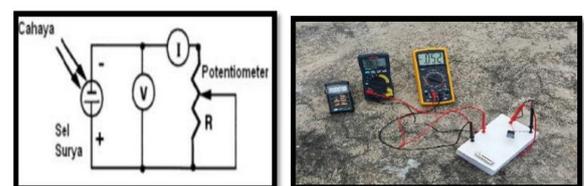
No	Sample	Voltage V_{a-b} (V)	Current I (mA)	Conductivity σ ($\times 10^{-3}$ S/cm)
1	Tipe-p	0,325	36,2	0,48
2	Tipe-n	0,231	64,3	0,85
3	Tipe-i ₁	0,627	147,2	0,62
4	Tipe-i ₂	0,541	106,1	0,31
5	Tipe-i ₃	0,642	142,7	0,56

Dari Tabel 1 dan 2 pada lapisan pasif, konduktivitas cahaya tidak meningkat secara signifikan dari keadaan gelap. Respon foto yang merupakan rasio konduktivitas cahaya terhadap konduktivitas gelap menunjukkan nilai tidak lebih dari 10^1 , menunjukkan bahwa lapisan pasif adalah lapisan pasif. Hal ini karena elektron dari pita valensi yang dieksitasi oleh cahaya menuju pita konduksi tidak secara signifikan meningkatkan konsentrasi elektron pada pita konduksi (Beyer, 2003). Berbeda dengan lapisan aktif yang memiliki respon foto hingga 10^5 , elektron tereksitasi secara signifikan meningkatkan konsentrasi elektron pada pita konduksi sehingga teramati konduktivitas cahaya pada lapisan aktif tampak melonjak drastis.

Pengukuran I-V dengan Sun Simulator untuk mengetahui karakteristik sel surya lapisan aktif a-Si:H. Simulator Matahari terbuat dari bahan aluminium dengan ukuran ($15 \times 15 \times 30$) cm³ dan dihubungkan dengan rangkaian elektronik seperti pada Gambar 6. Di bagian atas ditempatkan lampu untuk mengukur karakteristik I-V dalam kondisi disinari. Lampu yang digunakan adalah lampu Halogen Bulb dengan intensitas cahaya 46,6 mW/cm². Lampu Halogen Bulm dipilih karena spektrum cahayanya hampir mendekati spektrum sinar matahari.

Proses karakterisasi I-V dengan sinar matahari langsung pada prinsipnya hampir sama dengan menggunakan Sun Simulator, namun perbedaan yang mendasar adalah sumber cahayanya melalui sinar matahari langsung dimana intensitas cahayanya

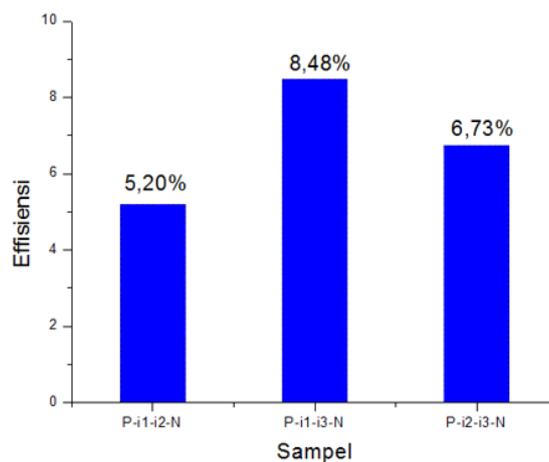
mencapai 850 mW/cm² seperti pada Gambar 7. Prosedur karakterisasi I-V sel surya ini dilakukan sebanyak tiga kali sesuai dengan jumlah sampel.

**Gambar 6.** Rancangan sistem Sun Simulator**Gambar 7.** Rangkaian listrik untuk sistem pengukuran karakterisasi sel surya I-V

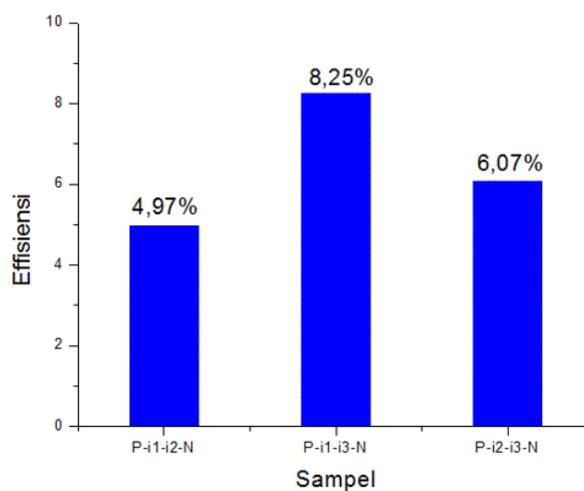
Hasil karakterisasi lapisan aktif I-V dengan perbedaan ketebalan lapisan dengan Sun Simulator dan sinar matahari dapat dilihat pada Tabel 3, Gambar 8, Tabel 4, dan Gambar 9.

Tabel 3. Karakterisasi I-V sel surya lapisan aktif a-Si:H dengan Sun Simulator.

No	Sampel	V_{oc} (mV)	I_{sc} (mA)	P_{in} (mW)	P_{maks} (mW)	FF	H (%)
1	P-i ₁ -i ₂ -N	140,7	0,231	366	19,05	0,58	5,20
2	P-i ₁ -i ₃ -N	178,2	0,288	366	31,05	0,57	8,48
3	P-i ₂ -i ₃ -N	150,1	0,273	366	24,62	0,60	6,73

**Gambar 8.** Pengukuran Grafik Efisiensi Sampel dengan Sun Simulator**Tabel 4.** Karakterisasi I-V sel surya lapisan aktif a-Si:H dengan Sinar Matahari

No	Sampel	V_{oc} (mV)	I_{sc} (mA)	P_{in} (mW)	P_{maks} (mW)	FF	η (%)
1	P-i ₁ -i ₂ -N	244,24	0,432	1144	56,96	0,54	4,97
2	P-i ₁ -i ₃ -N	374,60	0,586	1144	92,49	0,43	8,25
3	P-i ₂ -i ₃ -N	302,80	0,511	1144	69,51	0,45	6,07

**Gambar 9.** Pengukuran Grafik Efisiensi Sampel dengan Sinar Matahari

Hasil karakterisasi I-V sel surya lapisan aktif a-Si:H menggunakan Sun Simulator dan sinar matahari langsung menunjukkan bahwa pengukuran yang dihasilkan bervariasi pada ketebalan lapisan-i antara 400-800 nm. Pada hasil penelitian sebelumnya dengan menggunakan alat PECVD yang sama dengan struktur p-i-n menghasilkan efisiensi sebesar 5,31%. Sedangkan dengan mengoptimalkan dengan memvariasikan energy gap dan ketebalan masing-masing sampel, diperoleh nilai efisiensi sebesar 8,48%. Terjadi peningkatan efisiensi yang sangat signifikan, hampir 60% dari yang pernah dilakukan sebelumnya.

Secara keseluruhan, sebagaimana dibuktikan dengan daya keluaran maksimum yang rendah, sel surya lapisan aktif a-Si:H yang dihasilkan biasanya memiliki FF yang buruk. Salah satu penyebab rendahnya nilai FF sel surya a-Si:H lapisan aktif adalah mekanisme pembuatan sambungan yang tidak sempurna, yang mengakibatkan cacat pada area antarmuka (Wang et al., 2020). Ada lima lokasi persimpangan pada sel surya a-Si:H yang dihasilkan, yang masing-masing merupakan persimpangan antara substrat (ITO) dan lapisan-p, antara lapisan-p dan lapisan-p. Kondisi cacat akan tercipta di area sambungan jika mekanisme penghubung antar lapisan tidak dibangun dengan benar

Untuk menggunakan energi foton untuk membangkitkan pembawa muatannya dari pita valensi ke pita konduksi dan untuk meningkatkan kekuatan medan listrik antara lapisan-p dan lapisan-n, lapisan aktif a-Si:H pada lapisan perangkat sel surya memainkan fungsi krusial. Semakin tebal lapisan aktif maka laju pembentukan pembawa muatan akan meningkat, dan penyerapan foton akan semakin besar (Duan et al., 2014). Namun, resistansi seri (R_s) juga naik karena keadaan lokal yang disebabkan oleh lapisan-i yang lebih tebal. Sebaliknya, medan listrik yang tercipta antara lapisan-p dan lapisan-n akan melemah jika lapisan-i terlalu tipis.

KESIMPULAN

Singkatnya, dari pengukuran konduktivitas listrik masing-masing sampel, respon foto lapisan ekstrinsik, yang merupakan rasio konduktivitas cahaya terhadap konduktivitas gelap, menunjukkan nilai tidak lebih dari 101, sedangkan respon foto dari intrinsik dapat mencapai 105. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan ekstrinsik merupakan lapisan pasif, sedangkan lapisan intrinsik merupakan lapisan aktif. Berdasarkan karakterisasi I-V sel surya lapisan aktif a-Si:H yang diperoleh pada penelitian ini; diperoleh efisiensi konversi yang baik sebesar 8,48%. Namun, karakteristik sel surya lapisan aktif a-Si:H I-V yang dihasilkan pada penelitian ini masih menunjukkan faktor pengisian (FF) yang rendah. Penyebab yang paling mungkin dari rendahnya nilai fill factor (FF) adalah mekanisme koneksi pada area antar layer (interface) yang belum sempurna sehingga menimbulkan kondisi defect pada area tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Beyer, W. (2003). Diffusion and evolution of hydrogen in hydrogenated amorphous and microcrystalline silicon. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 78(1), 235–267. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(02\)00438-5](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(02)00438-5)
- Cahyono, Y., Muttaqin, F. D., Maslakah, U., Baqiya, M. A., Zainuri, M., Yahya, E., Pratapa, S., & Darminto, D. (2017). Efek Staebler-Wronski dan Pengaruh Waktu Anil pada Lapisan Instrinsik Silikon Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H). *Jurnal Fisika Dan Aplikasinya*, 13(2), Article 2. <https://doi.org/10.12962/j24604682.v13i2.2299>
- Chittick, R. C., Alexander, J. H., & Sterling, H. F. (1969). The Preparation and Properties of Amorphous Silicon. *Journal of The Electrochemical Society*, 116(1), 77. <https://doi.org/10.1149/1.2411779>
- Despotou, E. (2012). 1.10—Vision for Photovoltaics in the Future. In A. Sayigh (Ed.), *Comprehensive Renewable Energy* (pp. 179–198). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00109-8>
- Duan, W., Qiu, Y., Zhang, L., Yu, J., Bian, J., & Liu, Z. (2014). Influence of precursor a-Si:H dehydrogenation on the aluminum induced crystallization process. *Materials Chemistry and Physics*, 146(1), 141–145. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.03.012>
- Dzedzickis, A., Bucinskas, V., Viržonis, D., Sesok, N., Ulcinas, A., Iljin, I., Sutynys, E., Petkevicius, S., Gargasas, J., & Morkvenaite-Vilkonciene, I. (2018). Modification of the AFM Sensor by a Precisely Regulated Air Stream to Increase Imaging Speed and Accuracy in the Contact Mode. *Sensors*, 18(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/s18082694>
- Flewitt, A. J. (2016). Hydrogenated Amorphous Silicon Thin-Film Transistors (a-Si:H TFTs). In J. Chen, W. Cranton, & M. Fihn (Eds.), *Handbook of Visual Display Technology* (pp. 887–909). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14346-0_47
- Illiberi, A., Kudlacek, P., Smets, A. H. M., Creatore, M., & van de Sanden, M. C. M. (2011). Effect of ion bombardment on the a-Si:H based surface passivation of c-Si surfaces. *Applied Physics Letters*, 98(24), 242115. <https://doi.org/10.1063/1.3601485>
- Irvine, S. (2007). Solar Cells and Photovoltaics. In S. Kasap & P. Capper (Eds.), *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials* (pp. 1095–1106). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-29185-7_46
- Kasap, S., Koughia, C., Singh, J., Ruda, H., & O'Leary, S. (2007). Optical Properties of Electronic Materials: Fundamentals and Characterization. In S. Kasap & P. Capper (Eds.), *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials* (pp. 47–77).

- Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-29185-7_3
- Morigaki, K., & Ogihara, C. (2007). Amorphous Semiconductors: Structure, Optical, and Electrical Properties. In S. Kasap & P. Capper (Eds.), *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials* (pp. 565–580). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-29185-7_25
- Pedrak, R., Ivanov, Tzv., Ivanova, K., Gotszalk, T., Abedinov, N., Rangelow, I. W., Edinger, K., Tomerov, E., Schenkel, T., & Hudek, P. (2003). Micromachined atomic force microscopy sensor with integrated piezoresistive sensor and thermal bimorph actuator for high-speed tapping-mode atomic force microscopy phase-imaging in higher eigenmodes. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 21(6), 3102–3107. <https://doi.org/10.1116/1.1614252>
- Phillips, L. (2019). 9—Solar energy. In T. M. Letcher (Ed.), *Managing Global Warming* (pp. 317–332). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814104-5.00009-0>
- Prayogi, S., Cahyono, Y., & Darminto, D. (2022). Electronic structure analysis of a-Si: H p-i1-i2-n solar cells using ellipsometry spectroscopy. *Optical and Quantum Electronics*, 54(11), 732. <https://doi.org/10.1007/s11082-022-04044-5>
- Prayogi, S., Cahyono, Y., Iqballudin, I., Stchakovsky, M., & Darminto, D. (2021). The effect of adding an active layer to the structure of a-Si: H solar cells on the efficiency using RF-PECVD. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(6), 7609–7618. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-05477-6>
- Prior, K. A. (2005). SEMICONDUCTOR PHYSICS | Impurities and Defects. In R. D. Guenther (Ed.), *Encyclopedia of Modern Optics* (pp. 442–450). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369395-0/00624-2>
- Wang, S.-H., Chang, H.-E., Lee, C.-C., Fuh, Y.-K., & Li, T. T. (2020). Evolution of a-Si:H to nc-Si:H transition of hydrogenated silicon films deposited by trichlorosilane using principle component analysis of optical emission spectroscopy. *Materials Chemistry and Physics*, 240, 122186. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122186>