

PENGARUH RAPAT CACAT DANGLING-BOND LAPISAN (p)a-Si:H PADA KINERJA SEL SURYA STRUKTUR p-i-n

DADAN HAMDANI ^{1,*}, LAMBANG SUBAGIYO ², D. DARMINTO ^{3,+}

¹Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Mulawarman
Jl. Barong Tongkok No. 4 Kampus FMIPA Universitas Mulawarman, 75123, Samarinda,
Kalimantan Timur, Telp. (0541) 749140

²Jurusan Pendidikan Fisika, FKIP, Universitas Mulawarman
Jl. Muara Pahu, Kampus FKIP Universitas Mulawarman, 75123, Samarinda, Kalimantan Timur,
Telp. (0541) 743651

³Departemen Fisika, FSAD, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Kampus ITS, Keputih, Kec. Sukolilo, 60117, Surabaya, Jawa Timur, Telp. (031) 5943351

*email : d.hamdani1973@gmail.com

+email : darminto@physics.its.ac.id

Abstrak. Validasi numerik terhadap sel surya homojunction berbasis a-Si:H hasil eksperimen secara fisis dianalisis menggunakan perangkat AFORS-HET (Automat FOR Simulation of HETerostructure) dengan meninjau pengaruh cacat dangling-bond (DB) pada lapisan (p)a-Si:H (N_{tr}) terhadap kinerja sel surya struktur TCO/(p)a-Si:H/(i)a-Si:H/(n)a-Si:H/Ag. Variasi N_{tr} diberikan sesuai dengan hasil eksperimen antara 5.0×10^{17} – 5.0×10^{19} cm^{-3}/eV yang dioperasikan pada ketebalan lapisan-p berbeda disertai dengan analisis diagram pita energi, kurva karakteristik J-V, profil medan listrik, dan konsentrasi pembawa muatan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sel surya bekerja secara optimum jika nilai parameter N_{tr} mampu dikontrol untuk nilai $<5.0 \times 10^{18}$ cm^{-3}/eV , dimana pada kondisi ini efisiensi yang bisa dicapai sekitar 7.68% ($V_{OC} = 947.2$ mV, $J_{SC} = 10.84$ mA/cm²; FF = 74.82%) pada ketebalan lapisan-p sekitar 10 nm.

Kata kunci: (p)a-Si:H, AFORS-HET, dangling-bond (DB), efisiensi

Abstract. Numerical validation of homojunction solar cells based on a-Si:H experimental results were physically analyzed using the AFORS-HET (Automat FOR Simulation of HETerostructure) simulator by reviewing the effect of dangling-bond (DB) defects on the (p)a-Si:H layer (N_{tr}) on the performance of solar cell structure TCO/(p)a-Si:H/(i)a-Si:H/(n)a-Si:H/Ag. The variation of the N_{tr} is given according to the experimental results between 5.0×10^{17} – 5.0×10^{19} cm^{-3}/eV operated at different thicknesses of the p-layer accompanied by analysis of the energy band diagram, J-V characteristic curve, electric field profile, and charge carrier concentration. The simulation results show that the solar cell works optimally if the N_{tr} parameter value can be controlled for a value of $< 5.0 \times 10^{18}$ cm^{-3}/eV , where in this condition the efficiency that can be achieved is around 7.68% ($V_{OC} = 947.2$ mV, $J_{SC} = 10.84$ mA/cm²; FF = 74.82%) with p-layer thickness is 10 nm.

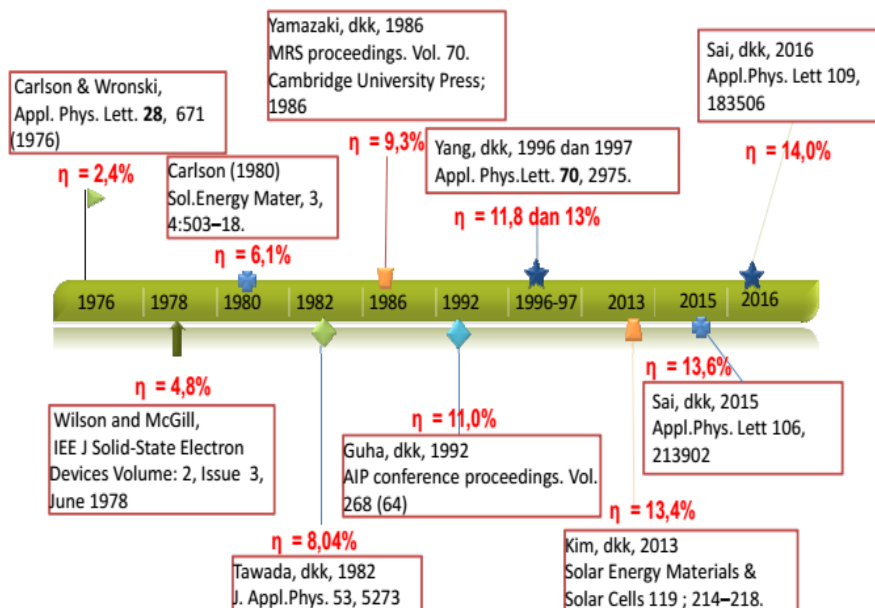
Keywords: (p)a-Si:H, AFORS-HET, dangling-bond (DB), efficiency

1. Pendahuluan

Teknologi sel surya berbasis film tipis dapat dijadikan sebagai alternatif dalam pengembangan teknologi fotovoltaik (PV) didasarkan pada beberapa kelebihan yang dimilikinya, diantaranya fleksibel dalam penggunaan material dengan celah pita optik yang cukup lebar, secara alami tidak beracun, berbiaya rendah, temperatur proses rendah, tahapan fabrikasi yang sederhana, serta dapat diproduksi

dalam skala yang besar [1]. Sel surya berbasis film tipis, seperti halnya silikon amorfus terhidrogenisasi (a-Si:H), *nanocrystalline silicon* (nc-Si:H), CdTe, CIGS, *Dye-Sensitized Solar Cells* (DSSCs), *Organic Solar Cells* (OSCs), dan *Perovskite Solar Cells* (PSCs) dikembangkan dengan biaya murah dan sumber bahan baku yang melimpah di alam, dimana dengan pencapaiannya sekarang sudah mampu bersaing dengan teknologi sel surya berbasis c-Si [2–5].

Sel surya film tipis berbasis silikon amorf (a-Si) memiliki perilaku terkait struktur orde jangkauan pendeknya (amorf) dan keberadaan ikatan lepas (*dangling bond*, DB) yang berimbas pada perilaku sifat optoelektroniknya yang mempengaruhi efisiensi konversi a-Si, sehingga upaya inovasi dilakukan dengan pasivasi hidrogen yang menghasilkan silikon amorf terhidrogenisasi (a-Si:H), tetapi upaya ini menyebabkan terjadinya penurunan konduktivitas sel surya pada saat dipapar cahaya secara kontinu yang dikenal dengan efek Staebler-Wronski (SWE) [6]. Efek SWE terjadi akibat keberadaan atom H dalam ikatan yang menghasilkan peningkatan rapat keadaan cacat ikatan lepas yang terjadi oleh rekombinasi non-radiatif (*non-radiative recombination*) antara elektron dan hole foto-eksitasi (*photoexcited*) pada ikatan lemah Si-Si yang menghubungkan dengan ikatan SiHHSi, serta cacat yang lain yang berkaitan dengan susunan acak atom-atom Si [7]. Pengembangan sel surya berbasis a-Si:H sudah dilakukan dalam kurun waktu 1976-2016 dengan berbagai inovasi dilakukan dalam meningkatkan efisiensi konversinya untuk bisa bersaing dengan teknologi sel surya lainnya, misalnya yang berbasis kristalin silikon (c-Si), dimana efisiensi tertinggi untuk sel surya berbasis a-Si:H dengan struktur *triple-junction* diperoleh sekitar 14.01%, seperti ditunjukkan pada Gambar.1 [8].



Gambar 1. Evolusi peningkatan efisiensi sel surya berbasis a-Si dari tahun ke tahun

Pengembangan sel surya berbasis a-Si:H terus dilakukan, diantaranya upaya peningkatan kualitas lapisan penyusun sel surya p-i-n yang dideposisi menggunakan teknik rf-PECVD memiliki variasi celah pita energi optik antara 1,65–1,84 eV yang diperoleh dari pengenceran hidrogen ($R = [H_2]/[SiH_4] = 0, 16, \text{ dan } 36$ yang menunjukkan peningkatan nilai celah pita energi optik dan penurunan

transmitansi dengan bertambahnya R [9]. Lapisan (i)a-Si:H memegang peranan penting dalam pembangkitan pasangan elektron-hole, sehingga harus memiliki sifat-sifat transport listrik dan kemampuan absorpsi cahaya yang baik. Penambahan doping PH₃ (Phosphine) dengan konsentrasi rendah terhadap lapisan intrinsik menghasilkan peningkatan kinerja sel surya a-Si:H dengan efisiensi 8.85% (V_{OC} = 0.68 V; J_{SC} = 19.43 mA/cm²; FF = 0.67) yang dicapai untuk doping lapisan intrinsik dengan konsentrasi PH₃ sekitar 780 ppm [10]. Selain itu, modifikasi sel surya struktur p-i-n dengan penambahan lapisan intrinsik dengan celah pita energi berbeda menjadi struktur p-i₁-i₂-n memberikan dampak pada peningkatan efisiensi dari 5.61% menjadi 8.86% yang terjadi akibat peningkatan penyerapan cahaya pada lapisan intrinsik sehingga pasangan elektron-hole yang terbentuk menjadi lebih tinggi yang mampu meningkatkan *photogenerated current* dan mengurangi proses rekombinasi pada lapisan intrinsik [11].

Penggunaan simulasi berbantuan komputer digunakan untuk membantu memberikan gambaran dalam pengembangan sel surya berbasis a-Si:H, salah satunya adalah perangkat AFORS-HET (*open source*) yang dikembangkan oleh Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) digunakan untuk mensimulasi sel surya p-i-n berbasis a-Si:H dengan meninjau variasi ketebalan, konsentrasi doping, celah pita energi, penggunaan lapisan TCO (*transparent conductive oxide*), optimasi celah pita energi untuk sel surya *Bifacial Solar Cells* (BFSCs) dilakukan untuk mendapatkan parameter optimum dalam upaya peningkatan efisiensi sel surya a-Si:H [12–14].

Berdasarkan uraian di atas, maka dalam penelitian ini dilakukan pemodelan dan simulasi sel surya struktur TCO/(p)a-Si:H/(i)a-Si:H/(n)a-Si:H/Ag hasil eksperimen dengan teknik rf-PECVD yang diperoleh dari Benigno dan Darminto [15] didasarkan pada tinjauan pengaruh rapat cacat (DOS) pada lapisan (p)a-Si:H (N_{tr}) menggunakan perangkat AFORS-HET dapat digunakan sebagai landasan dalam melakukan fabrikasi, analisis stabilitas dan analisis kinerja sel surya struktur p-i-n a-Si:H.

2. Metode Penelitian

Setiap lapisan semikonduktor sel surya dinyatakan dalam persamaan Poisson dan persamaan transport untuk elektron dan hole dipecahkan dalam model persamaan 1D. Model lapisan “*bulk*” dalam AFORS-HET untuk menjelaskan model matematis sel surya p-i-n menggunakan model Standar Semikonduktor [16]. Model persamaan Poisson dan persamaan transport yang dipecahkan pada setiap lapisan semikonduktor dinyatakan dalam bentuk 1D:

$$\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r(x)}{q} \frac{\partial \psi^2(x, t)}{\partial x^2} = p(x, t) - n(x, t) + N_D(x) - N_A(x) + \sum_{trap} \rho_{trap}(x, t) \quad (1)$$

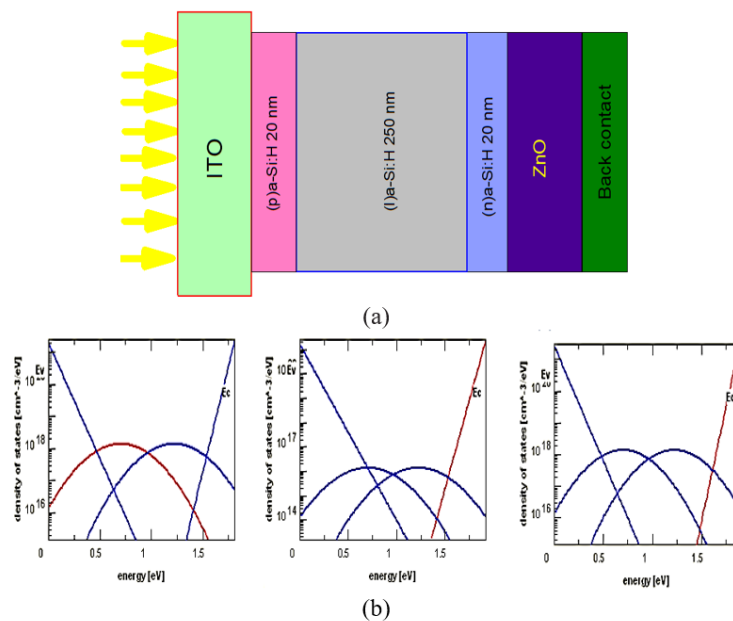
$$-\frac{1}{q} \left(\frac{\partial J_n(x, t)}{\partial x} \right) = G_n(x, t) + R_n(x, t) - \frac{\partial n(x, t)}{\partial t} \quad (2)$$

$$+\frac{1}{q} \left(\frac{\partial J_p(x, t)}{\partial x} \right) = G_p(x, t) - R_p(x, t) - \frac{\partial p(x, t)}{\partial t} \quad (3)$$

dimana $\varepsilon_0 \varepsilon_r$ menyatakan konstanta dielektrik, $\psi(x, t)$ merupakan potensial listrik, q menyatakan muatan listrik, $n(x, t)$ dan $p(x, t)$ menyatakan rapat elektron dan

hole, $N_D(x)$ dan $N_A(x)$ menyatakan rapat doping (donor dan akseptor) pada titik x , ρ_{trap} menyatakan rapat cacat dari cacat muatan yang menunjukkan jumlah muatan yang terperangkap pada posisi energi E di dalam celah pita (tipe cacat dapat berupa keadaan tidak ditempati (*empty*) atau ditempati dengan elektron tunggal atau ganda, $G(x, t)$ menyatakan laju generasi pembawa muatan, $R(x, t)$ menyatakan laju rekombinasi, J_n (J_p) menyatakan rapat arus elektron (hole).

Perangkat AFORS-HET bekerja berdasarkan hasil pemecahan persamaan Poisson 1D dan persamaan kontinuitas untuk elektron dan hole menggunakan Statistik rekombinasi Shockley–Read–Hall (SRH). Demikian pula untuk pembangkitan pasangan elektron-hole yang dihasilkan pada lapisan absorber diestimasi dengan menggunakan persamaan absorpsi Beer–Lambert menggunakan model optik dalam AFORS-HET. Rapat keadaan terlokalisasi (*localized state density*) menggambarkan lapisan a-Si:H yang dinyatakan sebagai *exponential band tail defect states (Urbach tails)* dan keadaan *Gaussian mid-gap (dangling bond)*. Gambar 2. Menunjukkan skema sel surya struktur TCO (ITO)/(p)a-Si:H/(i)a-Si:H/(n)a-Si:H/ZnO/Ag. Dalam simulasi, ketinggian barrier pada kontak belakang (ϕ_{bL}) ditentukan sebesar 0.2 eV ($\sim WB_{TCO} = 4.0$ eV) dan ketinggian barrier pada antar-muka ITO/(p) a-Si:H (ϕ_{b0}) ditentukan berdasarkan nilai fungsi kerja WF_{TCO} [17]. Asumsi bahwa pada bagian belakang struktur sel surya tidak disertai dengan pemantul belakang (R_B), sehingga koefisien refleksinya 0, dan koefisien refleksi kontak depan (R_F) dibuat sekitar 0.2 [18]. Sumber cahaya yang digunakan dalam simulasi menggunakan AM1.5G dengan rapat daya penyinaran (*power density*) 100 mW/cm² dan temperatur operasional perangkat sel surya dipertahankan pada 300 K. Dalam simulasi, pengaruh rapat cacat DB pada lapisan (p)a-Si:H terhadap kinerja sel surya ditinjau berdasarkan hasil eksperimen, yaitu antara $5.0 \times 10^{17} - 5.0 \times 10^{19}$ cm⁻³/eV yang dioperasikan dengan ketebalan lapisan (p)a-Si:H pada 10, 15 dan 20 nm yang dianalisis menggunakan kurva J-V, diagram pita energi, profil medan listrik, dan profil konsentrasi muatan [19].



Gambar 2. a) Skematik sel surya struktur TCO (ITO)/(p)a-Si:H/(i)a-Si:H/(n)a-Si:H/ZnO/Ag
 (b) Model DOS untuk lapisan-p, -i, dan -n

Tabel 1. Parameter input AFORS-HET untuk mensimulasi sel surya p-i-n a-Si:H

Material dan parameter kontak	(p)a-Si:H	(i)a-Si:H	(n)a-Si:H
Ketebalan (nm)	10-20	250	20
Konstanta dielektrik	11.9	11.9	11.9
Afinitas elektron (eV)	3.80	3.80	3.80
Celah pita (eV)	1.81	1.92	1.88
Rapat pita konduksi (valensi) efektif (cm ⁻³)	2.5 x 10 ²⁰	2.5 x 10 ²⁰	2.5 x 10 ²⁰
Konsentrasi akseptor, Na (cm ⁻³)	5.0 x 10 ¹⁷	0	0
Konsentrasi donor, Nd (cm ⁻³)	0	0	1.0 x 10 ¹⁹
Mobilitas electron (hole) (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	10 (1)	20 (2)	10 (1)
Kecepatan termal elektron (hole) (cms ⁻¹)	1.0 x 10 ⁷	1.0 x 10 ⁷	1.0 x 10 ⁷
Parameter tail states	(p)a-Si:H	(i)a-Si:H	(n)a-Si:H
Rapat cacat pada konduksi (valensi) band edge (cm ⁻³ eV ⁻¹)	1.0 x 10 ²¹ (1.0 x 10 ²¹)	1.0 x 10 ²¹ (1.0 x 10 ²¹)	1.0 x 10 ²¹ (1.0 x 10 ²¹)
Energi Urbach pada konduksi (valensi) band tail (eV)	0.03(0.06)	0.03(0.06)	0.03(0.06)
Capture cross section σ_e (σ_h) untuk konduksi band tail (cm ²)	1.0 x 10 ⁻¹⁷ (1.0 x 10 ⁻¹⁵)	1.0 x 10 ⁻¹⁷ (1.0 x 10 ⁻¹⁵)	1.0 x 10 ⁻¹⁷ (1.0 x 10 ⁻¹⁵)
Capture cross section σ_e (σ_h) untuk valensi band tail (cm ²)	1.0 x 10 ⁻¹⁵ (1.0 x 10 ⁻¹⁷)	1.0 x 10 ⁻¹⁵ (1.0 x 10 ⁻¹⁷)	1.0 x 10 ⁻¹⁵ (1.0 x 10 ⁻¹⁷)
Parameter Dangling-bond states	(p)a-Si:H	(i)a-Si:H	(n)a-Si:H
DOS Gaussian (cm ⁻³ /eV)	5.0 x 10 ¹⁷ -5.0 x 10 ¹⁹	8.0 x 10 ¹⁵	2.5 x 10 ²¹
Gaussian peak energy for donor(acceptor) (eV)	1.22(0.70)	1.22(0.70)	1.22(0.70)
Standard deviation of Gaussian for donor (acceptor) (eV)	0.23(0.23)	0.23(0.23)	0.23(0.23)
Capture cross section σ_e (σ_h) for donor-like Gaussian States (cm ²)	1.0 x 10 ⁻¹⁴ (1.0 x 10 ⁻¹⁵)	1.0 x 10 ⁻¹⁴ (1.0 x 10 ⁻¹⁵)	1.0 x 10 ⁻¹⁴ (1.0 x 10 ⁻¹⁵)
Capture cross section σ_e (σ_h) for acceptor-like Gaussian states (cm ²)	1.0 x 10 ⁻¹⁵ (1.0 x 10 ⁻¹⁴)	1.0 x 10 ⁻¹⁵ (1.0 x 10 ⁻¹⁴)	1.0 x 10 ⁻¹⁵ (1.0 x 10 ⁻¹⁴)

Parameter input lain yang digunakan dalam simulasi mengacu pada Tabel. 1 [15,17,20,21]. Parameter yang digunakan untuk mengukur kinerja sel surya yang diperoleh dengan mengekstraksi kurva J-V, meliputi [17]:

$$J_{sc} = J_L - J_0 \left(\exp \left(\frac{qV}{nKT} \right) - 1 \right) \quad (4)$$

$$V_{oc} = \frac{nKT}{q} \left(\ln \left(\frac{J_{sc}}{J_0} \right) + 1 \right) \quad (5)$$

$$E_{ff} = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} \quad (6)$$

$$FF = \frac{V_m J_m}{V_{oc} J_{sc}} = \frac{P_m}{V_{oc} J_{sc}} \quad (7)$$

dimana J_{sc} menyatakan rapat arus pada *short circuit current*, J_L menyatakan rapat arus foto, J_0 menyatakan rapat arus gelap balik, V menyatakan tegangan termal pada sambungan, KT menyatakan energi termal, n menyatakan faktor ideal, V_{oc} menyatakan tegangan rangkaian terbuka, V_m menyatakan tegangan maksimum, J_m

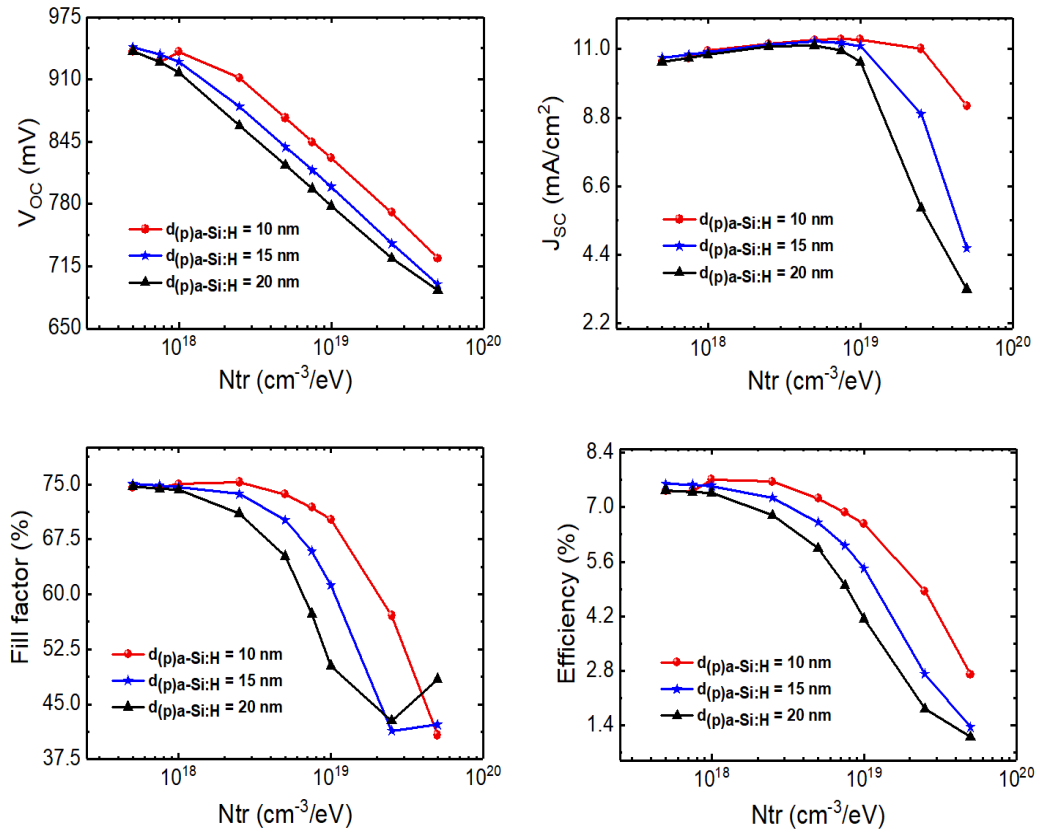
menyatakan rapat arus maksimum, P_m menyatakan daya maksimum, FF menyatakan fill factor, dan E_{ff} menyatakan efisiensi konversi..

3. Hasil dan Pembahasan

Untuk mempelajari pengaruh rapat cacat DB pada lapisan (p)a-Si:H (N_{tr}) terhadap kinerja sel surya struktur p-i-n berbasis a-Si:H, maka dilakukan tinjauan pada daerah antar-muka ITO/(p)a-Si:H dan (p)a-Si:H/(i)a-Si:H dengan melakukan perbandingan terhadap kurva karakteristik J-V (dalam kondisi gelap dan disinari), diagram pita energi, profil medan listrik, profil konsentrasi pembawa muatan, dan efisiensi kuantum (QE) terhadap sel surya p-i-n yang dioperasikan pada rapat cacat DB berbeda. Selama simulasi, fungsi kerja pada kontak depan ITO/(p)a-Si:H (WF_{ITO}) dipertahankan pada nilai 5.4 eV ($\sim\phi_{b0} = 1.60$ eV), konsentrasi doping pada lapisan (p)a-Si:H dan (n)a-Si:H dipertahankan pada nilai $5.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ dan $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, celah pita energi untuk ketiga lapisan a-Si:H masing-masing 1.81 eV, 1.92 eV, dan 1.88 eV. Sementara itu, nilai rapat cacat DB pada lapisan (p)a-Si:H divariasikan antara 5.0×10^{17} - $5.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}/\text{eV}$ yang dioperasikan pada ketebalan 10, 15 dan 20 nm, sedangkan ketebalan lapisan (i)a-Si:H dan (n)a-Si:H dipertahankan pada 250 dan 20 nm.

Gambar. 3(a)-(d) menunjukkan pengaruh N_{tr} sebagai rapat cacat puncak Gaussian yang dinyatakan sebagai donor-like ($N_{tr}^{+/0}$) = akseptor-like ($N_{tr}^{0/-}$) = N_{tr} terhadap keluaran listrik sel surya p-i-n a-Si:H yang dioperasikan pada ketebalan lapisan (p)a-Si:H berbeda. Peningkatan nilai N_{tr} pada lapisan emitter (p) berkaitan dengan peningkatan keadaan cacat yang berpengaruh pada peningkatan proses rekombinasi pada lapisan (p)a-Si:H, pembentukan *band-offset* pada pita valensi (ΔE_V) sebagai perangkap pembawa muatan (hole), dan terbentuknya kontak Schottky pada antar-muka ITO/(p)a-Si:H. Gambar. 3(a), 3(c) dan 3(d) menunjukkan kecenderungan nilai V_{OC} , FF dan E_{ff} pada ketiga ketebalan (p)a-Si:H berbeda cenderung bernilai konstan dengan meningkatnya rapat cacat $N_{tr} = 1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}/\text{eV}$ berkaitan dengan konsentrasi hole pada antar-muka ITO/(p)a-Si:H dan (p)a-Si:H/(i)a-Si:H dapat dipertahankan tinggi jika nilai $N_{tr, \text{maksimum}} = 2 \times N_A$ (konsentrasi doping (p)a-Si:H) tetap dapat dipenuhi [22].

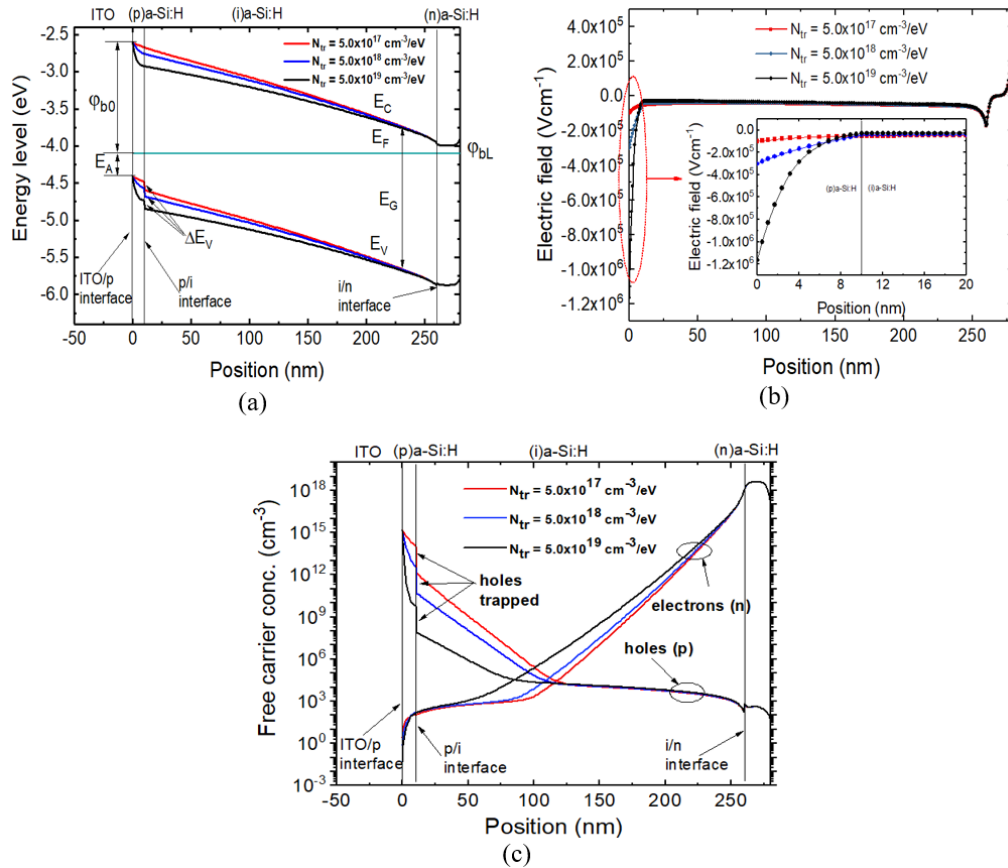
Selanjutnya, nilai V_{OC} , FF dan E_{FF} mengalami penurunan secara drastis dengan meningkatnya nilai N_{tr} yang berkaitan dengan peningkatan rekombinasi yang menyebabkan penurunan nilai *built-in potential* (V_{bi}) yang berpengaruh dengan penurunan nilai V_{OC} dan FF, secara signifikan merujuk pada penurunan nilai E_{ff} . Hal berbeda dapat diamati untuk J_{SC} , seperti ditunjukkan pada Gambar 3(b), dimana nilainya cenderung secara perlahan meningkat dengan meningkatnya N_{tr} pada ketebalan yang berbeda yang menunjukkan untuk $N_{tr} \leq 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}/\text{eV}$ kurang sensitif terhadap perubahan cacat lapisan (p)a-Si:H, dimana menunjukkan pada jangkauan N_{tr} , absorpsi cahaya dapat dipertahankan untuk bisa sampai pada lapisan intrinsik (i)a-Si:H untuk menghasilkan pasangan elektron-hole lebih banyak, tetapi untuk $N_{tr} > 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}/\text{eV}$ nilai J_{SC} secara drastis mengalami penurunan akibat meningkatnya absorpsi parasitik pada lapisan (p)a-Si:H yang menyebabkan berkurangnya foton yang masuk ke lapisan intrinsik mengalami penurunan.



Gambar 3. Pengaruh rapat cacat pada lapisan (p)a-Si:H (N_{tr}) terhadap kinerja sel surya p-i-n a-Si:H yang dinyatakan dengan (a) tegangan terbuka (V_{OC}); (b) arus hubung pendek (J_{SC}); (c) fill factor (FF) dan (d) efisiensi konversi (E_{ff})

Gambar. 4(a)-(b) menunjukkan diagram pita energi dan profil medan listrik pada antar-muka ITO/(p)a-Si:H dan (p)a-Si:H/(i)a-Si:H sel surya p-i-n a-Si:H dalam kondisi keseimbangan termal yang dioperasikan pada tiga nilai N_{tr} , yaitu 5.0×10^{17} , 5.0×10^{18} , dan $5.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}/\text{eV}$ dengan nilai $WF_{ITO} = 5.4 \text{ eV}$ (band-bending kecil dipermukaan) yang menunjukkan bahwa kontak depan pada antar-muka ITO/(p)a-Si:H hampir menyerupai kontak ohmik (schottky barrier diabaikan). Gambar 4(a) menunjukkan peningkatan N_{tr} menyebabkan meningkatnya *band-offset* (ΔE_V) dan menunjukkan pita valensi menurun menjauhi tingkat energi Fermi, hal ini berpengaruh pada penurunan *built-in potential* yang berimplikasi pada penurunan V_{OC} dan FF, sehingga E_{ff} mengalami penurunan secara simultan. Peningkatan N_{tr} menyebabkan terjadinya peningkatan rekombinasi akibat konsentrasi pembawa muatan mayoritas (hole) yang terperangkap pada antar-muka (p)a-Si:H/(i)a-Si:H beranehilisasi dengan elektron yang berdifusi dari lapisan (n)a-Si:H melalui lapisan intrinsik. Hal ini dikonfirmasi dengan profil medan listrik (Gambar. 4(b)), dimana peningkatan nilai N_{tr} menyebabkan terjadinya peningkatan ketidak-seimbangan pembawa muatan pada antar-muka ITO/(p)a-Si:H dan antar-muka (p)a-Si:H/(i)a-Si:H (Gambar. 4(c)) yang menyebabkan peningkatan *built-in* medan listrik bernilai (-) karena berarah dari (n)a-Si:H menuju (p)a-Si:H. Peningkatan profil medan listrik pada daerah antar-muka ITO/(p)a-Si:H akibat peningkatan konsentrasi N_{tr} sepenuhnya tidak menyebabkan hole bergerak menuju permukaan melalui lapisan

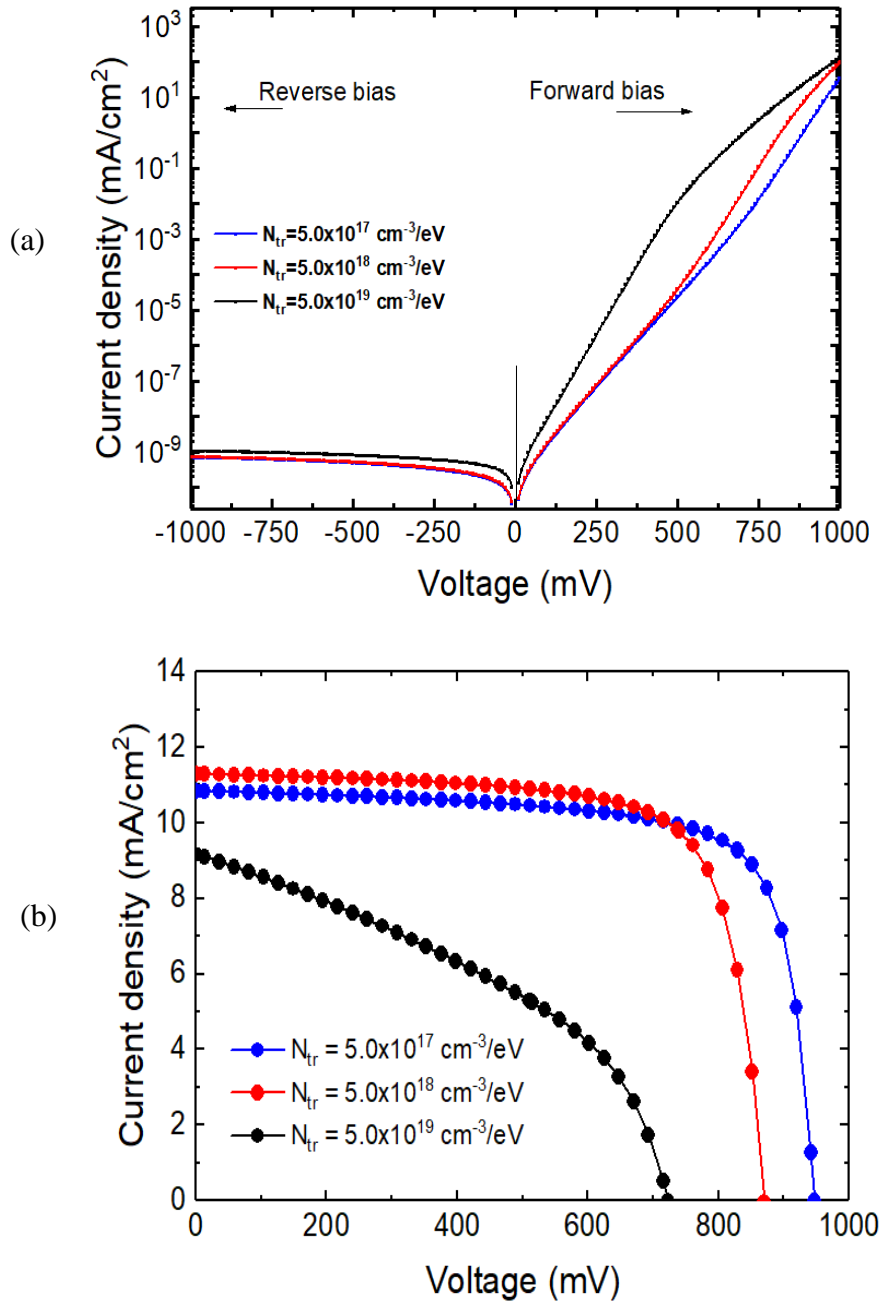
(p)a-Si:H karena jumlah hole yang terperangkap pada *band-offset* pita valensi mengalami proses rekombinasi dengan elektron. Hal ini yang menyebabkan peningkatan rapat cacat DB pada lapisan (p)a-Si:H menurunkan *built-in potential* yang berimbas pada penurunan nilai V_{OC} dan FF.



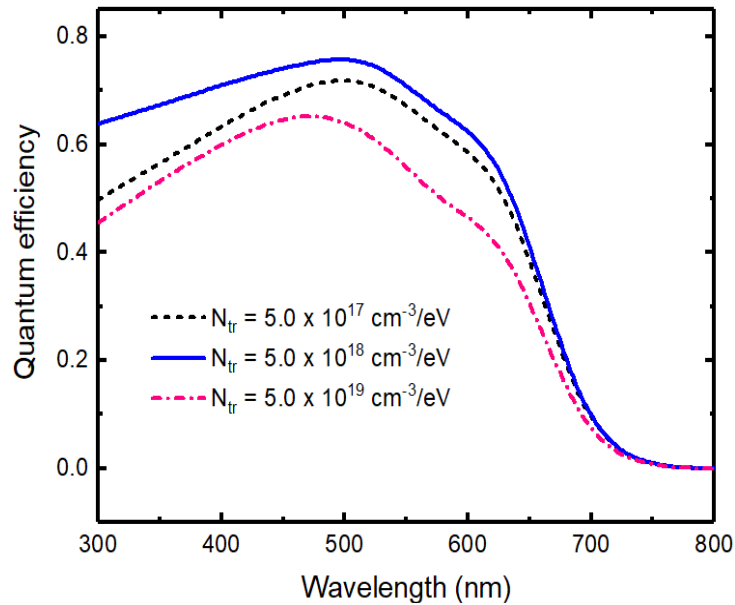
Gambar 4. Menunjukkan (a) diagram pita energi dalam kondisi kesetimbangan termal; (b) profil medan listrik; (c) profil pembawa muatan pada antara-muka ITO/(p)a-Si:H dan (p)a-Si:H/(i)a-Si:H sel surya p-i-n a-Si:H yang dioperasikan pada $N_{tr} = 5.0 \times 10^{17}$, 5.0×10^{18} , $5.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}/\text{eV}$

Gambar 5(a) menunjukkan kurva karakteristik J-V dalam kondisi gelap pada sel surya p-i-n yang dioperasikan pada rapat cacat N_{tr} lapisan (p)a-Si:H berbeda. Rapat arus gelap (J_0) pada sel surya p-i-n berbasis a-Si:H dikendalikan sepenuhnya oleh lima mekanisme, yaitu injeksi hole dan elektron pada kontak depan dan belakang, difusi dan *drift* elektron dan hole pada lapisan "bulk", dan rekombinasi pasangan elektron-hole pada daerah aktif (intrinsik)[18]. Pada bias mundur (-1000-0 mV), peningkatan nilai N_{tr} menyebabkan terjadinya peningkatan rekombinasi akibat konsentrasi pembawa muatan mayoritas (hole) yang terperangkap pada antar-muka (p)a-Si:H/(i)a-Si:H beranihilisasi dengan elektron yang berdifusi dari lapisan (n)a-Si:H melalui lapisan intrinsik. Pada saat $V = -1000 \text{ mV}$ (bias mundur) nilai rapat arus jenuh mundur (*reverse saturation current density*), J_0 , untuk ketiga nilai N_{tr} secara signifikan tidak berpengaruh pada J_0 , yaitu $6.93 \times 10^{-10} \text{ mA/cm}^2$ ($N_{tr} = 5.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}/\text{eV}$), $7.24 \times 10^{-10} \text{ mA/cm}^2$ ($N_{tr} = 5.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}/\text{eV}$) dan $1.05 \times 10^{-9} \text{ mA/cm}^2$ ($N_{tr} = 5.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}/\text{eV}$).

mA/cm^3 ($N_{tr} = 5.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}/\text{eV}$). Hal ini berbeda untuk bias maju (*forward bias*), tidak teramati semakin besar nilai N_{tr} pada jangkauan tegangan aplikasi, nilainya semakin besar dan teramati bahwa daerah rapat arus jenuh tidak terjadi, hal ini disebabkan penggunaan $W_{ITO} = 5.4 \text{ eV}$ menunjukkan bahwa fungsi kerja kontak depan netral (tanpa band-bending) dengan tanpa kehadiran penghalang Schottky (*Schottky barrier*) pada antar-muka ITO/(p)a-Si:H ($W_{ITO}^n = 5.4 \text{ eV}$).



Gambar 5. Kurva karakteristik J-V sel surya p-i-n a-Si:H dalam kondisi (a) gelap; (b) disinari



Gambar 6. Efisiensi kuantum sel surya p-i-n a-Si:H pada nilai $N_{tr} = 5.0 \times 10^{17}$, 5.0×10^{18} , dan $5.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}/\text{eV}$ yang diuji pada jangkauan spektrum cahaya antara 300 – 800 nm

Sementara itu, pada kondisi disinari kurva karakteristik J-V menunjukkan hasil yang cukup informatif terhadap pengaruh rapat cacat DB pada lapisan (p)a-Si:H, seperti ditunjukkan pada Gambar. 5(b). Peningkatan N_{tr} menunjukkan kualitas lapisan (p)a-Si:H semakin kecil, sehingga secara langsung berpengaruh pada kinerja sel surya p-i-n a-Si:H yang dioperasikan pada doping moderat lapisan (p)a-Si:H (N_A) $5.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, ketebalan 10 nm dan N_{tr} sekitar $5.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}/\text{eV}$ diperoleh efisiensi sangat rendah sekitar 2.75% ($V_{OC} = 723.1 \text{ mV}$, $J_{SC} = 9.17 \text{ mA}/\text{cm}^2$; $FF = 40.78\%$). Selain itu, untuk N_{tr} dalam jangkauan $N_{tr, \text{maksimum}} = 2 \times N_A$ yang dioperasikan pada sel surya p-i-n a-Si:H memberikan hasil yang cukup signifikan. Pada saat rapat cacat N_{tr} rendah ($N_{tr} = 5.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}/\text{eV}$) diperoleh efisiensi sekitar 7.68% ($V_{OC} = 947.2 \text{ mV}$, $J_{SC} = 10.84 \text{ mA}/\text{cm}^2$; $FF = 74.82\%$), sedangkan pada N_{tr} moderat ($N_{tr} = 5.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}/\text{eV}$) diperoleh efisiensi 7.24% ($V_{OC} = 870 \text{ mV}$, $J_{SC} = 11.29 \text{ mA}/\text{cm}^2$; $FF = 73.73\%$). Pada jangkauan rapat cacat DB $N_{tr} \leq 5.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}/\text{eV}$, sel surya p-i-n a-Si:H teramati kurang sensitif terhadap peningkatan N_{tr} dimana dalam skala teknis dapat dipenuhi dengan meningkatkan kualitas lapisan (p)a-Si:H pada proses fabrikasi, misalnya laju deposisi, temperatur substrat, tekanan, dan sebagainya.

Selanjutnya hasil ini dikonfirmasi dengan efisiensi kuantum (QE) yang mengindikasikan kemampuan sel surya p-i-n a-Si:H untuk menyerap cahaya dan menghasilkan pasangan elektron-hole sebanyak mungkin yang tergantung pada kualitas material a-Si:H yang digunakan. Gambar. 6 menunjukkan efisiensi kuantum sel surya p-i-n a-Si:H yang dioperasikan pada jangkauan panjang gelombang cahaya antara 300-800 nm (daerah biru-merah). Hasil simulasi menggunakan software AFORS-HET menunjukkan bahwa sel surya p-i-n yang dioperasikan pada nilai N_{tr} memiliki respon yang baik pada jangkauan panjang gelombang 300-520 nm (daerah biru) yang berimplikasi pada peningkatan nilai J_{SC} .

Hasil ini dikonfirmasi dengan keterkaitan antara nilai QE terhadap nilai J_{sc} yang dinyatakan sebagai [17]:

$$J_{sc} = \int_{300 \text{ nm}}^{800 \text{ nm}} \left[\frac{q\lambda}{hc} \phi_{AM1.5}(\lambda) EQE(\lambda) \right] d\lambda \quad (8)$$

$$EQE(\lambda) = \frac{J_{sc}(\lambda)}{q\Phi(\lambda)} = \frac{J_{sc}}{q} \left(\frac{hv}{P_{opt}} \right) \quad (9)$$

4. Kesimpulan

Sel surya p-i-n berbasis a-Si:H telah berhasil disimulasi menggunakan software AFORS-HET dengan kajian utama terkait pengaruh rapat cacat DB yang divariasikan dengan ketebalan lapisan (p)a-Si:H terhadap kinerja sel surya yang dianalisis menggunakan diagram pita energi, profil medan listrik, profil konsentrasi pembawa muatan, kurva karakteristik J-V dan Kurva QE. Hasil simulasi menunjukkan kinerja sel surya yang dioperasikan pada $N_{tr} \leq 5.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}/\text{eV}$ (nilai kritis) secara signifikan tidak terpengaruh dengan peningkatan N_{tr} , tetapi dengan meningkatnya nilai N_{tr} melebihi nilai kritisnya terjadi penurunan kinerja sel surya yang dinyatakan dengan besaran parameter yang diekstrak dari kurva J-V. Nilai optimum pada pengoperasian ini sebagai bentuk rekomendasi menggunakan N_{tr} moderat ($5.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}/\text{eV}$) yang sesuai dengan hasil yang diperoleh dari eksperimen, dimana diperoleh efisiensi 7.24% ($V_{OC} = 870 \text{ mV}$, $J_{SC} = 11.29 \text{ mA}/\text{cm}^2$; $FF = 73.73\%$) pada saat dioperasikan pada konsentrasi doping lapisan (p)a-Si:H (N_A) $5.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ dan ketebalan 10 nm. Kualitas lapisan yang digambarkan dengan rapat cacat DB pada sel surya p-i-n dapat diminimalisir dengan mempertimbangkan parameter utama yang berpengaruh pada proses fabrikas sel surya, diantaranya: laju deposisi, temperatur substrat, tekanan, daya rf, waktu deposisi dan sebagainya.

Ucapan Terima Kasih

Dalam kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) atas penggunaan perangkat AFORS-HET (*open source*)

Daftar Pustaka

1. Qarony W, Hossain MI, Hossain MK, Uddin MJ, Haque A, Saad AR, et al. Efficient amorphous silicon solar cells: characterization, optimization, and optical loss analysis. *Results in Physics*. [Online] 2017;7: 4287–4293.
2. Barbato M, Artegiani E, Bertocello M, Meneghini M, Trivellin N, Mantoan E, et al. CdTe solar cells: technology, operation and reliability. *Journal of Physics D: Applied Physics*. [Online] IOP Publishing; 2021;54(33): 333002.
3. Kokkonen M, Talebi P, Zhou J, Asgari S, Soomro SA, Elsehrawy F, et al. Advanced research trends in dye-sensitized solar cells. *J. Mater. Chem. A*. [Online] The Royal Society of Chemistry; 2021;9(17): 10527–10545.

4. Kumar NS, Naidu KCB. A review on perovskite solar cells (PSCs), materials and applications. *Journal of Materiomics*. [Online] 2021;7(5): 940–956.
5. Sharma M, Panigrahi J, Komarala VK. Nanocrystalline silicon thin film growth and application for silicon heterojunction solar cells: a short review. *Nanoscale Adv.* [Online] RSC; 2021;3(12): 3373–3383.
6. Stuckelberger M, Biron R, Wyrsh N, Haug F-J, Ballif C. Review: Progress in solar cells from hydrogenated amorphous silicon. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. [Online] 2017;76: 1497–1523.
7. Bouhdjar AF, Ayat L, Meftah A, Sengouga N, Meftah A. Computer modelling and analysis of the photodegradation effect in a-Si:H p–i–n solar cell. *Journal of Semiconductors*. [Online] IOP Publishing; 2015;36(1): 014002.
8. Lee TD, Ebong AU. A review of thin film solar cell technologies and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. [Online] 2017;70: 1286–1297.
9. Cahyono Y, Yahya E, Zainuri M, Pratapa S, Darminto. Quantum Confinement in an Intrinsic a-Si:H Thin Film Deposited on Soda Lime Glass Substrate Using PECVD. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*. [Online] 2018;19(1): 69–73.
10. Son WH, Lee TY, Choi SY, Jung D. Effect of phosphorus doping on the performance of pin-type a-Si:H thin-film solar cells. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. [Online] Taylor & Francis; 2018;662(1): 25–31.
11. Prayogi S, Cahyono Y, Iqballudin I, Stchakovsky M, Darminto D. 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*. [Online] 2021;32(6): 7609–7618.
12. Hamdani D, Cahyono Y, Yudoyono G, Darminto. Band Gap Optimization of Thin Film a-Si:H Bifacial Solar Cells (BFSCs) Using AFORS-HET. *Functional Properties of Modern Materials II*. [Online] Trans Tech Publications Ltd; 2019. p. 409–414.
13. Sharma M, Chaudhary D, Dwivedi N, Sudhakar S, Kumar S. Simulating the Role of TCO Materials, their Surface Texturing and Band Gap of Amorphous Silicon Layers on the Efficiency of Amorphous Silicon Thin Film Solar Cells. *Silicon*. [Online] 2017;9(1): 59–68. Available from: doi:10.1007/s12633-015-9331-6.
14. Singh S, Kumar S, Dwivedi N. Band gap optimization of p–i–n layers of a-Si:H by computer aided simulation for development of efficient solar cell. *Solar Energy*. [Online] 2012;86(5): 1470–1476.
15. Benigno I, Darminto D. Effect of Intrinsic Layer Energy Gap and Thicknesses Optimization on the Efficiency of p-i-n Amorphous Silicon Solar Cell. 2017.
16. Stangl R, Leendertz C, Haschke J. Numerical Simulation of Solar Cells and Solar Cell Characterization Methods: the Open-Source on Demand Program AFORS-HET. *Solar Energy*. [Online] IntechOpen; 2010; Available from: doi:10.5772/8073.
17. Hamdani D, Cahyono Y, Yudoyono G, Darminto D. Performances analysis of heterojunction solar cells through integration of hydrogenated nanocrystalline silicon bilayer by using numerical study. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. [Online] Taylor & Francis; 2021: 1–20. Available from: doi:10.1080/15421406.2021.1922226.

18. Belfar A. Simulation study of the a-Si:H/nc-Si:H solar cells performance sensitivity to the TCO work function, the band gap and the thickness of i-a-Si:H absorber layer. *Solar Energy*. [Online] 2015;114: 408–417.
19. Zhang L, Das UK, Shu Z, Liu H, Birkmire RW, Hegedus SS. Experimental and simulated analysis of p a-Si:H defects on silicon heterojunction solar cells: trade-offs between VOC and FF. 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). [Online] 2015. p. 1–5. A.
20. Crupi I, Ruggeri FS, Grasso A, Ruffino F, Catania G, Piro AM, et al. Influence of the electro-optical properties of an α -Si:H single layer on the performances of a pin solar cell. *Thin Solid Films*. [Online] 2012;520(11): 4036–4040.
21. Zhang L, Das UK, Shu Z, Liu H, Birkmire RW, Hegedus SS. Experimental and simulated analysis of p a-Si:H defects on silicon heterojunction solar cells: trade-offs between VOC and FF. 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). [Online] 2015. p. 1–5. A.
22. Ghannam M, Shehadah G, Abdulaheem Y, Poortmans J. On the possible role of the interfacial inversion layer in the improvement of the performance of hydrogenated amorphous silicon/crystalline silicon heterojunction solar cells [HIT]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. [Online] 2015;132: 320–328.