

# Generasi Sel Fotovoltaik Dan Arah Penelitian Saat Iniber Basis Bahan Dasar Silicon Tinjauan

**Jamilah Husna, Armansyah, Zulfadli Pelawi**

Staf Pengajar Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik UISU

[miila\\_jv@yahoo.com](mailto:miila_jv@yahoo.com); [armansyah@ft.uisu.ac.id](mailto:armansyah@ft.uisu.ac.id)

## Abstrak

*Tujuan dari makalah ini adalah untuk membahas perkembangan generasi sel fotovoltaik dan arah penelitian saat ini yang berfokus pada pengembangan dan teknologi manufakturnya. Pendahuluan menjelaskan pentingnya fotovoltaik dalam konteks perlindungan lingkungan, serta penghapusan sumber fosil. Hal ini kemudian berfokus pada menghadirkan generasi sel fotovoltaik yang diketahui hingga saat ini, terutama dalam hal efisiensi konversi tenaga surya menjadi listrik, serta teknologi pembuatannya. Secara khusus, sel fotovoltaik perkembangan dunia solar Panel dari generasi pertama sehingga ke generasi terkini dan tren terkini di bidangnya, termasuk sel multi-persimpangan dan sel dengan tingkat energi menengah pada pita silikon juga dibahas. Kemudian berfokus pada menghadirkan generasi sel fotovoltaik yang diketahui hingga saat ini, terutama dalam hal efisiensi konversi tenaga surya menjadi listrik, serta teknologi pembuatannya. Kami juga menyajikan diantaranya perkembangan terkini dalam teknologi pembuatan sel fotovoltaik, dengan menggunakan sel fotovoltaik berbasis graphene generasi keempat dan perkembangan terkini di dunia panel listrik berbasis sel surya..*

**Kata Kunci :** Fotovoltaik, Silicon, Solar Sel, Peroskite, Organik, Energi

## I. PENDAHULUAN

Kekhawatiran terhadap perubahan iklim dan peningkatan permintaan listrik, antara lain, karena pertumbuhan populasi yang terus meningkat, memerlukan upaya untuk beralih dari metode produksi energi konvensional. Meningkatnya kadar karbon dioksida di atmosfer akibat penggunaan bahan bakar fosil merupakan salah satu faktor penyebab perubahan iklim yang sedang berlangsung. Peralihan ke energi terbarukan akan menghasilkan energi dengan dampak lingkungan yang lebih kecil dibandingkan sumber bahan bakar fosil (1). Kami dapat memanfaatkan potensi penuh energi sinar matahari untuk mengembangkan teknologi pemanenan energi terbaik yang mampu mengubah energi matahari menjadi listrik. Energi matahari yang digunakan saat ini sangat terbatas, yaitu 0,015% digunakan untuk produksi listrik, 0,3% untuk pemanasan, dan 11% digunakan dalam fotosintesis alami biomassa. Sebaliknya, sekitar 80–85% kebutuhan energi global dipenuhi oleh bahan bakar fosil. Kesulitan dengan bahan bakar fosil adalah sumber dayanya yang terbatas dan tidak ramah lingkungan karena emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkannya (2). Misalnya, untuk setiap ton batu bara yang dibakar, satu ton karbon dioksida dilepaskan ke atmosfer. Karbon dioksida yang dilepaskan ini beracun bagi lingkungan dan merupakan penyebab utama pemanasan global, efek rumah kaca, perubahan iklim, dan penipisan ozon. Kebutuhan untuk menemukan bentuk-bentuk energi baru terbarukan sangatlah relevan dan mendesak saat ini. Itulah sebabnya umat manusia harus mencari sumber energi alternatif untuk

menyediakan masa depan yang bersih dan berkelanjutan. Dalam konteks ini, energi surya merupakan pilihan terbaik di antara semua sumber energi alternatif terbarukan karena aksesibilitasnya yang luas, universalitas, dan sifatnya yang ramah lingkungan (3). Sel surya telah memberikan solusi terhadap krisis energi dan pencemaran lingkungan di era yang didorong oleh energi karena potensinya dalam memanfaatkan energi surya.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

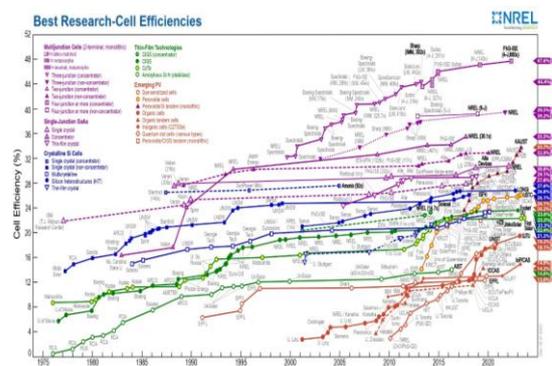
Metrik atau standar yang paling umum digunakan untuk mengevaluasi kinerja teknologi fotovoltaik adalah efisiensi konversi, yang menyatakan rasio input energi surya menjadi energi keluaran listrik. Efisiensi menggabungkan beberapa karakteristik komponen sistem, seperti arus hubung singkat, tegangan rangkaian terbuka, dan faktor pengisian, yang pada gilirannya adalah tergantung pada fitur bahan dasar dan cacat produksi (4). Efektivitas biaya pembuatan sel fotovoltaik dan efisiensinya bergantung pada bahan pembuatnya. Banyak penelitian di bidang ini telah dilakukan untuk menemukan material yang paling efisien dan hemat biaya untuk membangun sel fotovoltaik. Spesifikasi material ideal untuk sel surya PV antara lain sebagai berikut:

- Sel-sel tersebut diharapkan memiliki celah pita antara 1,1 dan 1,7 eV;
- Harus mempunyai struktur pita langsung;
- Harus mudah diakses dan tidak beracun; Dan
- Harus memiliki efisiensi konversi fotovoltaik yang tinggi

Masalah utama dalam bidang pengembangan sel fotovoltaik adalah pengembangan metode untuk mencapai efisiensi setinggi mungkin dengan biaya produksi serendah mungkin. Meningkatkan efisiensi sel surya dapat dilakukan dengan menggunakan cara yang efektif untuk mengurangi kerugian internal sel. Ada tiga tipe dasar kerugian: optik, kuantum, dan listrik, yang memiliki sumber asal berbeda. Mengurangi kerugian dalam bentuk apa pun memerlukan metode manufaktur sel dan produksi modul fotovoltaik yang berbeda dan seringkali canggih. Batas efisiensi atas untuk teknologi yang dapat diakses secara komersial ditentukan oleh batas Shockley – Queisser (SQ) yang terkenal, dengan mempertimbangkan keseimbangan antara fotogenerasi dan rekombinasi radiasi. Namun, potensi terbesar terletak pada kemampuan untuk mengurangi kerugian kuantum, karena hal tersebut terkait erat dengan sifat material dan struktur internal sel. Yang relevan di sini adalah konsep celah pita, yang mendefinisikan energi minimum yang dibutuhkan foton yang mengenai permukaan sel agar dapat mengambil bagian dalam proses konversi fotovoltaik. Terdapat hubungan antara efisiensi sel dan nilai celah pita, yang pada gilirannya sangat bergantung pada bahan pembuat sel fotovoltaik. Bahan dasar yang umum digunakan untuk sel surya adalah silikon, yang memiliki nilai celah pita sekitar 1,12 eV, namun dengan melakukan modifikasi pada struktur kristalnya, sifat fisik material, terutama lebar celah pita, dapat terpengaruh (7). Mekanisme kerugian yang dominan pada sel fotovoltaik konvensional adalah ketidakmampuan menyerap foton di bawah celah pita dan termalisasi foton surya dengan energi di atas energi celah pita. Konsep sel surya generasi ketiga telah diusulkan untuk mengatasi dua mekanisme kerugian ini dalam upaya meningkatkan kinerja sel surya. Solusi ini bertujuan untuk mengeksplorasi seluruh spektrum dengan menggabungkan mekanisme baru untuk menciptakan pasangan electron.

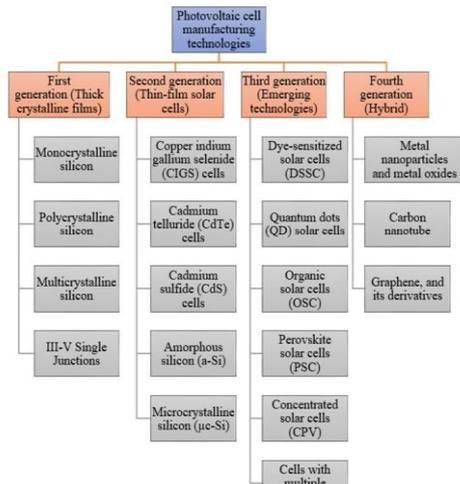
Potensi pengembangan utama di antara konsep-konsep ini untuk meningkatkan efisiensi pembangkitan listrik sel surya berbahan silikon ditunjukkan oleh gagasan sel yang fitur dasarnya adalah pita perantara tambahan dalam model celah pita silikon. Letaknya di antara pita konduksi dan pita valensi, dan fungsinya untuk memungkinkan penyerapan foton dengan energi di bawah lebar celah energi, sehingga menghasilkan efisiensi kuantum yang lebih tinggi (jumlah elektron tereksitasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan jumlah elektron tereksitasi). foton yang jatuh ke permukaan sel) [9]. Saat ini, banyak arah pengembangan penelitian tentang pengenalan pita perantara pada semikonduktor yang dapat diidentifikasi. Salah satunya adalah penggunaan implantasi ion, dimana dua metode dapat dibedakan: pengenalan dopan dengan konsentrasi sangat tinggi ke substrat semikonduktor, dan implantasi lapisan silikon dengan ion logam dosis

tinggi [10]. Peningkatan efisiensi sel surya melibatkan pengurangan berbagai jenis kerugian yang mempengaruhi efisiensi sel yang dihasilkan. Laboratorium Energi Terbarukan Nasional (NREL) menjalankan kompilasi penelitian efisiensi konversi sel tertinggi yang terverifikasi untuk berbagai teknologi fotovoltaik, yang dikumpulkan dari tahun 1976 hingga saat ini (Gambar 1). Hasil efisiensi sel diberikan untuk setiap keluarga semikonduktor: sel multi-persimpangan; sel persimpangan tunggal gallium arsenide; sel silikon kristal; teknologi film tipis; teknologi fotovoltaik yang sedang berkembang. Rekor dunia terbaru untuk teknologi individu ditunjukkan dengan bendera di tepi kanan yang berisi simbol efisiensi dan teknologi.



**Gambar 1. Bagan Efisiensi Sel Penelitian Terbaik NREL**

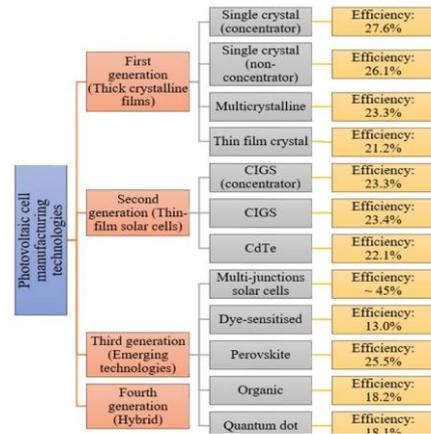
Sel fotovoltaik dapat dikategorikan menjadi empat generasi utama: generasi pertama, kedua, ketiga, dan keempat. Rincian masing-masing dibahas di bagian berikutnya. Pembangkitan Sel Fotovoltaik Dalam dekade terakhir, fotovoltaik telah menjadi kontributor utama transisi energi yang sedang berlangsung. Kemajuan yang berkaitan dengan bahan dan metode manufaktur memiliki peran penting di balik perkembangan tersebut. Namun, masih terdapat banyak tantangan sebelum fotovoltaik dapat menyediakan energi yang lebih bersih dan berbiaya rendah. Penelitian ke arah ini difokuskan pada perangkat fotovoltaik yang efisien seperti sel multi-persimpangan, graphene atau sel celah pita menengah, dan bahan sel surya yang dapat dicetak seperti titik kuantum [12]. Peran utama sel fotovoltaik adalah menerima radiasi matahari sebagai cahaya murni dan mengubahnya menjadi energi listrik dalam proses konversi yang disebut efek fotovoltaik. Ada beberapa teknologi yang terlibat dalam proses pembuatan sel fotovoltaik, menggunakan modifikasi material dengan efisiensi konversi fotolistrik yang berbeda pada komponen sel. Karena munculnya banyak metode manufaktur non-konvensional untuk membuat sel surya yang berfungsi, teknologi fotovoltaik dapat dibagi menjadi empat generasi utama, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



**Gambar 2. Berbagai jenis sel surya dan Perkembangan Terkini Dalam Bidangny**

Generasi berbagai sel fotovoltaik pada dasarnya menceritakan kisah tahapan evolusi masa lalu mereka. Ada empat kategori utama yang digambarkan sebagai generasi teknologi fotovoltaik selama beberapa dekade terakhir, sejak penemuan sel surya [15]:

1. Generasi Pertama: Kategori ini mencakup teknologi sel fotovoltaik berdasarkan silikon monokristalin dan polikristalin serta galium arsenida (GaAs).
2. Generasi Kedua: Generasi ini mencakup pengembangan teknologi sel fotovoltaik generasi pertama, serta pengembangan teknologi sel fotovoltaik film tipis dari “silikon mikrokristalin ( $\mu\text{c-Si}$ ) dan silikon amorf ( $\text{a-Si}$ ), tembaga per indium sel fotovoltaik gallium selenide (CIGS) dan cadmium telluride/cadmium sulfide ( $\text{CdTe/CdS}$ )”.
3. Generasi Ketiga: Generasi ini menghitung teknologi fotovoltaik yang didasarkan pada senyawa kimia terbaru. Selain itu, teknologi yang menggunakan “film” nanokristalin, titik kuantum, sel surya peka warna, sel surya berdasarkan polimer organik, dll., juga termasuk dalam generasi ini.
4. Generasi Keempat: Generasi ini mencakup fleksibilitas rendah atau biaya rendah dari polimer film tipis serta ketahanan “struktur nano anorganik inovatif seperti oksida logam dan nanopartikel logam atau bahan nano berbasis organik seperti grafena, tabung nano karbon, dan turunan graphene” [15]. Contoh jenis sel surya untuk setiap generasi beserta efisiensinya rata-ratanya ditunjukkan pada Gambar 3.



**Gambar 3. Contoh Efisiensi Sel Fotovoltaik Berdasarkan Generasi Masing Masing**

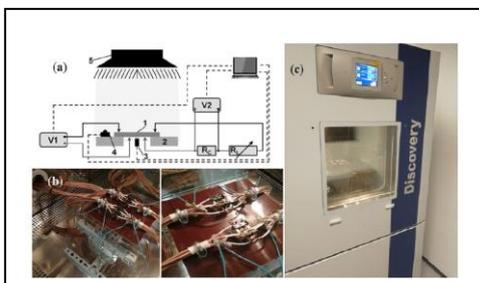
Sejak awal munculnya sel fotovoltaik, teknologi fotovoltaik berbasis silikon kristal telah memainkan peran dominan di pasar, dengan modul PV kristalin menguasai sekitar 90% pangsa pasar pada tahun 2020. Dalam beberapa tahun terakhir, terjadi perkembangan pesat dalam sel fotovoltaik. sel surya film tipis (seperti sel kadmium tellurida ( $\text{CdTe}$ ) dan senyawa indium-gallium selenium (CIGS)) dan sel surya baru (seperti sel surya peka warna (DSSC), sel surya perovskit (PSC), sel surya kuantum dot (QDSC), dll.) [83]. Meningkatnya minat terhadap sistem BIPV telah berkontribusi pada pengembangan teknologi fotovoltaik secara keseluruhan, yang menurunkan biaya dan meningkatkan kelayakan investasi. Sebagian besar teknologi standar generasi kedua menunjukkan efisiensi sebesar 20–25%, dan meskipun mahal, biaya sel silikon telah turun dan peningkatan teknologi silikon kini menjadi salah satu arah penelitian utama (16). Graphene dan turunannya merupakan bidang penelitian yang menjanjikan karena masih dalam tahap awal penelitian dan pengembangan. Tujuan penggunaan struktur nano karbon adalah untuk menghasilkan produk hemat energi yang menggabungkan lapisan transpor, aktif, dan elektroda. Banyak peneliti dalam penelitian graphene kontemporer kini berfokus pada turunan graphene baru dan aplikasi barunya dalam perangkat manufaktur(16).

Mengingat tren pasar yang meningkatkan penggunaan tingkat energi menengah dalam produksi sel PV, sangat masuk akal untuk melakukan penelitian ke arah ini, dan hal inilah yang sedang dilakukan oleh tim peneliti saat ini. Realisasi praktis dari ide sel surya silikon tipe IBSC yang hemat energi dengan tingkat energi menengah pada celah pita semikonduktor, yang dihasilkan melalui implantasi ion, memerlukan lebih banyak penelitian yang diarahkan pada pencarian parameter implantasi yang optimal, yaitu energi, jenis, dan dosis ion, disesuaikan dengan sifat bahan substrat, khususnya kadar dan jenis dopan (16). Tampaknya implantasi juga dapat

mengurangi kehilangan optik yang ada di dalam sel. Kotoran dan cacat yang dimasukkan ke dalam kisi kristal silikon dalam kondisi yang tepat dapat menciptakan celah pita perantara tambahan, yang secara realistis berkontribusi pada pengurangan lebar celah energi. Akibatnya, beberapa foton dengan energi lebih rendah dari nilai celah pita menyebabkan pembentukan pasangan elektron-lubang tambahan. Adanya pita energi tambahan ini berkontribusi terhadap peningkatan nilai arus fotolistrik yang dihasilkan dari penyerapan foton yang sebelumnya tidak terlibat dalam proses konversi fotovoltaik. Kisaran radiasi cahaya yang diserap meningkat ke arah inframerah, dan setelah menyerap foton dari kisaran ini, elektron pertamanya menuju pita perantara dan kemudian ke pita konduksi (17). Studi jangka panjang tentang perubahan parameter listrik silikon melalui penggunaan implantasi ion neon telah menghasilkan pengembangan metodologi para peneliti untuk menghasilkan dan mengidentifikasi tingkat energi tambahan dalam struktur pita silikon, sehingga meningkatkan efisiensi sel fotovoltaik. Salah satu grup riset melakukan penelitian dengan menggunakan metode menghasilkan tingkat energi menengah pada celah pita silikon tipe n dan p, dengan resistivitas spesifik  $\rho$  berkisar antara  $0,25 \Omega \cdot \text{cm}$  hingga  $10 \Omega \cdot \text{cm}$ , dengan menghasilkan cacat radiasi dalam pada struktur kristal semikonduktor dengan implantasi ion neon  $\text{Ne}^+$ . Bahan penelitian diolah dengan unsur-unsur seperti boron, fosfor, dan antimony.

### III. METODE PENELITIAN

Sampel silikon ditanamkan dengan ion neon dengan energi  $E = 100 \text{ keV}$  dan dosis  $D$  yang berbeda menggunakan implanter ion UNIMAS 79 dan kemudian dianalisis secara isokronik pada  $598 \text{ K}$  selama 15 menit dalam tungku resistansi. Parameter kelistrikan sampel silikon diuji menggunakan ruang iklim Discovery DY600C menggunakan program komputer PV Cells Meter dan perangkat lunak Winkratos. Meteran LCR Seri GW Instek LCR-8110G digunakan untuk mengukur nilai kapasitansi dan konduktansi, sedangkan nilai suhu sampel diukur menggunakan multimeter Fluke 289 dan Lutron TM-917.



**Gambar.4.** Stand laboratorium sampel silikon.

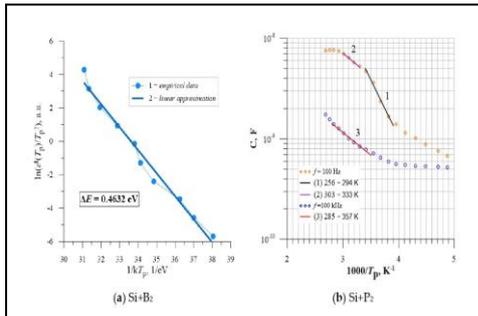
(a) Diagram skema dudukan laboratorium: 1; sel surya, 2; konstruksi pendukung, 3; sensor suhu, 4; piranometer, 5; sumber cahaya, V1; Fluke 289, V2; Pengukur LCR Seri LCR-8110G, RC — resistor shunt, RL beban yang dapat disesuaikan. (b) Tempat pengukuran khusus di dalam ruang iklim untuk menampung sampel silikon. (c) Penemuan DY600C.

Pengukuran kapasitansi dan konduktansi yang dihasilkan memungkinkan menentukan nilai posisi tingkat energi tambahan dalam celah pita. Dua metode digunakan untuk tujuan ini. Yang pertama adalah metode Spektroskopi Penerimaan Termal (TAS), yang memungkinkan untuk menentukan laju  $e t$  ( $T_p$ ) yang menentukan emisi termal, diikuti dengan kurva Arrhenius. Dengan menggunakan persamaan Arrhenius, energi aktivasi tingkat energi dalam dapat ditentukan dengan memperkirakan data eksperimen dengan fungsi linier [86]. Metode lain untuk menentukan energi aktivasi adalah perkiraan bagian terpilih dari lintasan  $C_p = f(1000/T_p)$  dengan fungsi persamaan  $\ln(y) = Ax + B$ , dimana  $C_p$  adalah satuan kapasitansi dari sampel yang diuji, dan  $T_p$  adalah suhu sampel selama pengukuran dilakukan pada frekuensi sinyal pengukuran  $f = 100 \text{ kHz}$ . Hal ini pada gilirannya memungkinkan penghitungan energi aktivasi konduksi  $\Delta E$ , yang menentukan kedalaman tingkat energi perantara tambahan (17).

### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Contoh hasil yang diperoleh dengan metode pendekatan kurva Arrhenius seperti yang ditunjukkan pada Gambar. Pengukuran kapasitansi dan konduktansi yang dihasilkan memungkinkan untuk menentukan nilai posisi tingkat energi tambahan dalam celah pita. Dua metode digunakan untuk tujuan yang pertama adalah metode Spektroskopi Penerimaan Termal (TAS), yang memungkinkan untuk menentukan laju  $e t$  ( $T_p$ ) yang menentukan emisi termal, diikuti dengan kurva Arrhenius. Dengan menggunakan persamaan Arrhenius, energi aktivasi tingkat energi dalam dapat ditentukan dengan memperkirakan data eksperimen dengan fungsi linier [86]. Contoh hasil yang diperoleh dengan metode TAS ditunjukkan pada Gambar. Metode lain untuk menentukan energi aktivasi adalah perkiraan bagian terpilih dari lintasan  $C_p = f(1000/T_p)$  dengan fungsi persamaan  $\ln(y) = Ax + B$ , dimana  $C_p$  adalah satuan kapasitansi sampel yang diuji, dan  $T_p$  adalah suhu sampel selama pengukuran dilakukan pada frekuensi sinyal pengukuran  $f = 100 \text{ kHz}$ . Hal ini pada gilirannya memungkinkan penghitungan energi aktivasi konduksi  $\Delta E$ , yang menentukan kedalaman tingkat energi perantara tambahan (18). Contoh hasil yang diperoleh dengan metode pendekatan kurva Arrhenius ditunjukkan pada Gambar. Berdasarkan penelitian yang dilakukan, cacat radiasi dapat diidentifikasi yang menciptakan tingkat energi tambahan pada celah pita silikon,

dengan energi aktivasi yang sesuai, yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel.1. Penelitian ini membuktikan bahwa implantasi ion Ne+ menghasilkan hasil dalam menghasilkan cacat radiasi pada kisi kristal silikon sebagai bahan dasar sel fotovoltaik dan memungkinkan pembangkitan energi tingkat menengah di celah pita, meningkatkan efisiensi sel fotovoltaik yang dibuat berdasarkan bahan tersebut.



Gambar. 5. Kisaran perkiraan hukum Arrhenius untuk silikon yang diimplantasi dengan ion neon Ne+ berenergi E = 100 keV (a) Silikon tipe P yang diolah dengan boron,  $\rho = 0,4 \Omega \cdot \text{cm}$ ,  $D = 2,2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ,  $\Delta E = 0,46 \text{ eV}$ . (b) Silikon tipe-N yang diolah dengan fosfor,  $\rho = 10 \Omega \cdot \text{cm}$ ,  $D = 4,0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ,  $\Delta E = 0,23 \text{ eV}$ .

**Tabel 1. Penentuan tingkat energi menengah untuk sampel silikon yang didoping boron dan fosfor yang ditanamkan Ne+ion dan energi E = 100 keV, dianil secara isokronik pada 598 K.**

Sample	Label	Resistivity	Dose	Activation Energy
Silicon solar cells (p-type) doped with boron	Si+B <sub>1</sub>	$\rho = 0,4 \Omega \cdot \text{cm}$	$D = 4,0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$	$\Delta E_1 = 0,34 \text{ eV}$
Silicon solar cells (p-type) doped with boron	Si+B <sub>2</sub>	$\rho = 0,4 \Omega \cdot \text{cm}$	$D = 2,2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$	$\Delta E_2 = 0,46 \text{ eV}$
Silicon solar cells (p-type) doped with boron	Si+B <sub>3</sub>	$\rho = 0,4 \Omega \cdot \text{cm}$	$D = 4,0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$	$\Delta E_3 = 0,32 \text{ eV}$
Silicon solar cells (n-type) doped with phosphorus	Si+P <sub>1</sub>	$\rho = 10 \Omega \cdot \text{cm}$	$D = 4,0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$	$\Delta E_4 = 0,19 \text{ eV}$
Silicon solar cells (n-type) doped with phosphorus	Si+P <sub>2</sub>	$\rho = 10 \Omega \cdot \text{cm}$	$D = 4,0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$	$\Delta E_5 = 0,23 \text{ eV}$

**V. KESIMPULAN DAN SARAN**

Energi surya adalah salah satu sumber listrik terbarukan yang paling banyak diminati. Produksi listrik menggunakan teknologi fotovoltaik tidak hanya membantu memenuhi permintaan energi yang terus meningkat, namun juga berkontribusi terhadap mitigasi perubahan iklim global dengan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Tingkat daya saing sel surya inovatif generasi mendatang semakin meningkat karena upaya para peneliti dan ilmuwan terkait dengan pengembangan material baru, khususnya nanomaterial dan nanoteknologi. Tercatat bahwa pasar sel surya didominasi oleh sel silikon

monokristalin karena efisiensinya yang tinggi. Sekitar dua dekade lalu, efisiensi sel fotovoltaik silikon kristal mencapai ambang batas 25% pada skala laboratorium. Meskipun ada kemajuan teknologi sejak saat itu, efisiensi puncak kini hanya meningkat sedikit menjadi 26,6%. Ketika efisiensi teknologi silikon kristal mendekati kurva saturasi, para peneliti di seluruh dunia sedang menjajaki bahan alternatif dan proses manufaktur untuk lebih meningkatkan efisiensi ini. Sel silikon film tipis polikristalin dan amorf dipandang sebagai pesaing serius sel silikon monokristalin. Namun kelemahannya adalah sifatnya yang tidak teratur sehingga menghasilkan efisiensi yang energi rendah.

**DAFTAR PUSTAKA**

- [1]. Singh, B.P.; Goyal, S.K.; Kumar, P. *Solar PV cell materials and technologies: Analyzing the recent developments*. Mater. Today Proc. 2021, 43, 2843–2849. [CrossRef]
- [2]. Muhammad, J.Y.U.; Waziri, A.B.; Shitu, A.M.; Ahmad, U.M.; Muhammad, M.H.; Alhaji, Y.; Olaniyi, A.T.; Bala, A.A. *Recent progressive status of materials for solar photovoltaic cell: A comprehensive review*. Sci. J. Energy Eng. 2019, 7, 77–89. [CrossRef]
- [3]. Węgiełek, P.; Billewicz, P. *Jump Mechanism of Electric Conduction in n-Type Silicon Implanted with Ne++ Neon Ions*. Acta Phys. Pol. A 2011, 120, 122–124. [CrossRef] 5.
- [4]. Hayat, M.B.; Ali, D.; Monyake, K.C.; Alagha, L.; Ahmed, N. *Solar energy—A look into power generation, challenges, and a solar-powered future*. Int. J. Energy Res. 2019, 43, 1049–1067. [CrossRef]
- [5]. Węgiełek, P.; Billewicz, P. *Research on Mechanisms of Electric Conduction in the p-Type Silicon Implanted with Ne+ Ions*. Acta Phys. Pol. A 2013, 123, 948–951. [CrossRef]
- [6]. Pérez, E.; Duenas, S.; Castán, H.; García, H.; Bailón, L.; Montero, D.; García-Hernansanz, R.; Hemme, E.G.; Olea, J.; González-Díaz, G.; et al. A detailed analysis of the energy levels configuration existing in the band gap of supersaturated silicon with titanium for photovoltaic applications. J. Appl. Phys. 2015, 118, 245704. [CrossRef]
- [7]. Ojo, A.A.; Cranton, W.M.; Dharmadasa, I.M. *Next Generation Multilayer Graded Bandgap Solar Cells*; Springer: Cham, Switzerland, 2019; pp. 17–40. [CrossRef]
- [8]. Ren, F.; Yao, M.; Li, M.; Wang, H. *Tailoring the Structural and Electronic Properties of Graphene through Ion Implantation*. Materials 2021, 14, 5080. [CrossRef] [PubMed] 10.

- [9]. Krügener, J.; Osten, H.J.; Kiefer, F.; Haase, F.; Peibst, R. *Ion Implantation for Photovoltaic Applications: Review and Outlook for n-Type Silicon Solar Cells*. In Proceedings of the 2016 21st International Conference on Ion Implantation Technology (IIT), Tainan, China, 26–30 September 2016. [CrossRef]
- [10]. NREL's Best Research-Cell Efficiency Chart 2022. Available online: <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cellefficiencies-rev220126b.pdf> (accessed on 3 August 2022).
- [11]. Tsakalakos, L. *Nanotechnology for Photovoltaics*, 1st ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2010; pp. 1–48. [CrossRef] Almosni, S.; Delamarre, A.; Jehl, Z.; Suchet, D
- [12]. Wilson, G.M.; Al-Jassim, M.; Metzger, W.K.; Glunz, S.W.; Verlinden, P.; Xiong, G.; Mansfield, L.M.; Stanbery, B.J.; Zhu, K.; Yan, Y. The 2020, *Photovoltaic Technologies Roadmap*. *J. Phys. D Appl. Phys.* 2020, 53, 493001. [CrossRef] PubMed]