

## NANO TEKNOLOGI DALAM PENINGKATAN EFISIENSI DAN KINERJA PANEL SURYA

<sup>1</sup> Moch Fikar Surahman, <sup>2</sup> Akmal Muklas Mubarak, <sup>3</sup> Haikal Teuku Darmansyah, <sup>4</sup> Muhammad Dzaki Fadhil Ahnaf, <sup>5</sup> Riny Yolandha Parapat

Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Bandung

Jl. PKH Hasan Mustapa no.23 Bandung, 40124, Indonesia

Email: [rinyyoalndha@itenas.ac.id](mailto:rinyyoalndha@itenas.ac.id)

**Abstract (English)**

Nanotechnology has opened up significant opportunities in improving the efficiency and performance of solar panels through material manipulation at the nanometer scale. This technology enables improved light absorption, energy conversion, and material stability by utilizing nanostructures such as quantum dots, perovskite, and metal nanoparticles. Innovative techniques such as the plasmonic effect and multiple exciton generation can broaden the spectrum of light absorbed and increase the efficiency of converting solar energy into electricity. In addition, the application of nanotechnology enables the production of lighter, more flexible and economical solar panels, opening up opportunities for a wide range of applications. However, challenges such as material stability, environmental impact, and manufacturing costs still require further research. This report reviews the recent developments, challenges and opportunities of using nanotechnology to improve the efficiency of solar panels and its impact on the sustainability of renewable energy in the future.

**Abstrak (Indonesia)**

Nanoteknologi telah membuka peluang signifikan dalam meningkatkan efisiensi dan kinerja panel surya melalui manipulasi material pada skala nanometer. Teknologi ini memungkinkan peningkatan penyerapan cahaya, konversi energi, serta stabilitas material dengan memanfaatkan nanostruktur seperti *quantum dots*, *perovskite*, dan nanopartikel logam. Berbagai teknik inovatif seperti efek plasmonik dan *multiple exciton generation* mampu memperluas spektrum cahaya yang diserap dan meningkatkan efisiensi konversi energi matahari menjadi listrik. Selain itu, penerapan nanoteknologi memungkinkan produksi panel surya yang lebih ringan, fleksibel, dan ekonomis, sehingga membuka peluang penggunaan pada berbagai aplikasi. Namun, tantangan seperti stabilitas material, dampak lingkungan, dan biaya produksi masih memerlukan penelitian lebih lanjut. Laporan ini mengulas perkembangan terkini, tantangan, dan peluang penggunaan nanoteknologi dalam meningkatkan efisiensi panel surya serta dampaknya terhadap keberlanjutan energi terbarukan di masa depan.

**Article History**

Submitted: 31 Desember 2024

Accepted: 3 Januari 2025

Published: 8 Januari 2025

**Key Words**

nanotechnology, solar panels, quantum dots, perovskite, metal nanoparticles, energy efficiency, renewable energy

**Sejarah Artikel**

Submitted: 31 Desember 2024

Accepted: 3 Januari 2025

Published: 8 Januari 2025

**Kata Kunci**

nanoteknologi, panel surya, quantum dots, perovskite, nanopartikel logam, efisiensi energi, energi terbarukan

**1. PENDAHULUAN**

Nanoteknologi telah menjadi salah satu bidang inovasi yang mengalami perkembangan pesat dalam beberapa dekade terakhir. Teknologi ini berfokus pada manipulasi material pada skala nanometer untuk menghasilkan sifat-sifat unik yang tidak ditemukan pada ukuran makro. Dalam konteks energi terbarukan, penerapan nanoteknologi telah membuka peluang baru untuk meningkatkan efisiensi, kinerja, dan keberlanjutan berbagai teknologi, termasuk panel surya. Energi surya, sebagai salah satu sumber energi terbarukan yang paling melimpah, menawarkan potensi besar dalam mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengatasi tantangan perubahan iklim global.

Salah satu tantangan utama dalam teknologi panel surya adalah efisiensinya yang relatif rendah dibandingkan dengan potensi teoretis energi matahari yang dapat dimanfaatkan. Faktor-faktor seperti kehilangan energi akibat pantulan cahaya, konversi foton yang tidak optimal, dan degradasi material panel menjadi hambatan signifikan dalam mencapai efisiensi yang lebih tinggi. Di sinilah nanoteknologi dapat memainkan peran penting, menawarkan solusi inovatif untuk mengatasi kendala ini.

Penggunaan material nanostruktur seperti nanopartikel, nanowire, dan lapisan tipis nanomaterial memungkinkan modifikasi sifat optik, elektrik, dan termal pada panel surya. Sebagai contoh, nanopartikel logam dapat meningkatkan penyerapan cahaya melalui fenomena plasmonik, sementara nanostruktur tertentu mampu mengurangi pantulan cahaya sehingga energi yang terserap menjadi lebih optimal. Hal ini membuka peluang untuk meningkatkan efisiensi panel surya secara signifikan tanpa perlu memperluas area instalasi.

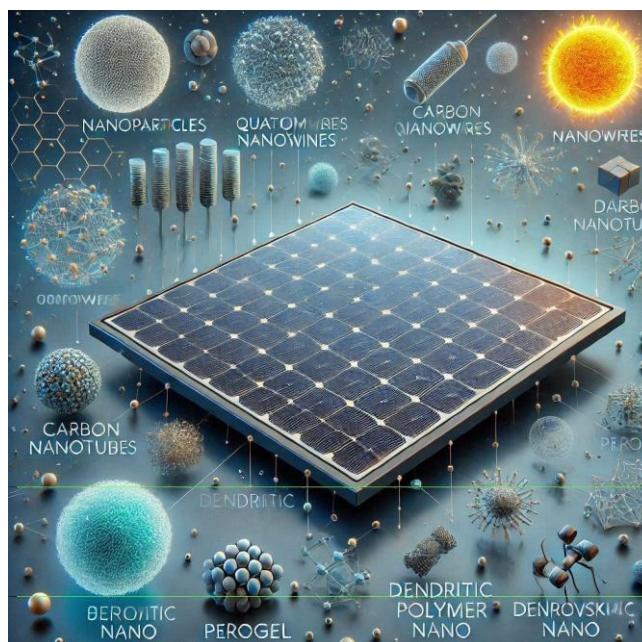
Selain efisiensi, nanoteknologi juga berkontribusi pada peningkatan kinerja panel surya dalam berbagai kondisi lingkungan. Lapisan antirefleksi berbasis nanoteknologi, misalnya, dapat meningkatkan kemampuan panel untuk menyerap cahaya di berbagai sudut dan intensitas. Di sisi lain, penggunaan material nanokomposit memungkinkan panel surya memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap suhu ekstrem, kelembapan, dan faktor lingkungan lainnya, sehingga umur pakai panel surya dapat diperpanjang.

Dari sudut pandang ekonomi, penerapan nanoteknologi juga berpotensi menurunkan biaya produksi panel surya. Proses manufaktur berbasis nanoteknologi sering kali memerlukan jumlah material yang lebih sedikit namun tetap memberikan performa yang lebih baik. Hal ini dapat meningkatkan daya saing teknologi panel surya di pasar energi global, menjadikannya pilihan yang lebih menarik bagi konsumen dan investor.

Pengembangan pada teknologi ini memerlukan penelitian yang mendalam serta kerja sama antara berbagai disiplin ilmu. Tantangan seperti stabilitas material nanoteknologi, keamanan lingkungan, dan skala produksi masih menjadi perhatian yang perlu ditangani. Oleh karena itu, penting untuk menciptakan kerangka kerja penelitian yang terintegrasi guna mendorong inovasi yang berkelanjutan dalam bidang ini.

Dengan potensi besar nanoteknologi dalam mendukung revolusi energi terbarukan, fokus pada aplikasi ini tidak hanya relevan secara ilmiah tetapi juga strategis untuk masa depan energi global. Manuskrip ini bertujuan untuk mengulas perkembangan terkini, tantangan, dan peluang dalam penerapan nanoteknologi untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja panel surya, serta dampaknya terhadap keberlanjutan energi.

Gambar 1 menampilkan ilustrasi berbagai jenis nanomaterial yang digunakan dalam aplikasi panel surya untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja konversi energi matahari. Beberapa nanomaterial yang ditampilkan meliputi nanopartikel, *quantum dots*, *nanowires*, *carbon nanotubes*, dan *perovskite*, masing-masing memiliki peran unik dalam optimalisasi teknologi sel surya. Misalnya, *quantum dots* dan *perovskite* berkontribusi dalam menyerap cahaya dengan spektrum lebih luas, sementara *carbon nanotubes* dan *nanowires* meningkatkan konduktivitas listrik dan transportasi muatan. Selain itu, penggunaan *dendritic polymers* dan *aerogel* dapat membantu meningkatkan stabilitas dan manajemen panas pada perangkat. Ilustrasi ini menggambarkan bagaimana kombinasi berbagai nanomaterial canggih memungkinkan peningkatan performa panel surya melalui pendekatan nanoteknologi yang inovatif dan multifungsional.

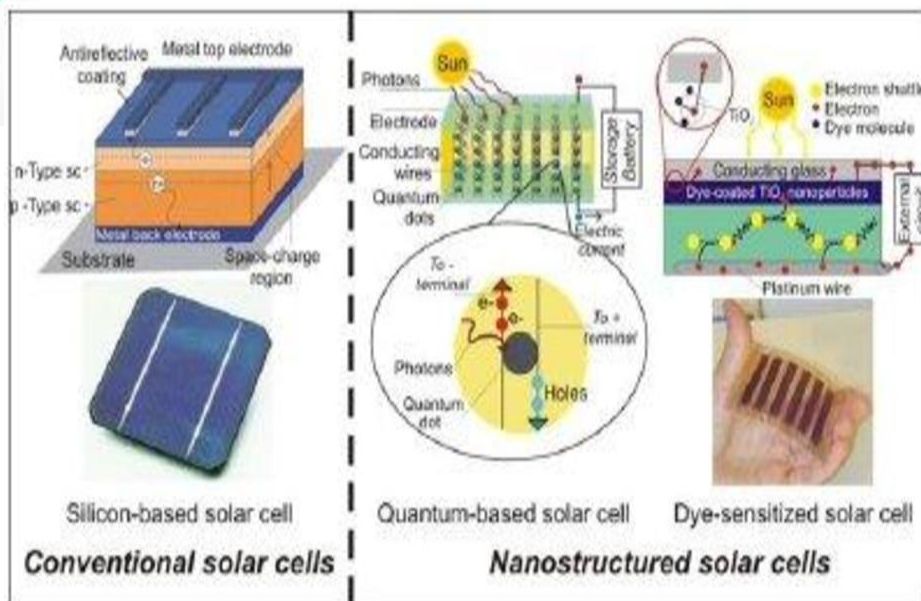


Gambar 1 Ilustrasi nanomaterial pada panel surya ( Chatgpt, 2024)

## 2. Aplikasi dan implementasi nanoteknologi pada panel surya

Nanoteknologi memiliki peran penting dalam meningkatkan efisiensi dan kinerja panel surya melalui manipulasi material pada skala nanometer. Dalam konteks fotovoltaik, teknologi ini memungkinkan peningkatan penyerapan cahaya, efisiensi konversi energi, dan stabilitas material dengan memodifikasi sifat optik dan elektronik material secara signifikan dibandingkan dengan material dalam bentuk *bulk*. Nanopartikel seperti *quantum dots*, *perovskite*, dan nanopartikel logam (misalnya perak atau emas) berkontribusi pada perluasan spektrum cahaya yang diserap, peningkatan pengangkutan elektron, dan pengurangan refleksi cahaya. Selain itu, teknik seperti *multiple exciton generation* (MEG) dan *plasmonics* dapat meningkatkan efisiensi konversi energi matahari menjadi listrik. Penggunaan material berbasis nano juga memungkinkan pembuatan sel surya yang fleksibel, ringan, dan dapat diproduksi dengan metode seperti *roll-to-roll printing*, sehingga membuka peluang untuk aplikasi pada permukaan tidak datar. Dengan keunggulan ini, nanoteknologi menjadi landasan penting dalam pengembangan teknologi seperti *Quantum Dot Solar Cells* dan *Perovskite Nanocrystal Solar Cells*, yang dirancang untuk memaksimalkan efisiensi dan keberlanjutan energi fotovoltaik.

Gambar 2 menampilkan penerapan nanoteknologi dalam pengembangan sel surya, yang dikenal sebagai *nano solar cells*. Pada bagian kiri, terlihat lembaran fleksibel sel surya berbasis nanoteknologi, yang memungkinkan perangkat menjadi tipis, ringan, dan dapat diaplikasikan pada berbagai permukaan, termasuk bangunan dan perangkat portabel. Sementara itu, ilustrasi di sebelah kanan menunjukkan bagaimana nanoteknologi memaksimalkan pemanfaatan cahaya matahari melalui pengelolaan *direct sunlight*, *diffuse sunlight*, dan *reflected light* untuk meningkatkan efisiensi konversi energi. Penggunaan struktur nano, seperti nanopartikel dan *nanowires*, membantu mengurangi kehilangan cahaya melalui refleksi serta memaksimalkan penyerapan cahaya, menjadikan teknologi ini lebih efektif dibandingkan dengan sel surya konvensional. Dengan inovasi ini, sel surya berbasis nanoteknologi memiliki potensi untuk merevolusi energi terbarukan melalui efisiensi tinggi dan fleksibilitas aplikasi yang luas.



Gambar 2 Nano solar cell (Kshitij Patil, 2019)

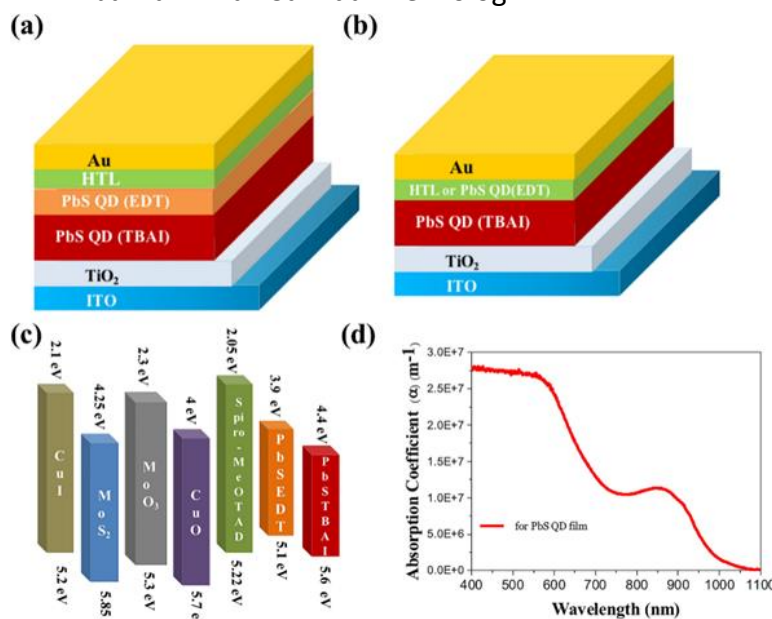
### 2.1 Teknologi *quantum dots solar cell*

*Quantum dots solar cell* (QDSC) adalah nanopartikel semikonduktor dengan sifat optik dan elektronik yang unik, yang dapat diatur melalui perubahan ukuran partikelnya. Dalam konteks sel surya, quantum dots memungkinkan kontrol atas bandgap energi, yang berarti mereka dapat disesuaikan untuk menyerap berbagai panjang gelombang cahaya matahari dengan lebih efisien. Hal ini memungkinkan sel surya berbasis QDSC untuk memanfaatkan spektrum sinar matahari secara lebih efektif dibandingkan sel surya silikon konvensional.

Salah satu keunggulan QDSC adalah kemampuannya untuk menghasilkan fenomena *multiple exciton generation* (MEG), di mana satu foton mampu menghasilkan lebih dari satu *exciton* (pasangan *elektron-hole*), yang pada akhirnya meningkatkan arus listrik dan efisiensi konversi energi.

Teknologi ini sangat menjanjikan untuk aplikasi sel surya generasi berikutnya karena sifat fleksibilitasnya yang tinggi dan potensi biaya rendah. Efisiensi QDSC terus meningkat dengan rekor terbaru mencapai 18.1%, dan penelitian terus berfokus pada peningkatan stabilitas jangka panjang.

Gambar 3 memperlihatkan skema struktur dan performa dari *quantum dots solar cells* (QDSCs) untuk optimasi panel surya berbasis nanoteknologi. Panel (a) dan (b) menunjukkan konfigurasi lapisan perangkat QDSCs, di mana lapisan PbS QD (*quantum dot*) berfungsi sebagai bahan aktif yang menyerap cahaya, dengan variasi pada lapisan *hole transport layer* (HTL). Panel (a) menggunakan PbS QD yang diproses dengan EDT sebagai HTL, sementara panel (b) menawarkan opsi HTL atau PbS QD dengan EDT. Kedua perangkat memanfaatkan ITO dan TiO<sub>2</sub> sebagai substrat dan lapisan transport elektron. Pada panel (c), ditampilkan tingkat energi pita berbagai material HTL, seperti CuI, MoS<sub>2</sub>, CuO, dan material organik, yang digunakan untuk mencocokkan tingkat energi PbS QD, memungkinkan transport hole yang optimal. Grafik pada panel (d) menunjukkan spektrum absorpsi film PbS QD, di mana material ini memiliki koefisien absorpsi tinggi di rentang panjang gelombang 400–1000 nm, yang ideal untuk menyerap cahaya matahari secara efisien. Struktur dan karakterisasi ini menekankan pentingnya optimasi lapisan fungsional untuk meningkatkan performa perangkat QDSCs.



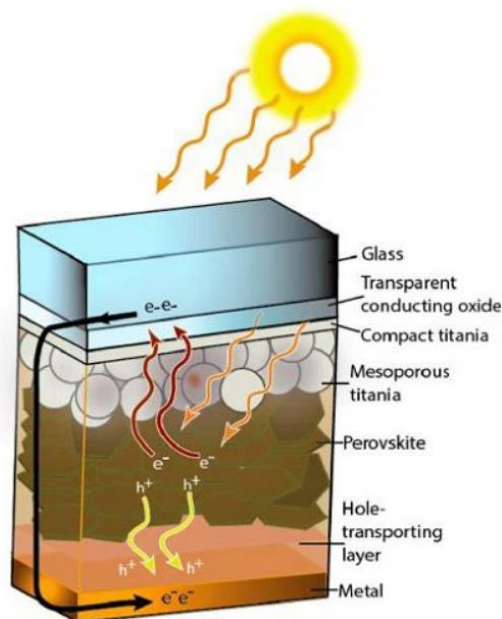
Gambar 3 Optimisasi performa *quantum dots solar cells* (Kumaret al., 2023)

## 2.2 Sel surya berbasis nanokristal *perovskite*

*Perovskite* adalah material yang secara alami memiliki struktur kristal yang sangat efisien dalam menyerap cahaya dan mengkonversi energi. Nanokristal *perovskite* menawarkan beberapa keunggulan, seperti proses pembuatan yang lebih sederhana, fleksibilitas yang lebih tinggi, dan potensi untuk menghasilkan efisiensi konversi energi yang sangat tinggi dengan biaya produksi yang rendah.

Sel surya *perovskite* telah mencapai efisiensi lebih dari 25%, menjadikannya salah satu kandidat paling menjanjikan dalam menggantikan sel surya silikon.

Gambar 4 menunjukkan struktur lapisan pada sel surya *perovskite*, yang merupakan teknologi canggih berbasis nanoteknologi untuk aplikasi panel surya. Lapisan utama meliputi substrat kaca FTO (*Fluorine-doped Tin Oxide*) sebagai elektroda transparan, lapisan  $\text{TiO}_2$  sebagai lapisan transport elektron, lapisan *perovskite* sebagai bahan aktif penyerap cahaya, dan Spiro-OMeTAD sebagai *hole transport layer* (HTL) untuk memfasilitasi pergerakan hole. Di bagian atas, terdapat lapisan IZO (*Indium Zinc Oxide*) sebagai elektroda transparan kedua. Cahaya yang masuk diserap oleh lapisan *perovskite*, menghasilkan pasangan elektron-hole yang kemudian dipisahkan dan diangkut melalui ETL dan HTL ke elektroda, menghasilkan arus listrik. Struktur berlapis ini dirancang untuk meningkatkan efisiensi konversi energi dengan memaksimalkan penyerapan cahaya dan optimalisasi transport muatan, menjadikan *perovskite* sebagai kandidat unggul untuk panel surya berbiaya rendah dan berkinerja tinggi.



Gambar 4 Sel surya perovskite ( Zhengzhou Alfa, 2019)

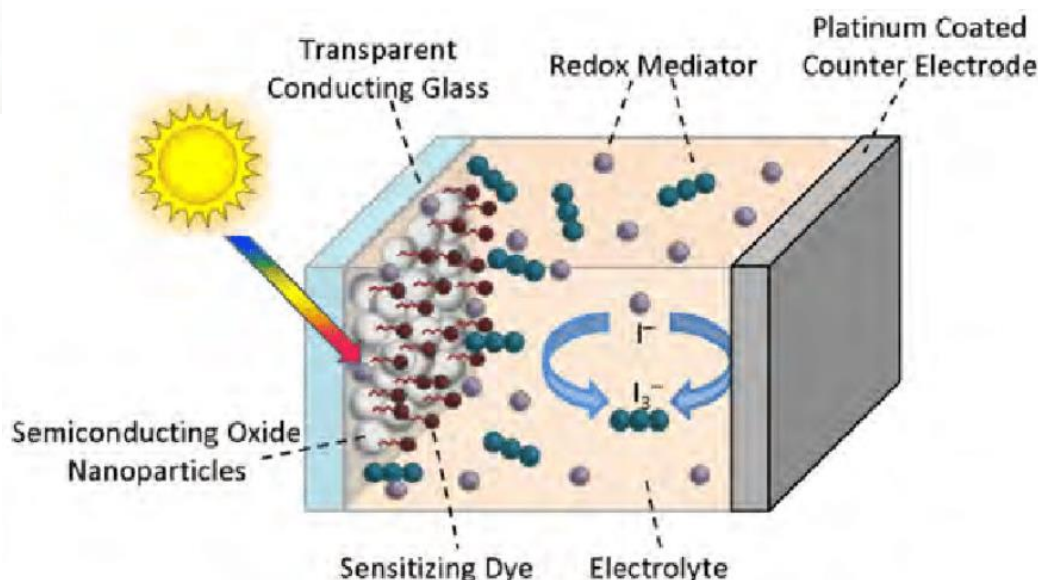
Struktur nano pada *perovskite* memungkinkan kontrol yang lebih baik terhadap sifat material, termasuk stabilitas, kemampuan menyerap cahaya, dan efisiensi transfer muatan. Selain itu, teknologi hybrid yang menggabungkan *perovskite* dengan *quantum dots* juga sedang dikembangkan untuk meningkatkan performa dan stabilitas sel surya

Dengan perkembangan lebih lanjut dalam penelitian, baik QDSC maupun *perovskite* nanokristal diperkirakan akan berperan besar dalam transformasi energi terbarukan, memungkinkan penyebaran yang lebih luas dari teknologi panel surya yang efisien dan ekonomis.

### 2.3 Nanoteknologi *dye sensitized solar cells*

*Dye sensitized solar cells* (DSSC) menggunakan pewarna organik yang menyerap cahaya untuk menghasilkan arus listrik. Teknologi ini lebih mudah diproduksi dan ramah lingkungan dibandingkan sel surya silikon. Inovasi terbaru dalam DSSC meliputi penggunaan nanopartikel titanium dioksida untuk meningkatkan area permukaan dan efisiensi penyerapan cahaya. Beberapa prototipe telah mencapai efisiensi sekitar 11%, dengan pengembangan lebih lanjut yang menjanjikan.

Gambar 5 menunjukkan prinsip kerja *Dye-Sensitized Solar Cells* (DSSCs), sebuah teknologi panel surya berbasis nanoteknologi. DSSC terdiri dari substrat FTO (*Fluorine-doped Tin Oxide*) glass berlapis nanopartikel  $\text{TiO}_2$  yang berperan sebagai semikonduktor dan tempat melekatnya zat pewarna (*dye*). Cahaya matahari diserap oleh *dye*, sehingga elektron tereksitasi dari HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*) ke LUMO (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital*). Elektron yang tereksitasi bergerak menuju lapisan  $\text{TiO}_2$  dan kemudian mengalir melalui sirkuit eksternal menuju elektroda platinum pada sisi lain, menghasilkan arus listrik yang melewati beban. Elektroda platinum dan elektrolit (biasanya mengandung pasangan redoks  $\text{I}^-/\text{I}_3^-$ ) berfungsi untuk mengembalikan elektron ke *dye*, melengkapi siklus. Energi celah ( $\Delta E$ ) antara HOMO dan LUMO menentukan efisiensi eksitasi elektron, sementara tegangan rangkaian terbuka ( $V_{oc}$ ) bergantung pada tingkat energi Fermi ( $E_f$ ) dari elektroda. DSSCs memanfaatkan nanoteknologi untuk meningkatkan area aktif penyerapan cahaya dan transport elektron, sehingga meningkatkan efisiensi konversi energi matahari.

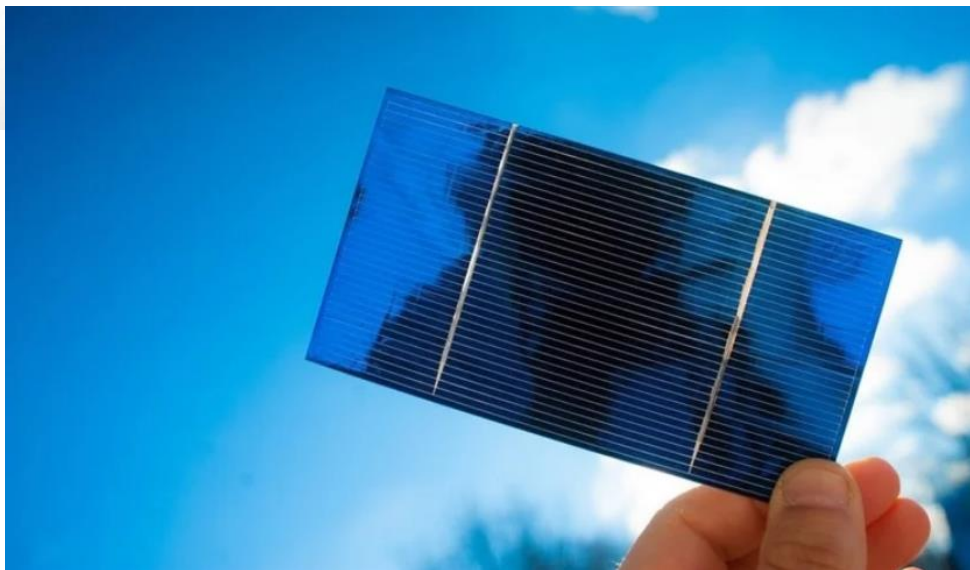


Gambar 5 *Dye sensitized solar cells* (Matt griffith, 2011)

#### 2.4 Sel surya film tipis berbasis CIGS (*Copper iridium Gallium Selenide*)

Sel surya film tipis berbasis CIGS (*Copper Indium Gallium Selenide*) adalah salah satu teknologi fotovoltaik yang telah berkembang pesat dan dikenal karena efisiensi serta fleksibilitasnya. CIGS merupakan bahan semikonduktor yang sangat efisien dalam mengonversi energi matahari menjadi listrik, dan ketika digabungkan dengan nanoteknologi, kinerjanya dapat lebih dioptimalkan. Teknologi film tipis ini menggunakan lapisan-lapisan material yang sangat tipis (beberapa mikrometer) sehingga memungkinkan produksi panel surya yang lebih ringan, fleksibel, dan lebih murah dibandingkan teknologi berbasis silikon.

Gambar 6 menampilkan sel surya film tipis berbasis CIGS (*Copper Indium Gallium Selenide*), sebuah teknologi panel surya fleksibel yang memanfaatkan nanoteknologi untuk efisiensi tinggi dan kepraktisan. Struktur CIGS memungkinkan pembuatan lapisan semikonduktor ultra-tipis yang efisien dalam menyerap cahaya matahari dan mengubahnya menjadi listrik. Berbeda dengan sel surya konvensional berbasis silikon, panel ini lebih ringan, fleksibel, dan mudah dipasang di berbagai permukaan, termasuk atap melengkung atau perangkat portabel. Teknologi ini bekerja dengan memanfaatkan lapisan tipis material CIGS yang memiliki bandgap energi optimal untuk menyerap cahaya dalam spektrum lebih luas. Fleksibilitas dan efisiensi tinggi dari sel surya film tipis ini menjadikannya solusi ideal untuk aplikasi di bidang energi terbarukan, terutama dalam skenario yang memerlukan solusi ringan, portabel, dan hemat biaya.



Gambar 6 *Dye Sensitized Solar cells* (Akanksha Urade, 2022)

### 3. Jenis-jenis nanomaterial yang digunakan dalam panel surya

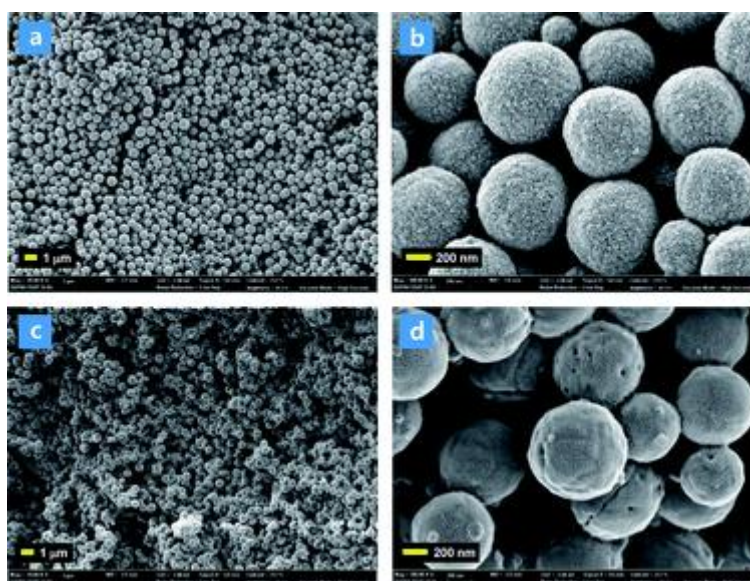
Dalam pengembangan panel surya modern, berbagai jenis nanomaterial telah diidentifikasi sebagai komponen kunci untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem fotovoltaik. Nanomaterial, dengan ukuran struktur di bawah 100 nanometer, menawarkan sifat-sifat unik seperti rasio luas permukaan terhadap volume yang tinggi, sifat optik dan elektronik yang dapat disesuaikan, serta kemampuan untuk memanfaatkan efek kuantum. Keunggulan ini memungkinkan nanomaterial untuk berperan dalam meningkatkan penyerapan cahaya, mempercepat transpor elektron, serta memperluas spektrum cahaya matahari yang dapat dimanfaatkan untuk konversi energi. Dengan potensi besar dalam pengoptimalan proses fotovoltaik, jenis-jenis nanomaterial seperti *quantum dots*, *perovskite*, nanopartikel logam, serta *nanowires* terus dikembangkan untuk mendukung evolusi teknologi panel surya yang lebih efisien dan berkelanjutan.

#### 3.1 *Quantum dots*

*Quantum dots* (QDs) adalah material semikonduktor berukuran nanometer (1-200 nm) yang menunjukkan sifat kuantum unik yang dapat dilihat pada gambar 7, meningkatkan efisiensi konversi energi dalam panel surya dengan memanfaatkan sifat optik dan elektroniknya. QDs dapat menyerap cahaya dalam spektrum lebih luas, termasuk panjang gelombang yang lebih panjang atau pendek dari yang biasa diserap oleh semikonduktor konvensional, sehingga meningkatkan efisiensi penyerapan energi matahari. Mereka memungkinkan pemecahan cahaya menjadi beberapa panjang gelombang yang berbeda, dengan lapisan *quantum dots* menyerap cahaya pada panjang gelombang yang berbeda, sehingga meningkatkan konversi energi. *Quantum dots* digunakan dalam berbagai teknologi panel surya, seperti *perovskite solar cells* atau *quantum dot solar cells* (QDSCs), di mana mereka bertindak sebagai material aktif yang menyerap cahaya dan menghasilkan pembawa muatan. Dengan mobilitas elektron tinggi dan kemampuan mengurangi rekombinasi pembawa muatan, QDs berpotensi meningkatkan efisiensi panel surya secara signifikan. Dalam sel surya tandem, *quantum dots* dapat mengoptimalkan penyerapan cahaya pada lapisan bawah, meningkatkan efisiensi keseluruhan. Keunggulannya meliputi efisiensi yang lebih tinggi, stabilitas, biaya rendah, dan fleksibilitas desain untuk aplikasi panel surya fleksibel dan transparan. Namun, tantangan seperti pengendalian ukuran dan distribusi *quantum dots* serta masalah toksisitas dan biaya produksi dalam skala besar masih

perlu diatasi. Meskipun demikian, quantum dots menjanjikan peningkatan efisiensi dan fleksibilitas panel surya di masa depan, menjadikannya bahan potensial dalam pengembangan teknologi energi terbarukan.

Gambar 7 menunjukkan SEM morfologi *quantum dots* dalam berbagai skala dan kondisi. Gambar (a) memperlihatkan distribusi partikel dengan ukuran yang merata pada skala mikrometer, menunjukkan aglomerasi kecil. Pada gambar (b), terlihat partikel berbentuk bulat dengan permukaan halus dalam skala nanometer, menandakan keseragaman morfologi. Gambar (c) menunjukkan struktur yang lebih kasar dengan distribusi ukuran partikel yang tidak merata, mengindikasikan aglomerasi yang lebih tinggi. Sementara itu, gambar (d) menampilkan partikel berbentuk bulat dengan distribusi yang cukup baik, meskipun terdapat variasi ukuran yang lebih besar dibandingkan gambar (b).

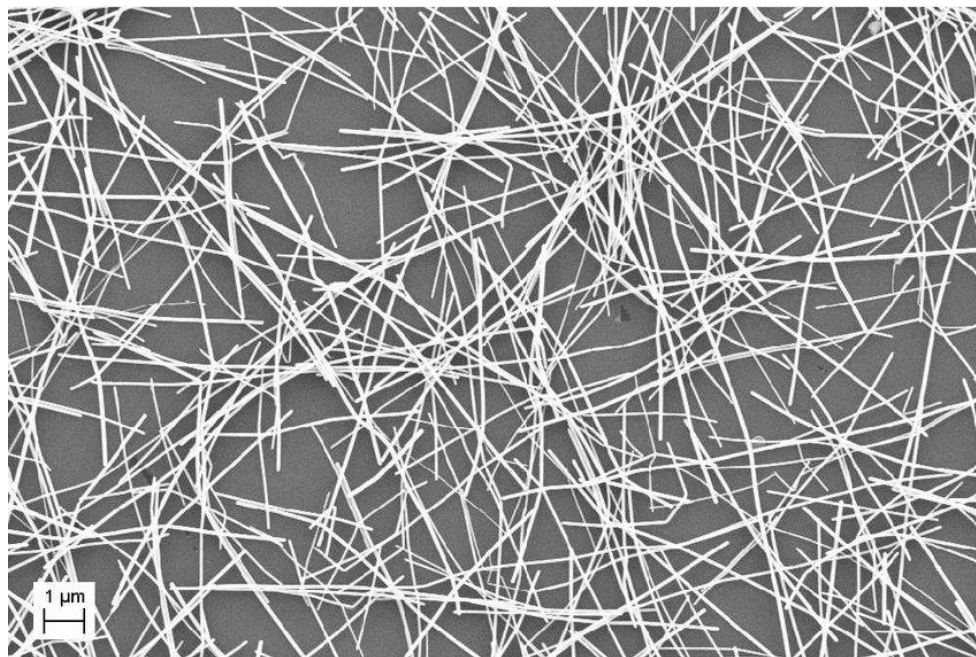


Gambar 7 Hasil SEM dari *quantum dots* CdSe (Byong yong yu,2012.)

### 3.2 Silver Nanowires

*Silver nanowires* adalah material berbentuk kawat nano berbahan dasar perak (Ag) dengan diameter 10-100 nm dan panjang beberapa mikrometer, yang memiliki konduktivitas listrik dan termal sangat tinggi. Material ini menunjukkan karakteristik unik seperti transparansi, fleksibilitas, serta rasio panjang terhadap diameter yang tinggi, menjadikannya ideal untuk aplikasi elektroda transparan pada panel surya, perangkat layar sentuh, elektronik fleksibel, dan pemanas transparan. Silver nanowires juga menawarkan keunggulan seperti ramah lingkungan, biaya produksi yang lebih rendah dibandingkan Indium Tin Oxide (ITO), serta kemudahan aplikasi melalui metode cetak atau semprot. Namun, material ini menghadapi tantangan berupa korosi, oksidasi, dan stabilitas mekanik yang dapat menurunkan performa akibat tekanan atau lenturan berulang. Meskipun demikian, silver nanowires tetap menjadi solusi inovatif untuk pengembangan perangkat optoelektronik yang efisien dan fleksibel.

Gambar 8 menunjukkan nanomaterial dengan struktur seperti kawat nano yang digunakan untuk meningkatkan transportasi elektron dan mengurangi hambatan listrik dalam sel surya.

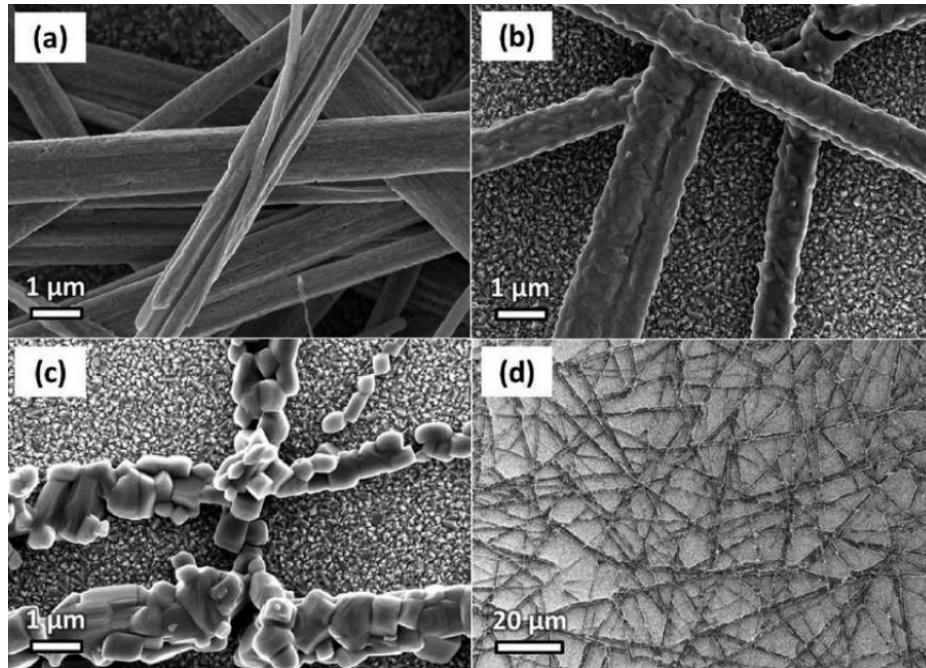


Gambar 8 Hasil SEM dari *silver nanowires* AgNWs (Mauro S. Ferreira, 2010.)

### 3.3 Perovskite

*Perovskite* nanokristal adalah material dengan struktur kristal berbentuk kubus dan formula umum  $ABX_3$ , di mana A merupakan ion organik atau anorganik, B adalah logam seperti timbal (Pb) atau timah (Sn), dan X adalah anion halida seperti klorida ( $Cl^-$ ), bromida ( $Br^-$ ), atau iodida ( $I^-$ ). Material ini memiliki karakteristik yang menarik, seperti kemudahan produksi melalui metode berbasis larutan, bobot yang ringan, dan fleksibilitas tinggi, dengan ukuran berkisar antara 10 hingga 100 nanometer. Sifat unggul perovskite meliputi efisiensi konversi energi yang tinggi, mencapai hingga 25%, dan kemampuan penyerapan spektrum cahaya yang luas, termasuk cahaya tampak dan inframerah. Namun, material ini memiliki kelemahan berupa stabilitas rendah, yang membuatnya rentan terhadap kelembaban dan paparan sinar UV. Dalam aplikasinya, perovskite nanokristal digunakan pada sel surya generasi baru yang fleksibel dan ringan, menjadikannya salah satu kandidat utama untuk teknologi panel surya masa depan.

Pada gambar 9 menunjukkan hasil SEM yang menunjukkan perubahan morfologi kawat nano *perovskite*  $MAPbX_3$  (X = I, Br, Cl) akibat pertukaran ion menggunakan larutan MABr dan MACl dalam *isopropanol* selama 60 menit. Kawat nano  $MAPbI_3$  (a) memiliki struktur halus, sementara  $MAPbBr_3$  (b) menunjukkan permukaan lebih kasar akibat penggantian *anion iodida* ( $I^-$ ) dengan *bromida* ( $Br^-$ ). Pada  $MAPbCl_3$  (c), pertukaran dengan klorida ( $Cl^-$ ) menghasilkan struktur granular dengan kristal kecil di permukaan, yang juga tampak terdistribusi sebagai jaringan pada skala lebih besar (d). Proses ini memodifikasi sifat optik dan elektronik material tanpa merusak struktur kawat nano, menjadikannya fleksibel untuk berbagai aplikasi seperti sel surya dan LED.



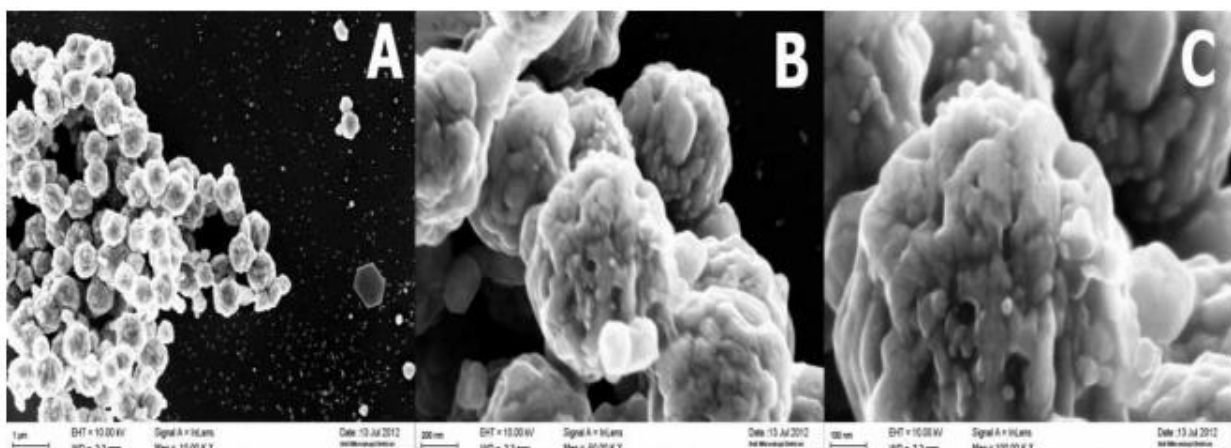
Gambar 9 Hasil SEM dari kristal perovskite  $ABX_3$  (Andrey A.petrov, 2016.)

### 3.4 Nanopartikel logam

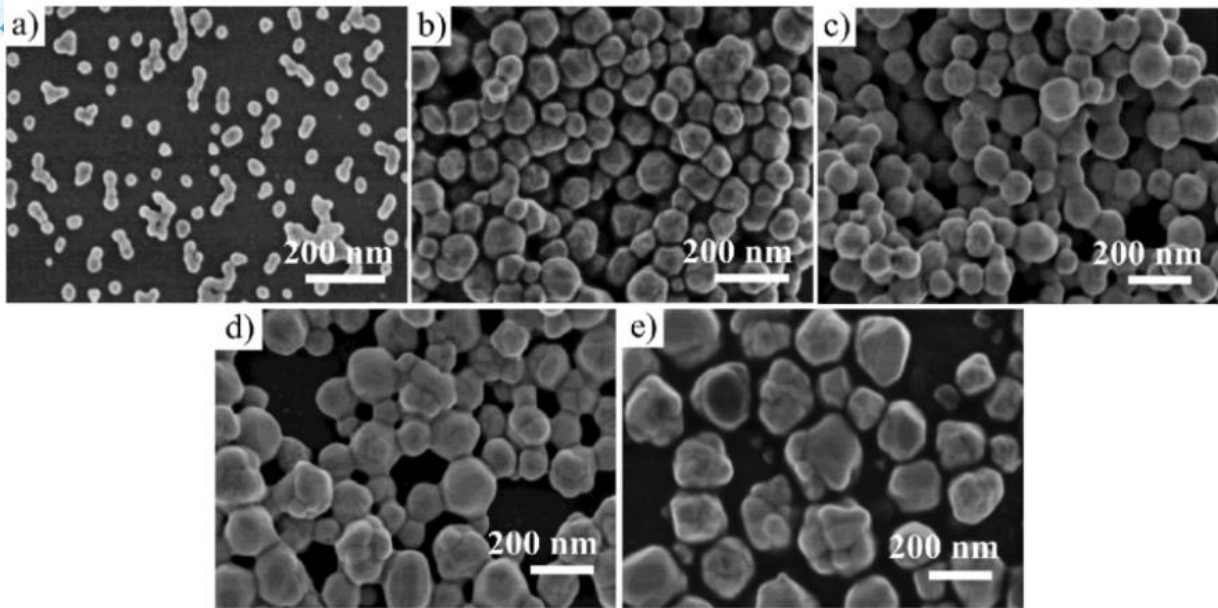
Nanopartikel seperti perak (Ag) dan emas (Au) digunakan untuk meningkatkan penyerapan cahaya melalui fenomena plasmonik. Fenomena ini terjadi ketika nanopartikel logam berinteraksi dengan cahaya dan memperkuat medan listrik lokal, sehingga meningkatkan efisiensi penyerapan foton oleh lapisan aktif panel surya.

Gambar 10 menunjukkan Foto FESEM nanopartikel perak (Ag) dengan konsentrasi larutan PVP 0.8 mmol dan volume larutan asam askorbit 0.10 mL. (A) Perbesaran 10.000 kali, (B) Perbesaran 50.000 kali, (C) Perbesaran 100.000 kali

Gambar 11 Memindai gambar mikroskop elektron (SEM) dari nanopartikel Au dengan ukuran yang berbeda, (a) B48 nm; (b) B94nm; (c) B125nm; (d) B162nm; (e) B203nm.



Gambar 10 Hasil SEM dari nano partikel logam Ag (Rizky Ardie Yani, 2014)

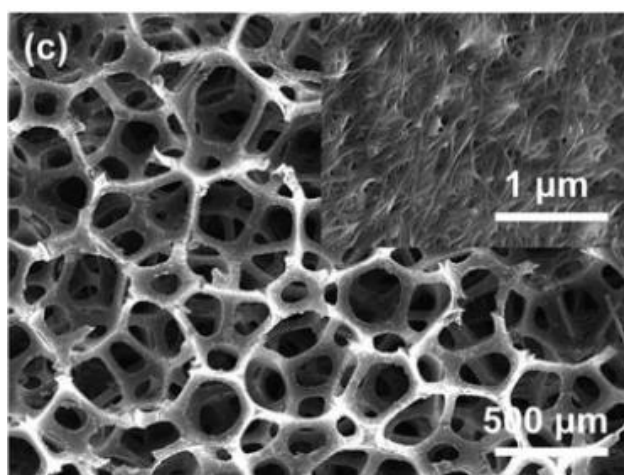


Gambar 11 Hasil SEM dari nano partikel logam Au (Zhong-Sheng Wang, 2016)

### 3.5 Carbon nanotubes

Nanotube karbon (*Carbon Nanotubes*, CNTs) adalah material berbentuk tabung silindris yang terdiri dari atom karbon tersusun dalam pola kisi heksagonal. CNTs memiliki sifat fisik dan kimia yang luar biasa, seperti konduktivitas listrik dan termal yang sangat tinggi, transparansi optik yang baik, kekuatan mekanik yang luar biasa, dan rasio luas permukaan terhadap volume yang besar. Terdapat dua jenis utama CNTs, yaitu *single-walled carbon nanotubes* (SWCNTs) yang memiliki satu lapisan dinding karbon, dan *multi-walled carbon nanotubes* (MWCNTs) yang terdiri dari beberapa lapisan dinding karbon.

Gambar 12 menunjukkan struktur *Carbon Nanotube* dalam bentuk jaringan mikro-pori yang kompleks dengan serat nano di dalamnya. Kombinasi area permukaan tinggi dan konduktivitas listrik optimal menjadikan CNT material yang sangat cocok untuk meningkatkan performa panel surya melalui penyerapan cahaya maksimum dan transportasi elektron yang efisien.



Gambar 12 Hasil SEM dari *carbon nanotubes* C (xing xie, 2011.)

Gambar 12 merupakan hasil karakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) yang menunjukkan struktur material berbasis *carbon nanotube* (CNT). Pada bagian utama gambar, terlihat struktur berpori dengan skala 500  $\mu\text{m}$ , yang menggambarkan distribusi jaringan karbon nanotube dalam bentuk seperti busa atau struktur berongga yang teratur. Struktur ini memberikan area permukaan yang sangat besar, suatu sifat penting untuk aplikasi panel surya karena dapat meningkatkan penyerapan cahaya dan efisiensi konversi energi.

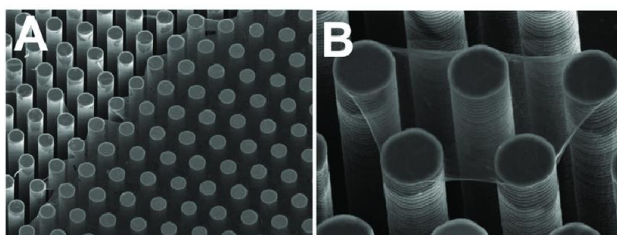
Pada inset gambar 12 dengan perbesaran lebih tinggi (1  $\mu\text{m}$ ), terlihat bahwa permukaan pori-pori ini terdiri dari serat-serat karbon nanotube yang saling terjalin dengan ukuran nano. Struktur nanotube tersebut membentuk jaringan konduktif yang memungkinkan pergerakan elektron dengan efisiensi tinggi, sehingga dapat meminimalkan hambatan listrik pada panel surya. Selain itu, kombinasi porositas dan sifat mekanis karbon nanotube memberikan keuntungan tambahan seperti fleksibilitas dan stabilitas material, menjadikannya kandidat yang baik untuk berbagai jenis teknologi panel surya, terutama jenis berbasis fleksibel atau transparan.

Dalam teknologi panel surya, CNTs digunakan untuk berbagai aplikasi yang bertujuan meningkatkan efisiensi dan kinerja. Salah satu penggunaan utamanya adalah sebagai pengganti elektroda transparan konvensional berbasis *Indium Tin Oxide* (ITO). Elektroda CNTs memiliki keunggulan dalam hal fleksibilitas, ketahanan terhadap retakan, dan efisiensi biaya jangka panjang. Hal ini menjadikannya pilihan yang ideal untuk panel surya fleksibel yang dirancang untuk aplikasi portabel atau pada permukaan melengkung.

### 3.6 Graphene

*Graphene* adalah material dua dimensi yang terdiri dari lapisan atom karbon yang tersusun dalam struktur hexagonal dengan sifat unggul seperti konduktivitas listrik tinggi, transparansi optik, kekuatan mekanik, dan fleksibilitas. Dalam panel surya, graphene digunakan sebagai elektroda transparan pengganti *Indium Tin Oxide* (ITO), lapisan transportasi muatan, dan pelindung terhadap kerusakan lingkungan. Keunggulannya meliputi efisiensi transportasi muatan yang lebih baik, peningkatan penyerapan cahaya, dan daya tahan terhadap kondisi ekstrem. Meskipun potensial, tantangan utama penggunaan graphene adalah biaya produksi tinggi dan optimisasi integrasi dengan material lain. Dengan pengembangan lebih lanjut, graphene berpotensi menjadi material kunci untuk panel surya yang lebih efisien, fleksibel, dan tahan lama.

Gambar 13 menunjukkan potensi *graphene* sebagai material nano dengan struktur yang dapat dikontrol, baik dari segi ketebalan, pola, maupun keteraturan. Struktur seperti ini dapat digunakan untuk berbagai aplikasi teknologi canggih, seperti perangkat nanoelektronik, panel surya, sensor, dan material dengan konduktivitas tinggi serta kekuatan mekanis luar biasa.



Gambar 13 Hasil SEM dari *graphene* C dengan skala 5 nano meter (Nickolay Ravlik, 2011)

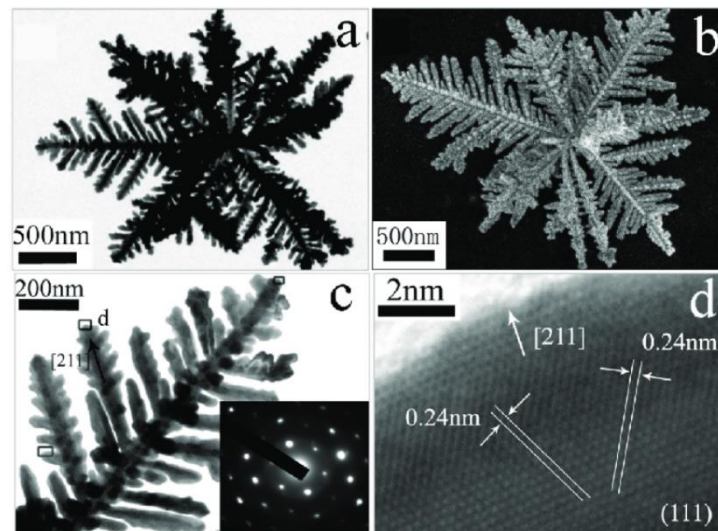
Gambar di atas menunjukkan hasil karakterisasi Scanning Electron Microscope (SEM) dari struktur berbasis graphene dalam berbagai orientasi dan perbesaran. Berikut adalah penjelasan tiap bagian dari gambar:

Gambar A: Menampilkan pandangan struktur graphene dalam bentuk pilar beraturan yang tersusun secara periodik. Struktur ini menunjukkan bahwa graphene dapat diproses untuk membentuk pola yang rapi dan terkontrol. Skala gambar menunjukkan ukuran mikro yang menyoroti keteraturan geometris material tersebut.

Gambar B: Perbesaran lebih lanjut dari struktur pilar graphene, yang memperlihatkan detail tepi dan ketebalan material graphene. Pilar ini tampak memiliki dinding yang tipis, konsisten dengan karakteristik graphene sebagai material berlapis atom tipis dengan sifat mekanis yang kuat.

### 3.7 Dendritik gold nanostructures

*Dendritic gold* (emas dendritik) merupakan material nano dengan struktur bercabang menyerupai pohon yang memiliki aplikasi luas pada panel surya. Material ini meningkatkan efisiensi melalui fenomena *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR), yaitu interaksi cahaya dengan elektron permukaan yang menghasilkan resonansi, sehingga memperbesar penyerapan cahaya pada lapisan aktif. Struktur emas dendritik bekerja sebagai perangkap cahaya, menangkap dan memantulkan cahaya, yang memungkinkan lebih banyak energi terserap. Selain itu, emas dendritik juga berperan dalam transportasi elektron yang efisien. Struktur bercabangnya menciptakan jalur langsung untuk elektron, mengurangi peluang rekombinasi elektron, yang secara signifikan meningkatkan arus listrik yang dihasilkan. Material ini juga memiliki stabilitas kimia yang tinggi, sehingga cocok untuk aplikasi jangka panjang dalam thin-film solar cells, organic photovoltaics (OPVs), dan perovskite solar cells. Meskipun efektif, penggunaan emas dendritik sering dibatasi oleh biaya produksinya yang relatif mahal dibandingkan material lain, untuk hasil sem dari *dendritik gold* bisa dilihat pada gambar 14 di bawah.



Gambar 14 Hasil SEM *dendritik gold nanostructures* (Deping Huang, 2012)

Gambar A menampilkan citra dendritik emas yang diambil dengan Scanning Electron Microscopy (SEM) pada skala 500 nm. Struktur dendritik emas terlihat menyerupai bentuk bintang atau pohon bercabang dengan simetri yang baik dan cabang-cabang yang teratur. Struktur ini memiliki area permukaan yang tinggi berkat percabangan yang halus dan kompleks, sehingga dapat meningkatkan interaksi dengan

cahaya. Hal ini sangat bermanfaat dalam panel surya, di mana area permukaan yang besar dapat memaksimalkan penyerapan cahaya untuk meningkatkan efisiensi konversi energi.

Gambar B memperlihatkan struktur dendritik emas dari sudut pandang yang berbeda namun masih pada skala 500 nm. Struktur cabang-cabang terlihat lebih detail dan menunjukkan pertumbuhan yang teratur dari pusat ke arah luar. Pertumbuhan simetris ini menunjukkan bahwa kondisi sintesis mendukung pembentukan dendritik emas dengan kontrol yang baik. Struktur seperti ini sangat cocok untuk konduktivitas listrik dan pemantulan cahaya dalam aplikasi nano-optik seperti panel surya.

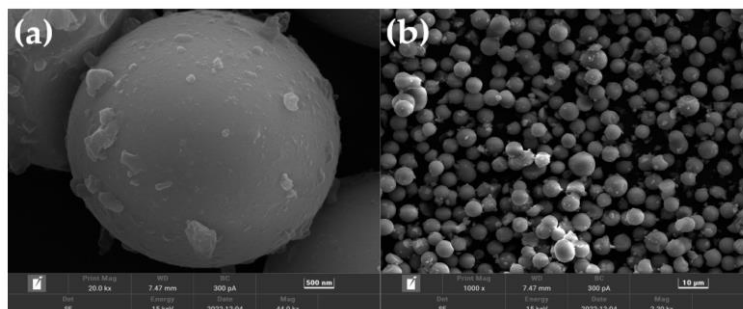
Gambar C memberikan tampilan perbesaran lebih tinggi dari bagian cabang dendritik emas pada skala 200 nm. Percabangan terlihat lebih halus, dengan struktur nano yang membentuk pola terorganisir sepanjang cabang utama. Simetri ini menunjukkan kualitas kristalin yang baik, yang ditandai oleh penyisipan citra difraksi elektron *Selected Area Electron Diffraction* (SAED) di bagian bawah gambar. Pola difraksi menunjukkan sifat kristalin emas dengan orientasi bidang kristal tertentu. Sifat ini sangat mendukung konduktivitas tinggi yang diperlukan untuk meningkatkan performa panel surya.

Gambar D menunjukkan gambar resolusi tinggi menggunakan *High-Resolution Transmission Electron Microscopy* (HRTEM) pada skala 2 nm. Terlihat jarak antar bidang kristal dengan nilai 0,24 nm, yang diidentifikasi sebagai bidang (111) dan [211] dari struktur kristal emas. Bidang ini menunjukkan bahwa dendritik emas memiliki struktur kristal FCC (*face-centered cubic*) yang ideal untuk material dengan konduktivitas listrik dan optik tinggi. Kombinasi struktur ini membantu dalam transportasi elektron yang efisien dan penyerapan cahaya maksimal dalam panel surya.

### 3.8 Aerogel silika nano

Aerogel silika nano adalah material ultra ringan dengan struktur tiga dimensi yang terdiri dari jaringan nanopori yang sebagian besar terisi udara. Material ini memiliki densitas yang sangat rendah, transparansi tinggi, dan konduktivitas termal yang sangat rendah, menjadikannya isolator termal yang unggul. Berkat sifat ini, aerogel silika nano semakin banyak digunakan dalam pengembangan panel surya untuk meningkatkan efisiensi dan kinerjanya.

Gambar 15 menunjukkan citra Scanning Electron Microscope (SEM) dari aerogel silika nano. Panel (a) memperlihatkan tampilan close-up atau perbesaran tinggi dari partikel silika dengan struktur permukaan kasar yang khas, mengindikasikan morfologi mikropartikel. Panel (b) memperlihatkan pandangan dengan perbesaran lebih rendah, menampilkan distribusi partikel silika dalam jumlah yang lebih banyak, menunjukkan bahwa partikel-partikel tersebut memiliki ukuran yang relatif seragam dan terdispersi dengan baik. Gambar ini dapat digunakan untuk menganalisis struktur morfologi dan distribusi ukuran partikel aerogel silika nano.



Gambar 15 Hasil SEM dari aerogel silika nano  $\text{SiO}_2$  (Linghan Li, 2023)

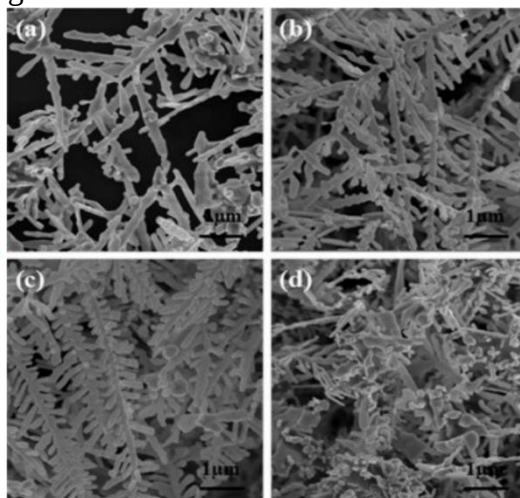
Dalam aplikasi panel surya, aerogel silika nano berperan sebagai lapisan isolasi termal untuk meminimalkan kehilangan panas dari modul surya. Pada panel surya fotovoltaik, kehilangan energi akibat panas yang dihasilkan oleh sinar matahari dapat menurunkan efisiensi konversi energi. Dengan menambahkan lapisan aerogel silika nano, panas yang terakumulasi di permukaan panel dapat diisolasi, sehingga suhu optimal panel tetap terjaga dan kinerja panel dapat meningkat.

Selain itu, transparansi optik aerogel silika nano memungkinkan cahaya matahari menembusnya tanpa gangguan signifikan, sehingga tidak mengurangi jumlah cahaya yang mencapai sel surya. Ini sangat penting karena penurunan cahaya yang diterima oleh sel surya dapat berdampak langsung pada efisiensi konversi energi. Dengan kombinasi isolasi termal dan transparansi tinggi, aerogel silika nano memberikan solusi ideal untuk meningkatkan efisiensi panel surya di berbagai kondisi lingkungan.

### 3.9 Dendritic silver nanostructures

*Dendritic silver* (perak dendritik) adalah material nano dengan struktur bercabang serupa emas dendritik, namun lebih ekonomis. Material ini banyak digunakan pada panel surya karena sifat reflektivitasnya yang tinggi, yang membantu meningkatkan efisiensi penyerapan cahaya. Perak dendritik juga menghasilkan efek plasmonik seperti emas dendritik, yang memperkuat penyerapan cahaya pada panjang gelombang tertentu. Efek ini memungkinkan penggunaan energi cahaya yang lebih optimal oleh lapisan aktif. Selain itu, perak dendritik mampu memantulkan cahaya yang tidak terserap pada kontak pertama kembali ke lapisan aktif, sehingga meningkatkan efisiensi keseluruhan. Material ini juga memiliki stabilitas termal yang baik, membuatnya cocok digunakan pada panel surya di lingkungan bersuhu tinggi. Perak dendritik sering diaplikasikan dalam *Dye-Sensitized Solar Cells* (DSSC), thin-film solar cells, dan plasmonic solar cells. Dengan biaya produksi yang lebih rendah, material ini menjadi pilihan ideal untuk teknologi panel surya yang efisien dan ekonomis.

Gambar 15 silver nano ini memperlihatkan evolusi struktur dari tahap awal hingga struktur yang lebih padat dan kompleks. Struktur dendritik silver dengan percabangan yang halus dan luas permukaan tinggi sangat ideal untuk aplikasi panel surya, karena dapat meningkatkan efisiensi penyerapan cahaya dan konduktivitas listrik. Gambar (b) dan (c) menunjukkan struktur yang paling optimal untuk aplikasi ini, karena memiliki kepadatan yang tinggi dan keteraturan yang baik, untuk hasil sem dari dendritik silver dapat dilihat pada gambar 15 dibawah.



Gambar 16 Hasil SEM dari *dendritic silver nanostructures* (Research gate, huawang, 2017)

Gambar a menunjukkan struktur dendritik silver nano dengan cabang-cabang yang masih jarang dan terlihat terisolasi. Cabang-cabang panjangnya cukup jelas dan terdefinisi dengan baik, namun belum membentuk jaringan yang rapat. Pada tahap ini, partikel nano masih dalam proses awal pembentukan struktur dendritik. Skala 1  $\mu\text{m}$  memperlihatkan bahwa ukuran percabangan tersebut berada dalam rentang mikrometer, yang cocok untuk aplikasi dalam teknologi nano.

Gambar b memperlihatkan perkembangan struktur dendritik yang lebih padat dibandingkan gambar sebelumnya. Cabang-cabangnya saling terhubung dan membentuk jaringan yang lebih kompleks. Kepadatan ini mengindikasikan pertumbuhan yang lebih lanjut dari partikel nano, di mana struktur yang lebih rapat ini dapat meningkatkan sifat konduktivitas listrik. Skala 1  $\mu\text{m}$  tetap menunjukkan bahwa struktur ini berada dalam dimensi mikroskopis.

Gambar c menunjukkan struktur dendritik dengan pola yang lebih teratur dan cabang-cabang yang sejajar. Struktur yang lebih terorganisir ini ideal untuk mendukung pergerakan elektron, karena keteraturan percabangan dapat meningkatkan efisiensi transportasi listrik. Kepadatan yang seragam ini menjadikan struktur tersebut lebih stabil dan optimal untuk aplikasi yang memerlukan konduktivitas tinggi, seperti panel surya.

Gambar d menampilkan struktur dendritik dengan bentuk yang lebih kompleks dan pertumbuhan yang tidak teratur. Percabangan terlihat lebih rapat namun tidak seragam, sehingga membentuk struktur yang lebih kasar dan padat. Kompleksitas ini mungkin disebabkan oleh pertumbuhan dendritik yang lebih lanjut atau kondisi sintesis tertentu. Struktur seperti ini tetap berpotensi untuk digunakan dalam penyebaran cahaya (scattering) namun mungkin kurang optimal untuk transportasi elektron dibandingkan struktur pada gambar (b) atau (c).

Tabel 1 Sifat, ukuran, efisiensi, stabilitas dan aplikasi Nanomaterial

| Jenis Nanomaterial             | Ukuran             | Sifat Utama                                                                                    | Efisiensi                                 | Stabilitas                           | Aplikasi                                       |
|--------------------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------|
| <b>Quantum Dots (QDs)</b>      | 1-200 nm           | Menyerap spektrum cahaya lebih luas, kontrol bandgap energi, multiple exciton generation (MEG) | Hingga 18.1%                              | Stabilitas masih menjadi tantangan   | QDSC, tandem solar cells                       |
| <b>Nanowires</b>               | Diameter 10-100 nm | Konduktivitas listrik tinggi, fleksibilitas, transparansi                                      | Meningkatkan efisiensi transport elektron | Rentan terhadap oksidasi             | Elektroda transparan, optoelektronik fleksibel |
| <b>Perovskite</b>              | 10-100 nm          | Penyerapan spektrum luas, efisiensi konversi tinggi                                            | Hingga 25%                                | Rentan terhadap kelembapan, sinar UV | Perovskite solar cells                         |
| <b>Nanopartikel Logam</b>      | Sekitar 100 nm     | Efek plasmonik, meningkatkan penyerapan cahaya                                                 | Meningkatkan efisiensi foton              | Stabilitas kimia tinggi              | Thin-film solar cells, plasmonic solar cells   |
| <b>Carbon Nanotubes (CNTs)</b> | Diameter < 100 nm  | Konduktivitas listrik tinggi, kekuatan mekanik luar biasa                                      | Meningkatkan transport muatan             | Stabilitas tinggi                    | Elektroda transparan, panel fleksibel          |
| <b>Graphene</b>                | Ketebalan atom     | Konduktivitas listrik tinggi,                                                                  | Meningkatkan efisiensi                    | Stabilitas tinggi                    | Pengganti ITO, transport                       |

|                            |                             | fleksibilitas,<br>transparansi optik                         | transport<br>muatan           |                         | muatan,<br>pelindung UV                      |
|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------|
| <b>Dendritic Gold</b>      | Cabang nano 500 nm          | Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR), perangkap cahaya | Meningkatkan efisiensi cahaya | Stabilitas kimia tinggi | Thin-film solar cells, organic photovoltaics |
| <b>Aerogel Silika Nano</b> | Jaringan nanopori           | Transparansi tinggi, isolator termal                         | Meminimalkan kehilangan panas | Stabilitas tinggi       | Isolasi termal untuk modul surya             |
| <b>Dendritic Silver</b>    | Cabang nano 1 $\mu\text{m}$ | Efek plasmonik, reflektivitas tinggi                         | Meningkatkan efisiensi cahaya | Stabilitas termal baik  | DSSC, thin-film solar cells                  |

Tabel 2 Warna, porositas, dan peran dalam panel surya

| Jenis Nanomaterial             | Warna                       | Porositas                              | Peran dalam Panel Surya                                                                |
|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Quantum Dots (QDs)</b>      | Beragam (tergantung ukuran) | Tidak berpori                          | Menyerap spektrum cahaya lebih luas, meningkatkan efisiensi konversi energi.           |
| <b>Nanowires</b>               | Perak                       | Tidak berpori                          | Meningkatkan transport elektron, digunakan sebagai elektroda transparan.               |
| <b>Perovskite</b>              | Kuning keemasan, oranye     | Tidak berpori                          | Penyerapan spektrum cahaya luas, meningkatkan efisiensi konversi energi.               |
| <b>Nanopartikel Logam</b>      | Perak, emas                 | Tidak berpori                          | Meningkatkan penyerapan cahaya melalui efek plasmonik.                                 |
| <b>Carbon Nanotubes (CNTs)</b> | Hitam                       | Tidak berpori, namun struktur berongga | Meningkatkan transport elektron, menggantikan elektroda transparan konvensional.       |
| <b>Graphene</b>                | Hitam transparan            | Tidak berpori                          | Menggantikan elektroda ITO, memfasilitasi transport muatan, meningkatkan stabilitas.   |
| <b>Dendritic Gold</b>          | Emas                        | Tidak berpori                          | Memperbesar penyerapan cahaya melalui resonansi plasmonik, perangkap cahaya.           |
| <b>Aerogel Silika Nano</b>     | Transparan                  | Sangat berpori                         | Isolasi termal, meminimalkan kehilangan panas tanpa menghalangi cahaya.                |
| <b>Dendritic Silver</b>        | Perak                       | Tidak berpori                          | Memperkuat penyerapan cahaya, memantulkan kembali cahaya untuk efisiensi lebih tinggi. |

Tabel 3 Perbandingan penerapan nanomaterial pada panel surya

| Jenis Nanomaterial  | Tanpa Nanomaterial                                                                                             | Dengan Nanomaterial                                                                                                     |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Quantum Dots</b> | Penyerapan cahaya terbatas pada spektrum tertentu, efisiensi rendah pada cahaya rendah atau multi-spektrum.    | Penyerapan cahaya multi-spektrum yang lebih baik, peningkatan efisiensi melalui pemanfaatan cahaya infra merah atau UV. |
| <b>Nanowires</b>    | Konduktivitas listrik lebih rendah, hambatan transportasi muatan tinggi, terutama pada material polikristalin. | Transportasi muatan lebih efisien dengan konduktivitas tinggi dan pengurangan rekombinasi muatan.                       |

## Jurnal Ilmiah Sain dan Teknologi

|                                |                                                                                                                                      |                                                                                                                          |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Perovskite</b>              | Tanpa lapisan perovskite, material aktif lain seperti silikon kurang efisien pada penyerapan cahaya pada panjang gelombang tertentu. | Efisiensi penyerapan cahaya tinggi, ringan, fleksibel, dan lebih murah dibandingkan silikon konvensional.                |
| <b>Nano Partikel Logam</b>     | Penyerapan cahaya sering tidak optimal karena reflektansi tinggi pada permukaan sel surya.                                           | Efek plasmonik meningkatkan penyerapan cahaya pada panjang gelombang tertentu, meningkatkan efisiensi energi.            |
| <b>Carbon Nanotubes (CNTs)</b> | Elektroda konvensional seperti ITO cenderung rapuh, konduktivitas listrik rendah pada perangkat fleksibel.                           | Elektroda fleksibel dengan konduktivitas tinggi, memungkinkan aplikasi pada panel fleksibel atau melengkung.             |
| <b>Graphene</b>                | Elektroda transparan konvensional rapuh dan mahal, sulit digunakan pada desain panel fleksibel atau ringan.                          | Elektroda transparan yang fleksibel, murah, dan tahan lama, meningkatkan efisiensi transportasi muatan.                  |
| <b>Dendritik Polimer Nano</b>  | Polimer biasa memiliki luas permukaan kecil dan efisiensi rendah dalam transportasi muatan pada sel surya organik.                   | Penyerapan cahaya yang lebih efisien, transportasi muatan lebih cepat, dan stabilitas termal lebih baik.                 |
| <b>Aerogel Silika Nano</b>     | Kehilangan energi akibat panas tinggi pada permukaan panel surya, efisiensi menurun pada lingkungan ekstrem.                         | Isolasi termal superior, transparansi tinggi, dan perlindungan terhadap kerusakan lingkungan, menjaga efisiensi optimal. |

#### 4. Keterbatasan dan kelebihan nanoteknologi pada panel surya

Kelebihan dan keterbatasan nanoteknologi pada panel surya memengaruhi pengembangan dan penerapannya. Nanoteknologi dapat meningkatkan efisiensi konversi energi panel surya melalui peningkatan penyerapan cahaya, pengurangan kerugian energi, serta peningkatan stabilitas dan fleksibilitas material. Namun, meskipun menjanjikan, teknologi ini juga menghadapi beberapa tantangan, seperti kesulitan dalam produksi material skala besar, potensi dampak lingkungan, serta masalah terkait kestabilan jangka panjang dan biaya produksi yang lebih tinggi.

##### 4.1 Keterbatasan nanoteknologi pada panel surya

Meskipun nanoteknologi menjanjikan banyak inovasi, penerapannya pada panel surya masih menghadapi sejumlah tantangan. Salah satu kendala utama adalah biaya awal pengembangan dan produksi yang relatif tinggi, membuatnya sulit diakses oleh pasar umum. Selain itu, stabilitas material nano seperti *perovskite* menjadi perhatian, karena rentan terhadap degradasi akibat kelembaban dan sinar UV. Produksi nanomaterial dalam skala besar juga masih menjadi tantangan, mengingat proses manufaktur yang kompleks dan membutuhkan infrastruktur khusus. Tidak hanya itu, potensi dampak lingkungan dan kesehatan akibat penggunaan nanopartikel tertentu, seperti nanopartikel perak dan nanotube karbon, menjadi isu yang perlu diatasi melalui pengelolaan yang cermat. Selain itu, efektivitas teknologi ini belum sepenuhnya merata di berbagai kondisi lingkungan, sehingga masih memerlukan penelitian dan pengembangan lebih lanjut untuk mencapai stabilitas efisiensi yang optimal.

##### 4.2. Kelebihan nanoteknologi pada panel surya

Di sisi lain, nanoteknologi menawarkan keunggulan signifikan dalam pengembangan panel surya modern. Dengan menggunakan material seperti *quantum dots* dan *perovskite* nanokristal, panel surya mampu menangkap spektrum cahaya yang lebih luas, termasuk cahaya inframerah dan ultraviolet, sehingga meningkatkan efisiensi konversi energi. Selain itu, nanomaterial seperti nanotube karbon atau nanopartikel perak memungkinkan penyerapan cahaya yang lebih baik, bahkan dalam kondisi pencahayaan rendah. Keunggulan lainnya adalah pengurangan biaya produksi melalui penggunaan material yang lebih tipis dan ringan, seperti pada sel surya film tipis (*thin-film solar cells*). Fleksibilitas desain yang ditawarkan nanoteknologi juga

membuka peluang aplikasi pada permukaan tidak datar, seperti bangunan, kendaraan, dan perangkat portabel. Ketahanan yang lebih baik terhadap degradasi lingkungan pada beberapa nanomaterial, seperti CIGS, juga memperpanjang umur panel surya, menjadikannya solusi berkelanjutan untuk kebutuhan energi bersih di masa depan

### 5. Prospek masa depan

Masa depan nanoteknologi di bidang panel surya sangat menjanjikan, dengan berbagai inovasi yang terus berkembang untuk meningkatkan efisiensi dan menurunkan biaya produksi. Pengembangan material *hybrid* seperti *perovskite-quantum dots* memberikan potensi besar bagi sel surya generasi baru dengan efisiensi konversi energi yang tinggi dan kemampuan memanfaatkan spektrum cahaya secara lebih optimal. Teknologi roll-to-roll printing juga menjadi terobosan signifikan, memungkinkan produksi sel surya secara massal pada substrat fleksibel dengan biaya lebih rendah, sekaligus membuka aplikasi pada perangkat portabel, kendaraan, dan bangunan. Integrasi nanoteknologi dalam sel surya, seperti Quantum Dot Solar Cells (QDSC) dan nanokristal perovskite, menawarkan efisiensi tinggi melalui mekanisme inovatif seperti efek eksiton multipel dan biaya material yang lebih terjangkau dibandingkan silikon konvensional. Meskipun demikian, tantangan seperti stabilitas material, perlindungan terhadap kelembapan, dan keberlanjutan lingkungan dalam memproduksi nanomaterial tetap menjadi perhatian utama. Dengan riset yang terus berlanjut, nanoteknologi memiliki potensi untuk merevolusi energi terbarukan, menjadikannya lebih terjangkau, efisien, dan dapat diakses oleh masyarakat di seluruh dunia.

### 6. Kesimpulan

Nanoteknologi memainkan peran krusial dalam meningkatkan efisiensi dan kinerja panel surya, yang pada gilirannya dapat mendukung pengembangan sumber energi terbarukan yang lebih efektif. Melalui penerapan material pada skala nanometer, seperti quantum dots, perovskite, dan nanopartikel logam, nanoteknologi mampu meningkatkan penyerapan cahaya, efisiensi konversi energi, serta stabilitas material yang digunakan dalam sel surya. Quantum dots, misalnya, memungkinkan penyerapan spektrum cahaya yang lebih luas, sementara *perovskite* nanokristal menawarkan kinerja tinggi dengan biaya produksi yang lebih rendah dibandingkan material konvensional. Selain itu, nanoteknologi juga mendukung pengembangan sel surya fleksibel, ringan, dan lebih murah, yang memungkinkan penerapan yang lebih luas, termasuk pada bangunan atau perangkat portabel. Meskipun demikian, tantangan utama dalam penerapan nanoteknologi pada panel surya meliputi biaya produksi yang masih tinggi, kestabilan jangka panjang material, dan dampak lingkungan yang perlu diteliti lebih lanjut. Namun, dengan kemajuan riset dan pengembangan, nanoteknologi memiliki potensi besar untuk menciptakan panel surya yang lebih efisien, berkelanjutan, dan terjangkau di masa depan, yang pada akhirnya akan mempercepat adopsi energi terbarukan di seluruh dunia.

### Daftar Pustaka

- “(A) TEM, (b) SEM, and (c, d) HRTEM Images of Dendritic Gold... | Download Scientific Diagram.” Accessed January 7, 2025. [https://www.researchgate.net/figure/a-TEM-b-SEM-and-c-d-HRTEM-images-of-dendritic-gold-nanostructures-prepared-in-a\\_fig1\\_230644205](https://www.researchgate.net/figure/a-TEM-b-SEM-and-c-d-HRTEM-images-of-dendritic-gold-nanostructures-prepared-in-a_fig1_230644205).
- “apa itu sel surya perovskite - Pengetahuan - Zhengzhou Alfa Chemical Co, Ltd.” Accessed January 7, 2025. <https://id.alfachemar.com/info/an-overview-of-perovskite-solar-cells-42709980.html>.
- Xie, Xing, Meng Ye, Liangbing Hu, Nian Liu, James R. McDonough, Wei Chen, H. N. Alshareef, Craig S. Criddle, and Yi Cui. “Carbon Nanotube -Coated Macroporous

- Sponge for Microbial Fuel Cell Electrodes.” *Energy & Environmental Science* 5, no. 1 (2012): 5265–70. <https://doi.org/10.1039/C1EE02122B>.
- Yu, Byong Yong, and Seung-Yeop Kwak. “Carbon Quantum Dots Embedded with Mesoporous Hematite Nanospheres as Efficient Visible Light-Active Photocatalysts.” *Journal of Materials Chemistry* 22, no. 17 (April 3, 2012): 8345–53. <https://doi.org/10.1039/C2JM16931B>.
- J., Matthew, and Attila J. “Porphyrin Based Dye Sensitized Solar Cells.” In *Solar Cells - Dye-Sensitized Devices*, edited by Leonid A. Kosyachenko. InTech, 2011. <https://doi.org/10.5772/23955>.
- Petrov, Andrey A., Norman Pellet, Ji-Youn Seo, Nikolai A. Belich, Dmitriy Yu. Kovalev, Andrei V. Shevelkov, Eugene A. Goodilin, Shaik M. Zakeeruddin, Alexey B. Tarasov, and Michael Graetzel. “New Insight into the Formation of Hybrid Perovskite Nanowires via Structure Directing Adducts.” *Chemistry of Materials* 29, no. 2 (January 24, 2017): 587–94. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b03965>.
- Panwar, Kamlesh, Manjeet Jassal, and Ashwini K. Agrawal. “In Situ Synthesis of Ag–SiO<sub>2</sub> Janus Particles with Epoxy Functionality for Textile Applications.” *Particuology* 19 (April 2015): 107–12. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2014.06.007>.
- Zhang, Lu, and Zhong-Sheng Wang. “Gold Nanoparticles as an Ultrathin Scattering Layer for Efficient Dye-Sensitized Solar Cells.” *Journal of Materials Chemistry C* 4, no. 16 (2016): 3614–20. <https://doi.org/10.1039/C6TC00592F>.
- Pereira, Luiz F. C., C. G. Rocha, A. Latgé, and M. S. Ferreira. “A Computationally Efficient Method for Calculating the Maximum Conductance of Disordered Networks: Application to One-Dimensional Conductors.” *Journal of Applied Physics* 108, no. 10 (November 15, 2010): 103720. <https://doi.org/10.1063/1.3514007>.
- “Nanotechnology and Dye Sensitized Solar Cells.” Accessed January 7, 2025. <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=6260>.
- Kumar, Sandeep, Pragya Bharti, and Basudev Pradhan. “Performance Optimization of Efficient PbS Quantum Dots Solar Cells through Numerical Simulation.” *Scientific Reports* 13, no. 1 (June 29, 2023): 10511. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36769-y>.
- Patil, Kshitij, Dr Vishali P. Sonawane, and Yograj Gorakh Patil. “SCIENCE BEHIND THE NANO SOLAR CELL,” 2016. <https://www.semanticscholar.org/paper/SCIENCE-BEHIND-THE-NANO-SOLAR-CELL-Patil-Sonawane/69f0547723442f3e29c63ac753d8ecefcd7255b>.
- Prajapat, K., Dhonde, M., Sahu, K., Bhojane, P., Murty, V., Shirage, P.M., 2023. The evolution of organic materials for efficient dye-sensitized solar cells. *J. Photochem. Photobiol. C Photochem. Rev.* 55, 100586. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2023.100586>
- “SEM Image of a Silver Nanowire Film, Showing the Disordered Complex... | Download Scientific Diagram.” Accessed January 7, 2025. [https://www.researchgate.net/figure/SEM-image-of-a-silver-nanowire-film-showing-the-disordered-complex-network-Courtesy-of\\_fig6\\_45900594](https://www.researchgate.net/figure/SEM-image-of-a-silver-nanowire-film-showing-the-disordered-complex-network-Courtesy-of_fig6_45900594).
- “SEM Images of Suspended Graphene: (A) and (B). Single Layer Graphene... | Download Scientific Diagram.” Accessed January 7, 2025. [https://www.researchgate.net/figure/SEM-images-of-suspended-graphene-A-and-B-Single-layer-graphene-with-low-disorder\\_fig2\\_231027615](https://www.researchgate.net/figure/SEM-images-of-suspended-graphene-A-and-B-Single-layer-graphene-with-low-disorder_fig2_231027615).