

Carbon Quantum Dots sebagai Sensitiser Sel Surya: Sebuah Tinjauan Sintesis, Mekanisme, dan Aplikasi

Carbon Quantum Dots as Solar Cell Sensitizers: A Review of Synthesis, Mechanisms, and Applications

Dermawan Saro Halawa¹, Naswa Ayu Andhita¹, Marvin Horale Pasaribu^{1*}

¹Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Palangka Raya, 73111, Indonesia

Kata kunci

Carbon Quantum Dots, sensitizer, sel surya, pemisahan muatan, fotovoltaiik

Abstrak

Carbon Quantum Dots (CQDs) telah menjadi material sensitizer yang menjanjikan untuk meningkatkan kinerja sel surya berkat sifat optoelektronik yang dapat dimodifikasi dan sintesis yang ramah lingkungan. CQDs dapat disintesis dari berbagai prekursor organik kaya karbon melalui pendekatan top-down atau bottom-up. Metode top-down melibatkan pemecahan struktur karbon makroskopis menjadi material nano melalui arc discharge, oksidasi elektrokimia, atau ablasi laser, sedangkan teknik bottom-up seperti sintesis gelombang mikro dan perlakuan hidrotermal memungkinkan pengendalian sifat CQDs secara presisi. Pada sel surya tersensitisasi pewarna (DSSC), CQDs berperan ganda sebagai fotosensitizer dan reservoir elektron, meningkatkan pemisahan muatan dan kerapatan pembawa muatan selama fotoreaksi. Kemampuan unik ini menjadikan CQDs alternatif potensial pengganti sensitizer konvensional dalam aplikasi fotovoltaiik.

Keywords

Carbon Quantum Dots, sensitizers, solar cells, charge separation, photovoltaics

Abstract

Carbon Quantum Dots (CQDs) have emerged as promising sensitizer materials to enhance the performance of solar cells due to their tunable optoelectronic properties and eco-friendly synthesis. CQDs can be derived from diverse carbon-rich organic precursors through either top-down or bottom-up approaches. The top-down methods involve breaking down bulk carbon structures into nanoscale materials via arc discharge, electrochemical oxidation, laser ablation, or chemical oxidation, while bottom-up techniques, such as microwave synthesis, thermal decomposition, and hydrothermal treatment, enable precise control over CQD properties. When integrated into dye-sensitized solar cells (DSSCs), CQDs facilitate efficient charge separation and augment charge carrier density during photoreactions, owing to their dual functionality as photoactive sensitizers and electron reservoirs under visible light irradiation. Their unique ability to mimic traditional dyes while offering enhanced electron transfer kinetics positions CQDs as a viable alternative to conventional sensitizers in photovoltaic applications.

Sejarah Artikel
Diterima : (16-04-2025)
Disetujui : (24-05-2025)
Dipublikasi : (24-05-2025)

Email korespondensi: marvin.pasaribu@mipa.upr.ac.id
© 2025 Bohr: Jurnal Cendekia Kimia. *This work is licensed under*
a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

PENDAHULUAN

Permintaan akan energi listrik di Indonesia menunjukkan peningkatan yang signifikan, seiring dengan pertumbuhan populasi, serta perkembangan sektor ekonomi dan industri yang pesat [1]. Selain itu, isu perubahan iklim dan tingginya harga energi listrik yang berasal dari bahan bakar fosil semakin memperburuk kondisi ini. Sebagian besar energi yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil bergantung pada sumber daya alam yang tidak terbarukan dan akan habis seiring berjalannya waktu. Bahan bakar fosil sendiri terbentuk dari sisa-sisa mikroorganisme yang terdekomposisi selama jutaan tahun [2]. Sebagai solusi, sumber daya alam terbarukan, seperti energi matahari, diharapkan dapat menjadi alternatif untuk memenuhi kebutuhan energi manusia di masa depan secara berkelanjutan. Beberapa penelitian memperkirakan bahwa sumber energi tak terbarukan, seperti fosil, batubara, gas alam, dan minyak bumi, akan habis dalam waktu yang relatif dekat [3]. Sebaliknya, energi surya merupakan sumber energi terbesar yang tersedia di bumi, dengan kapasitas mencapai $1,7 \times 10^{14}$ kW, setara dengan pembakaran 6 juta ton batu bara per detik, yang dilepaskan ke bumi setiap hari. Sebagai energi alternatif yang dapat diperbaharui, energi matahari dapat diakses secara global tanpa menimbulkan polusi yang signifikan dan dengan dampak lingkungan yang sangat rendah [4].

Oleh karena itu, berbagai penelitian telah mengarah pada pemanfaatan energi matahari untuk menghasilkan energi listrik melalui sel surya. Sel surya atau sel fotovoltaik adalah perangkat yang mengubah energi cahaya menjadi energi

listrik melalui efek fotoelektrik. Pembangkit listrik tenaga surya tipe fotovoltaik bekerja dengan memanfaatkan perbedaan tegangan yang terjadi akibat efek fotoelektrik untuk menghasilkan listrik [1]. Sistem ini beroperasi dengan menangkap radiasi matahari melalui sel semikonduktor dan mengubahnya menjadi energi listrik. Salah satu tantangan utama penggunaan energi surya adalah ketergantungan hasil energi listrik pada intensitas sinar matahari yang diterima oleh sistem, yang berarti bahwa sel surya tidak dapat sepenuhnya menggantikan sumber energi utama dalam kondisi cuaca tertentu [5].

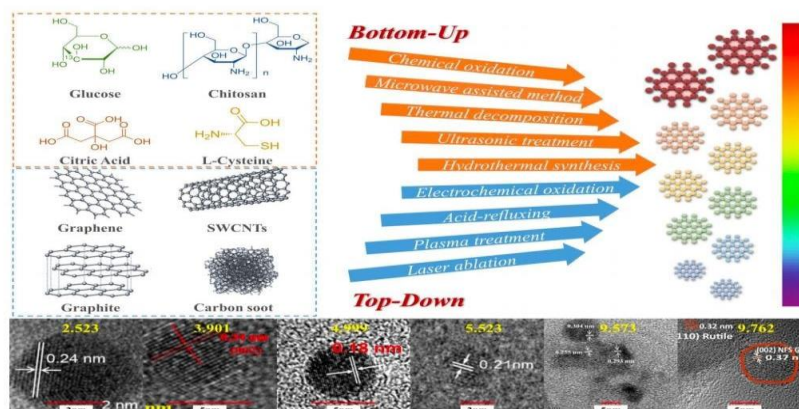
Tegangan dan arus yang dihasilkan oleh sel surya dipengaruhi oleh dua faktor fisik utama: intensitas radiasi matahari dan suhu lingkungan. Intensitas radiasi matahari yang diterima oleh sel surya berbanding lurus dengan tegangan dan arus yang dihasilkan. Sebaliknya, suhu lingkungan yang tinggi, meskipun dengan intensitas radiasi matahari yang sama, dapat menurunkan efisiensi sel surya. Peningkatan suhu sel di luar rentang suhu optimal (sekitar 25°C) akan mengurangi nilai tegangan (V_{oc}) secara signifikan, dengan setiap kenaikan suhu sebesar 10°C dapat mengurangi daya yang dihasilkan sekitar 0,4 persen [6]. Untuk memaksimalkan kinerja sel surya, suhu sel harus dijaga pada kondisi optimal. Salah satu komponen penting dalam sel surya yang mempengaruhi penyerapan foton dan konversinya menjadi energi listrik adalah sensitizer. Dalam beberapa tahun terakhir, para peneliti telah berfokus pada pengembangan material sensitizer yang lebih efisien untuk meningkatkan performa sel surya, dan salah satu material yang

menunjukkan potensi besar adalah Carbon Quantum Dots (CQDs) [7].

CQDs menarik perhatian luas di kalangan ilmuwan karena sifat-sifatnya yang unik, termasuk fluoresensi yang kuat dan kelarutannya yang lebih baik dibandingkan banyak materi karbon lainnya. Karena sifat-sifat tersebut, CQDs sering disebut sebagai "karbon fluoresen," yang mencerminkan potensi mereka dalam aplikasi optoelektronik dan bioimaging. Selain itu, banyak kemajuan yang telah dicapai dalam penelitian terkait sintesis, sifat kimia, serta aplikasi theranostik dari CQDs [8].

Carbon Quantum Dots (CQDs) merupakan nanomaterial karbon berukuran nano dengan struktur berdimensi nol yang menunjukkan kelarutan tinggi dalam medium berair, biokompatibilitas yang baik, serta bersifat

tidak toksik. Karakteristik unik ini menjadikan CQDs sebagai kandidat potensial untuk berbagai aplikasi fungsional, termasuk sensor kimia, pencitraan biologis (*bioimaging*), sistem penghantaran obat, dioda pemancar cahaya (LED), serta fotokatalisis. Kemampuan CQDs dalam bertindak sebagai donor maupun akseptor elektron memungkinkan terjadinya fenomena chemiluminescence dan electrochemiluminescence, yang sangat relevan untuk diterapkan dalam bidang katalisis, optoelektronik, dan sistem penginderaan. Selain itu, CQDs menawarkan keunggulan tambahan berupa sifat ramah lingkungan, efisiensi biaya, serta adanya efek kuantum berbasis ukuran yang memperkaya respons optiknya, sehingga memperluas cakupan aplikasinya dalam teknologi berbasis cahaya [9].



Gambar 1. Topografi titik karbon [10]

Pendekatan sintesis Carbon Quantum Dots (CQDs) secara umum diklasifikasikan ke dalam dua kategori utama, yaitu top-down dan bottom-up. Metode top-down melibatkan fragmentasi material karbon berukuran besar menjadi partikel nano melalui teknik seperti ablasi laser, oksidasi elektrokimia, oksidasi kimia, pelepasan busur, dan sintesis ultrasonik. Sebaliknya, pendekatan bottom-up mensintesis CQDs dari prekursor

molekuler kecil melalui proses seperti perlakuan hidrotermal, pirolisis termal, dan pemanasan gelombang mikro, yang memungkinkan kontrol morfologi dan sifat optik material secara lebih presisi. Menariknya, meskipun metode sintesis bervariasi, CQDs umumnya menunjukkan distribusi emisi yang berbeda-beda tergantung pada kondisi sintesis dan prekursor yang digunakan [10]. Berdasarkan hal tersebut, artikel tinjauan

ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi CQDs sebagai material sensitizer dalam teknologi sel surya guna meningkatkan efisiensi konversi energi. Evaluasi dilakukan melalui kajian sistematis terhadap literatur nasional dan internasional terpilih dalam kurun waktu 2014 hingga 2024, dengan fokus pada karakteristik struktural, optoelektronik, dan kinerja fungsional CQDs dalam aplikasi sel surya.

METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi dalam artikel tinjauan ini disusun untuk mengevaluasi potensi Carbon Quantum Dots (CQDs) sebagai material sensitizer dalam sistem sel surya. Proses kajian dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu: (1) pelacakan literatur secara sistematis dari berbagai sumber nasional dan internasional yang diterbitkan dalam kurun waktu 2014 hingga 2024, guna memperoleh referensi yang relevan dengan topik; (2) seleksi kritis terhadap publikasi yang memiliki relevansi tinggi dengan fokus kajian; dan (3) analisis mendalam terhadap isi literatur terpilih untuk menggali informasi mengenai karakteristik struktural dan optoelektronik CQDs serta mengevaluasi prospeknya sebagai komponen fungsional dalam teknologi sel surya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Prekursor Carbon Quantum Dots (CQDs)

Carbon Quantum Dots (CQDs) merupakan nanomaterial berbasis karbon yang dapat disintesis dari berbagai jenis prekursor organik, baik yang bersumber dari alam maupun hasil sintesis kimia. Bahan alami seperti buah-buahan, sayuran, limbah biomassa, serta senyawa organik kecil dan polimer sintesis merupakan sumber prekursor yang umum digunakan karena ketersediaannya yang melimpah, biaya yang relatif rendah, serta kemampuannya menghasilkan CQDs

dengan sifat optik dan elektronik yang optimal [11].

Beberapa prekursor mengandung struktur konjugasi π yang luas, seperti indigos, porfirin, dan ftalosianin, yang menjadikannya efektif dalam penyerapan cahaya. Modifikasi kimia dengan gugus electron-donating atau electron-withdrawing dapat memperluas rentang serapan dan meningkatkan efisiensi transfer energi melalui efek hiperkoordinasi. Selain itu, kompleks logam transisi, seperti kompleks berbasis ruthenium, sering digunakan sebagai sensitizer karena kemampuannya dalam menyediakan jalur transfer elektron yang stabil dan efisien pasca-fotoeksitasi [12].

Dalam konteks aplikatif, sensitizer umumnya terdiri atas dua komponen fungsional, yaitu chromophore sebagai pusat serapan foton, dan anchoring group yang berperan dalam melekatkan material ke substrat atau elektroda, seperti pada sel surya berbasis dye (dye-sensitized solar cells, DSSC).

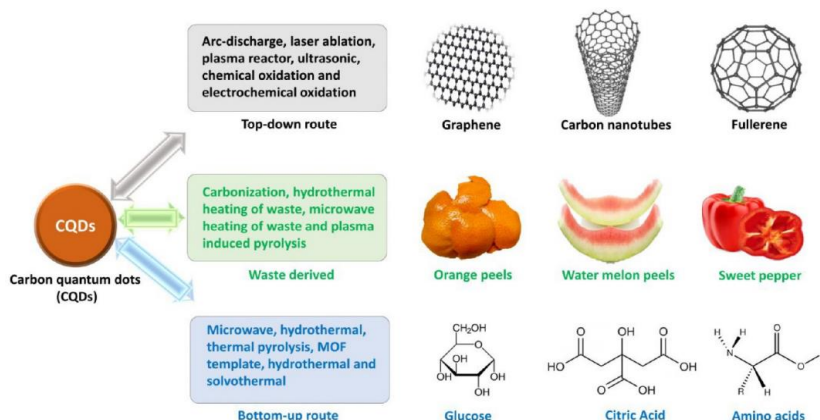
Sintesis Carbon Quantum Dots (CQDs)

Sintesis Carbon Quantum Dots (CQDs) umumnya dilakukan melalui dua pendekatan utama, yaitu top-down dan bottom-up. Pendekatan top-down melibatkan proses reduksi ukuran dari material karbon berskala makro, seperti grafit, serat karbon, nanotube karbon, dan batubara, menjadi partikel nano. Reduksi ini dicapai melalui teknik fisik maupun kimia, termasuk ablasi laser, pemecahan busur listrik, oksidasi kimia, serta perlakuan ultrasonik. Metode ini efektif dalam menghasilkan CQDs dengan distribusi ukuran partikel yang seragam dan struktur permukaan yang dapat dimodifikasi lebih lanjut [11].

Sebaliknya, pendekatan bottom-up didasarkan pada perakitan atom atau molekul kecil menjadi struktur nanokarbon melalui reaksi kimia tertentu, seperti

pirolisis termal, sintesis hidrotermal atau solvothermal, serta perlakuan gelombang mikro. Prekursor yang umum digunakan dalam pendekatan ini mencakup senyawa organik sederhana seperti asam sitrat, glukosa, fruktosa, dan asam askorbat. Prekursor tersebut juga dapat

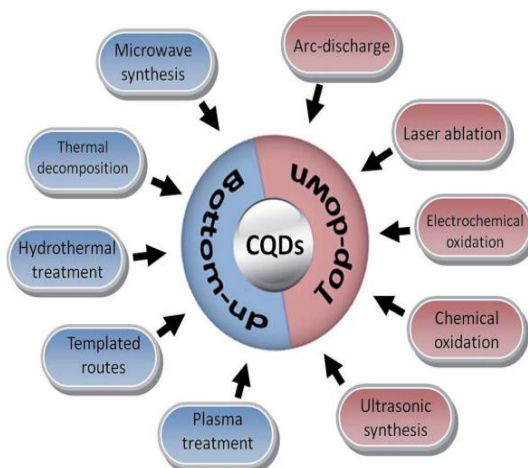
dikombinasikan dengan senyawa lain yang mengandung unsur heteroatom seperti nitrogen (N), boron (B), dan sulfur (S) untuk menghasilkan doped CQDs dengan karakteristik optoelektronik yang ditingkatkan.



Gambar 2. Sintesis CQD melalui berbagai teknik "top-down", "bottom-up", dan "waste-derived" [11]

Berbagai teknik, seperti pembelahan oksidatif, sintesis hidrotermal/solvothermal, sintesis elektrokimia, gelombang mikro, dan metode berbantuan ultrasonik, diterapkan dalam pendekatan top-down untuk menghasilkan Carbon Quantum Dots (CQDs). Sementara itu, dalam pendekatan bottom-up, pirolisis molekul organik kecil, seperti asam sitrat, glukosa, fruktosa, dan asam askorbat, digunakan untuk sintesis

CQD. Proses ini dapat ditingkatkan dengan penambahan molekul lain yang menghasilkan doping heteroatom, seperti nitrogen, boron, dan sulfur, untuk meningkatkan sifat optoelektroniknya. Sintesis CQD dari sumber limbah organik menawarkan keuntungan berupa proses yang sederhana, biaya rendah, dan ketersediaan bahan baku yang mudah diakses di alam.



Gambar 3. Carbon Quantum Dots (CQDs) dalam pendekatan Top-down dan Bottom-up [13]

1. Top-Down Approach

Pendekatan *top-down* melibatkan pemecahan material karbon besar menjadi partikel nano menggunakan berbagai teknik fisik dan kimia. Beberapa metode yang sering diterapkan dalam pendekatan ini meliputi penggilingan mekanik, pengelupasan kimia, oksidasi dan reduksi, serta ablasi laser. Sebagai contoh, penggilingan mekanik menggunakan penggiling untuk memecah material karbon menjadi partikel lebih kecil, sementara pengelupasan kimia menggunakan bahan kimia untuk menguraikan lapisan grafit menjadi lembaran grafena tipis, yang kemudian dapat diubah menjadi CQDs. Pendekatan ini memungkinkan pengendalian ukuran dan distribusi partikel yang baik, meskipun sering memerlukan peralatan yang rumit dan kondisi yang ekstrem [14].

Hidrotermal Method

Proses hidrotermal adalah metode bottom-up yang populer karena kemudahannya dan kemampuannya untuk menghasilkan partikel dengan ukuran seragam dan hasil kuantum yang tinggi. Teknik ini biasanya melibatkan pelarutan senyawa organik kecil dalam air atau pelarut organik sebagai prekursor reaksi. Campuran tersebut kemudian dimasukkan ke dalam autoklaf baja tahan karat yang dilapisi teflon, yang merupakan peralatan standar dalam prosedur hidrotermal. Metode hidrotermal dianggap sederhana dan efektif untuk memproduksi CQDs dengan hasil tinggi menggunakan sumber karbon dan nitrogen seperti asam sitrat dan etilen diamina. CQDs yang dihasilkan memiliki ukuran partikel yang seragam dan dapat dikendalikan, serta tidak memerlukan bahan kimia mahal. Keunggulan dari metode hidrotermal adalah kemampuannya menghasilkan CQDs berkualitas tinggi, yang sangat relevan untuk penggunaannya sebagai sensitizer dalam aplikasi fotokimia dan fotovoltaiik. Ukuran partikel yang seragam ini memastikan distribusi energi yang konsisten, yang sangat penting untuk

efisiensi penyerapan dan transfer energi cahaya [8].

Sintesis Metode Persiapan

Metode top-down yang paling populer untuk membuat CQDs menggunakan bahan karbon besar seperti graphene, grafit, dan serat karbon terbukti efektif. Salah satu metode yang ramah lingkungan dan dapat menghasilkan sensitizer dalam skala besar adalah metode elektrokimia. Metode ini memiliki kapasitas produksi yang besar dan tidak memerlukan bahan kimia berbahaya. Untuk menghasilkan sensitizer yang efisien, CQDs perlu memiliki keseragaman ukuran dan kemurnian yang tinggi. Meskipun metode elektrokimia dapat menghasilkan banyak CQDs, tantangan utama adalah pemurnian yang memakan waktu untuk menghilangkan MWCNTs dan memastikan kualitas serta konsistensi produk yang diperlukan untuk aplikasi sensitizer [15].

Ablasi Kimia

Ablasi kimia melibatkan penggunaan asam pengoksidasi untuk mengkarbonisasi bahan organik molekul. Pengendalian oksidasi dengan tepat dapat menghasilkan CQD yang lebih kecil, dan penggunaan karbohidrat sebagai prekursor memiliki kelebihan karena bahan ini mudah didapat dan tidak beracun. Metode ini menawarkan cara yang lebih ramah lingkungan dan efisien dibandingkan metode top-down tradisional, yang sering kali melibatkan kondisi ekstrem. Hasilnya adalah CQD yang lebih konsisten dan berkualitas tinggi, dengan keseragaman ukuran, kestabilan, dan kemampuan penyerapan cahaya yang baik [16].

2. Bottom-Up Approach

Pendekatan bottom-up melibatkan pembentukan CQDs dari molekul atau atom melalui proses kimiawi. Beberapa metode yang umum digunakan dalam pendekatan ini termasuk sintesis hidrotermal atau solvothermal, pirolisis, sintesis microwave, dan reaksi kimia basah. Sebagai contoh, dalam sintesis

hidrotermal, prekursor karbon dipanaskan dalam larutan air atau pelarut organik pada tekanan tinggi untuk membentuk CQD. Pirolisis, di sisi lain, melibatkan pemanasan prekursor organik hingga suhu tinggi dalam kondisi tanpa oksigen, menyebabkan terurai dan membentuk CQDs. Pendekatan bottom-up memungkinkan pengendalian yang lebih baik terhadap ukuran dan bentuk CQDs, serta menghasilkan produk dengan kemurnian yang lebih tinggi [17].

a. Microwave Methods

Gelombang mikro, dengan panjang gelombang antara satu milimeter hingga satu meter, memiliki kemampuan untuk mengirimkan sejumlah besar energi ke substrat, yang memungkinkan pemecahan material secara kimiawi. Teknik microwave banyak digunakan dalam pembuatan nanomaterial, karena dapat mengurangi waktu reaksi secara signifikan, memberikan pemanasan yang lebih homogen, dan menghasilkan produk yang lebih konsisten. Pendekatan ini memungkinkan peneliti mengontrol kondisi reaksi seperti suhu dan tekanan, yang mempengaruhi sifat sensitivitas dan kinerja sensitizer. Microwave juga membantu

menghasilkan produk yang lebih homogen dan berulang-ulang, yang penting dalam aplikasi fotokimia dan fotovoltaik [18].

b. Ultrasonic Methods

Metode ultrasonik bekerja dengan menghasilkan gelombang tekanan rendah dan tinggi dalam cairan, menyebabkan pembentukan dan runtuhnya gelembung vakum kecil, yang menghasilkan jet cairan berkecepatan tinggi, deglomerasi, dan gaya geser hidrodinamik yang kuat. Energi dari gelombang ultrasonik ini dapat memotong material karbon besar menjadi CQD berukuran nanometer. Misalnya, sintesis CQDs larut air dari karbon teraktivasi dapat dilakukan dengan perlakuan ultrasonik yang dibantu hidrogen peroksida (H_2O_2) dalam satu langkah, menghasilkan larutan CQD yang sangat stabil tanpa presipitasi nanopartikel selama enam bulan. Selain itu, penelitian oleh Park et al. melaporkan metode "hijau" untuk sintesis CQDs dalam skala besar menggunakan limbah makanan sebagai sumber karbon melalui perlakuan ultrasound pada suhu ruang. CQD yang diperoleh memiliki bentuk bola seragam dengan ukuran rata-rata 4,6 nm [19].

Tabel 1. Keuntungan dan kerugian utama dari berbagai metode persiapan CQD sebagai bahan penyusun sensitizer

Metode Persiapan	Keuntungan	Kerugian	Ref
Sintesis Elektrokimia	Mudah, Murah, tanpa bahan kimia beracun	Proses pemurnian yang lama	[20]
Ablasi Kimia	Partikel kecil, prekursor yang dapat diakses	Kondisi keras, proses drastis	[21]
Microwave	Mudah, berbiaya rendah, terukur	Kontrol yang buruk	[22]

CQD sebagai Sensitizer

Carbon Quantum Dots (CQD) memiliki sifat elektrokimia yang luar biasa, berfungsi sebagai donor dan akseptor elektron yang memungkinkan mereka untuk memancarkan cahaya secara kimiawi dan elektrokimiawi. Sifat-sifat ini memberikan CQD potensi luas dalam berbagai aplikasi, termasuk optronik, katalisis, dan sensor [23]. Kemampuan

CQD dalam memanen cahaya yang sangat baik dan sifat konduksi listriknya menjadikannya bahan yang ideal untuk digunakan dalam sel surya, khususnya dalam DSSC (Dye-Sensitized Solar Cells). Ketika CQD terfotoeksitasi, mereka dapat menginjeksikan elektron ke TiO_2 , yang kemudian diregenerasi dengan menerima elektron dari elektrolit I_3^-/I^- (Yan, 2010). CQD yang disintesis secara hidrotermal

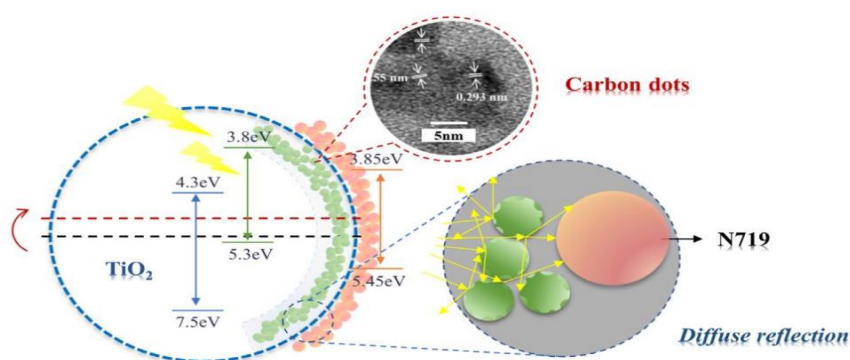
memungkinkan penyesuaian level elektronik dan sifat optik yang diperlukan untuk meningkatkan efisiensi konversi daya. Sebagai co-sensitizer, CQD membantu meningkatkan efisiensi sel surya dengan memastikan injeksi elektron yang termodinamika antara pewarna dan semikonduktor seperti TiO_2 , di mana tingkat energi LUMO pewarna harus lebih tinggi daripada pita konduksi TiO_2 [24].

Selain perannya sebagai sensitizer, CQD juga berfungsi sebagai donor dan mediator dalam sistem DSSC hibrid, meningkatkan efisiensi pemanenan cahaya serta memfasilitasi pemisahan dan transfer muatan [25]. Dalam perangkat DSSC, penggunaan CQD membantu memisahkan muatan dan meningkatkan konsentrasi pembawa muatan yang tersedia untuk fotoreaksi atau sel surya [26]. Namun, dalam sintesis CQD, tantangan utama meliputi masalah aglomerasi, keseragaman ukuran, dan pengendalian sifat permukaan. Aglomerasi dapat mengurangi luas permukaan aktif CQD, yang berdampak pada kemampuannya berinteraksi dengan molekul target. Teknik seperti sintesis elektrokimia dan larutan terbatas dapat menghindari aglomerasi dan

meningkatkan kinerja CQD sebagai sensitizer. Sebagai fotosensitizer, CQD berperan sebagai reservoir elektron di bawah iradiasi cahaya tampak, dan telah terbukti meningkatkan respons foto TiO_2 nanorod dalam sistem fotoelektrokimia [27], [28].

Modifikasi CQD Fotoanoda

Carbon Quantum Dots (CQD) yang diekstraksi dari sumber alami semakin populer berkat sifatnya yang ramah lingkungan dan potensi aplikasinya dalam berbagai teknologi, termasuk fotovoltaik dan fotokatalisis. Dalam konteks sel surya DSSC (Dye-Sensitized Solar Cells), CQD dapat dimodifikasi untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja fotoanoda, seperti yang terlihat pada pengaruh modifikasi CQD terhadap TiO_2 sebagai fotoanoda. Saat proporsi CQD ditingkatkan dalam fotoanoda, terjadi peningkatan signifikan dalam laju transfer elektron dan rapat arus hubung singkat, yang dapat dijelaskan oleh peningkatan injeksi fotoelektron dan pengisian lokasi perangkap dalam struktur CQD. Hal ini mengarah pada pemisahan pembawa muatan yang lebih baik dan meningkatkan efisiensi keseluruhan sel surya [29].



Gambar 4. Representasi skema fotoanoda titik karbon yang dimodifikasi [20]

Lapisan CQD pada permukaan fotoanoda juga bertindak sebagai lapisan penghambur cahaya yang dapat meningkatkan pemanfaatan cahaya yang masuk. Pengenalan CQD pada fotoanoda semi-konduktor seperti TiO_2 dan ZnO

dapat meningkatkan potensi pita datar dan mengurangi celah pita optik, yang mendukung transfer elektron dari donor (CQD dan amina dalam CQD) ke pita konduksi semikonduktor. Dalam penelitian yang melibatkan CQD yang didoping

nitrogen (N-CD), dopan ini membantu menekan rekombinasi lubang-elektron dan meningkatkan efisiensi fotovoltaiik, dengan hasil efisiensi tertinggi sel surya yang didoping mencapai tujuh kali lipat lebih tinggi dibandingkan dengan sel surya yang tidak didoping dalam kondisi yang sama [30], [31]. Modifikasi dengan CQD ini juga memperpanjang umur elektron, yang berperan penting dalam mengurangi rekombinasi pasangan elektron-lubang dan meningkatkan kinerja sel surya.

Selain itu, doping heteroatom seperti nitrogen (N), belerang (S), boron (B), dan fluorin (F) banyak digunakan untuk menyetel sifat CQD sesuai aplikasi yang diinginkan. Nitrogen adalah dopan yang paling banyak digunakan, karena dapat meningkatkan sensitivitas optik dan

fotovoltaiik CQD. Sebagai contoh, Peng et al. mensintesis berbagai jenis CQD dengan doping nitrogen dari glukosa atau asam sitrat sebagai prekursor dan dopamin atau 4,7,10-trioxa-1,13-tridecanediamine sebagai doping nitrogen, yang memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat CQD, termasuk dalam aplikasi fotovoltaiik dan fotokimia [32], [33].

Dalam aplikasi fotokimia dan fotovoltaiik, CQD yang dimodifikasi memiliki sifat unik yang memungkinkan mereka berfungsi dengan baik sebagai sensitizer dalam perangkat solar dan katalisator dalam reaksi fotokatalitik. Beberapa karakteristik penting dari CQD yang disintesis melalui berbagai metode dapat dilihat pada Tabel 2 berikut:

Tabel 2. Karakteristik Carbon Quantum Dots (CQDs) sebagai Material Sensitizer

Karakteristik	Keterangan	Ref
Ukuran Partikel	CQD berukuran 1-10 nm, dan ukuran partikelnya yang seragam menjamin distribusi energi yang konsisten dan penyerapan cahaya yang baik.	[34]
Sifat Optik	Dengan fluoresensi yang kuat dan emisi yang dapat disesuaikan berdasarkan ukuran dan struktur permukaannya	[34]
Biokompatibilitas	Menggunakan bahan baku yang tidak beracun dan proses yang ramah lingkungan	[22]
Fungsionalisasi Permukaan	Meningkatkan kelarutan dalam berbagai media	[8]

Carbon Quantum Dots (CQDs) memiliki potensi besar sebagai sensitizer dalam aplikasi fotovoltaiik dan fotokimia karena ukuran partikel yang kecil dan seragam, yang memungkinkan mereka memiliki luas permukaan besar relatif terhadap volume. Hal ini meningkatkan interaksi antara CQDs dengan cahaya serta bahan pengangkut/akseptor elektron, seperti oksida semikonduktor, yang esensial untuk efisiensi perangkat seperti sel surya DSSC. CQDs juga memiliki sifat fluoresensi yang kuat, yang memungkinkan mereka menyerap cahaya dan mengirimkan energi ke bahan lain, serta memfasilitasi transfer elektron, meningkatkan kinerja perangkat fotovoltaiik

dan fotokatalitik [34]. Selain itu, permukaan CQDs dapat dimodifikasi dengan gugus fungsional untuk meningkatkan kompatibilitasnya dengan bahan lain, meningkatkan kelarutan, dan menyesuaikan sifat optik. Metode sintesis seperti hidrotermal terbukti efektif dalam menghasilkan CQDs berkualitas tinggi tanpa bahan kimia berbahaya, mendukung produksi perangkat yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Dengan karakteristik ini, CQDs menjadi pilihan ideal sebagai sensitizer untuk meningkatkan efisiensi perangkat fotovoltaiik yang berkelanjutan [8].

KESIMPULAN

Carbon Quantum Dots (CQDs) menunjukkan potensi besar sebagai sensitizer dalam aplikasi sel surya, dengan berbagai keuntungan yang diperoleh dari karakteristik fisik dan kimianya. Ukuran partikel CQD yang kecil dan seragam (1-10 nm) memastikan penyerapan cahaya yang efisien dan distribusi energi yang merata. Sifat optik CQD, termasuk fluoresensi yang kuat dan kemampuan emisi yang dapat disesuaikan, menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi fotovoltaik dan sensorik. Metode sintesis seperti hidrotermal, yang menggunakan bahan baku tidak beracun dan proses ramah lingkungan, memungkinkan produksi CQD berkualitas tinggi tanpa memerlukan bahan kimia mahal dan berbahaya. Dalam konteks sel surya, khususnya sel surya sensitif warna (DSSC), CQDs terbukti meningkatkan efisiensi penyerapan cahaya dan memfasilitasi pemisahan serta transfer muatan dengan lebih efektif. Modifikasi permukaan CQD dengan berbagai gugus fungsional memperbaiki kompatibilitas dengan bahan lain, meningkatkan sifat optik dan memungkinkan integrasi yang lebih baik dalam perangkat fotovoltaik. Dengan demikian, CQDs menawarkan solusi yang efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan untuk meningkatkan kinerja perangkat fotovoltaik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Darwin, A. Panjaitan, and S. Suwarno, "Analisa pengaruh Intesitas Sinar Matahari Terhadap Daya Keluaran Pada Sel Surya Jenis Monokristal," *J. MESIL (Mesin Elektro Sipil)*, vol. 1, no. 2, pp. 99–106, Dec. 2020.
- [2] L. Parinduri, Y. Yusmartato, and T. Parinduri, "Kontribusi Konversi Mobil Konvensional ke Mobil Listrik Dalam Penanggulangan Pemanasan Global," *J. Electr. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 116–120, 2018.
- [3] J. D. Humaira, "Komparasi Unjuk Kerja Hubungan Seri, Paralel, dan Seri Paralel pada Panel Surya," *MSI Trans. Educ.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–12, 2023.
- [4] M. H. Pasaribu and T. Manurung, "Review Potensi Penelitian Sel Fotovoltaik Organik Menggunakan Teknik Bibliometrik," *Bohr J. Cendekia Kim.*, vol. 1, no. 2, pp. 72–80, 2023.
- [5] P. Harahap, I. Bustami, and B. Oktrialdi, "Pengaruh Intensitas Cahaya Matahari Dan Suhu Terhadap Daya Yang Dikeluarkan Oleh Modul Sel Surya Monocrystalline Dan Polycrystalline," *J. MESIL (Mesin Elektro Sipil)*, vol. 3, no. 2, pp. 1–5, 2022.
- [6] H. Asy'ari and A. Jatmiko, "Intensitas Cahaya Matahari Terhadap Daya Keluaran Panel Sel Surya," *Simp. Nas. RAPI XI FT UMS–2012*, pp. 1412–9612, 2012.
- [7] M. J. Molaei, "The optical properties and solar energy conversion applications of carbon quantum dots: A review," *Sol. Energy*, vol. 196, pp. 549–566, Jan. 2020.
- [8] M. Farshbaf, S. Davaran, F. Rahimi, N. Annabi, R. Salehi, and A. Akbarzadeh, "Carbon quantum dots: recent progresses on synthesis, surface modification and applications," *Artif. Cells, Nanomedicine, Biotechnol.*, vol. 46, no. 7, pp. 1331–1348, Oct. 2018.
- [9] V. Magesh, A. K. Sundramoorthy, and D. Ganapathy, "Recent Advances on Synthesis and Potential Applications of Carbon Quantum Dots," *Front. Mater.*, vol. 9, Jul. 2022.
- [10] N. Gao *et al.*, "Application of carbon dots in dye-sensitized solar cells: A review," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 137, no. 10, Mar. 2020.
- [11] A. S. Rasal *et al.*, "Carbon Quantum Dots for Energy Applications: A

- Review,” *ACS Appl. Nano Mater.*, vol. 4, no. 7, pp. 6515–6541, Jul. 2021.
- [12] M. Kouhnavard *et al.*, “A review of semiconductor materials as sensitizers for quantum dot-sensitized solar cells,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 37, pp. 397–407, Sep. 2014.
- [13] R. Wang, K.-Q. Lu, Z.-R. Tang, and Y.-J. Xu, “Recent progress in carbon quantum dots: synthesis, properties and applications in photocatalysis,” *J. Mater. Chem. A*, vol. 5, no. 8, pp. 3717–3734, 2017.
- [14] K. A. S. Fernando *et al.*, “Carbon Quantum Dots and Applications in Photocatalytic Energy Conversion,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 7, no. 16, pp. 8363–8376, Apr. 2015.
- [15] H. P. S. Castro *et al.*, “Synthesis and Characterisation of Fluorescent Carbon Nanodots Produced in Ionic Liquids by Laser Ablation,” *Chem. – A Eur. J.*, vol. 22, no. 1, pp. 138–143, Jan. 2016.
- [16] X. Yang *et al.*, “Photoluminescent carbon dots synthesized by microwave treatment for selective image of cancer cells,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 456, pp. 1–6, Oct. 2015.
- [17] D. Ozyurt, M. Al Kobaisi, R. K. Hocking, and B. Fox, “Properties, synthesis, and applications of carbon dots: A review,” *Carbon Trends*, vol. 12, p. 100276, Sep. 2023.
- [18] A. S. Sadhu, Y.-M. Huang, L.-Y. Chen, H.-C. Kuo, and C.-C. Lin, “Recent Advances in Colloidal Quantum Dots or Perovskite Quantum Dots as a Luminescent Downshifting Layer Embedded on Solar Cells,” *Nanomaterials*, vol. 12, no. 6, p. 985, Mar. 2022.
- [19] W. Chen, G. Lv, W. Hu, D. Li, S. Chen, and Z. Dai, “Synthesis and applications of graphene quantum dots: a review,” *Nanotechnol. Rev.*, vol. 7, no. 2, pp. 157–185, 2018.
- [20] L. Bao, C. Liu, Z. Zhang, and D. Pang, “Photoluminescence-Tunable Carbon Nanodots: Surface-State Energy-Gap Tuning,” *Adv. Mater.*, vol. 27, no. 10, pp. 1663–1667, Mar. 2015.
- [21] L. Shen, L. Zhang, M. Chen, X. Chen, and J. Wang, “The production of pH-sensitive photoluminescent carbon nanoparticles by the carbonization of polyethylenimine and their use for bioimaging,” *Carbon N. Y.*, vol. 55, pp. 343–349, Apr. 2013.
- [22] Y. Liu *et al.*, “One-step microwave-assisted polyol synthesis of green luminescent carbon dots as optical nanoprobe,” *Carbon N. Y.*, vol. 68, pp. 258–264, Mar. 2014.
- [23] M. E. Khan, A. Mohammad, and T. Yoon, “State-of-the-art developments in carbon quantum dots (CQDs): Photo-catalysis, bio-imaging, and bio-sensing applications,” *Chemosphere*, vol. 302, p. 134815, Sep. 2022.
- [24] K. Sharma, V. Sharma, and S. S. Sharma, “Dye-Sensitized Solar Cells: Fundamentals and Current Status,” *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 13, no. 1, p. 381, Dec. 2018.
- [25] E. Imelda, H. Aziz, and A. Santoni, “COMPUTATIONAL DESIGN OF NOVEL COUMARIN SENSITIZERS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF SOLAR CELLS,” *Moroccan J. Chem.*, vol. 10, no. 1, pp. 180–190, 2022.
- [26] T. F. Yadeta and T. Imae, “Effect of carbon dot on photovoltaic performance of n-TiO₂/p-NiO and n-TiO₂/p-CuO heterojunctions in Dye-Sensitized solar cells,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 637, p. 157880, Nov. 2023.
- [27] H. Yu *et al.*, “Carbon quantum dots/TiO₂ composites for efficient photocatalytic hydrogen evolution,” *J. Mater. Chem. A*, vol. 2, no. 10, p. 3344, 2014.

- [28] M. Sun, X. Ma, X. Chen, Y. Sun, X. Cui, and Y. Lin, "A nanocomposite of carbon quantum dots and TiO₂ nanotube arrays: enhancing photoelectrochemical and photocatalytic properties," *RSC Adv.*, vol. 4, no. 3, pp. 1120–1127, 2014.
- [29] B. Rezaei, N. Irannejad, A. A. Ensafi, and N. Kazemifard, "The impressive effect of eco-friendly carbon dots on improving the performance of dye-sensitized solar cells," *Sol. Energy*, vol. 182, pp. 412–419, Apr. 2019.
- [30] H. Wang *et al.*, "Nitrogen-Doped Carbon Dots for 'green' Quantum Dot Solar Cells," *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 11, no. 1, p. 27, Dec. 2016.
- [31] P. N. Kumar, A. Das, and M. Deepa, "Nitrogen doping of TiO₂ and annealing treatment of photoanode for enhanced solar cell performance," *J. Alloys Compd.*, vol. 832, p. 154880, Aug. 2020.
- [32] H. Peng *et al.*, "Tuning the properties of luminescent nitrogen-doped carbon dots by reaction precursors," *Carbon N. Y.*, vol. 100, pp. 386–394, Apr. 2016.
- [33] R. Lestari, D. I. Lufita, L. Yuliatun, and L. Destiarti, *Nanomaterial Dan Analisis Risiko Terhadap Lingkungan*. Deepublish, 2023.
- [34] S. Qu *et al.*, "Toward Efficient Orange Emissive Carbon Nanodots through Conjugated sp²-Domain Controlling and Surface Charges Engineering," *Adv. Mater.*, vol. 28, no. 18, pp. 3516–3521, May 2016.