JOICHE
Journal of Industrial Process and Chemical Engineering
Jurnal homepage : ejurnal.itats.ac.id/JOICHE

Karbon Dots sebagai Sistem Penghantaran Obat Cerdas Berbasis Nanoteknologi

Adi Permadi[1]
[1]*Jurusan Teknik Kimia, Universitas Ahmad Dahlan, Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia*

INFORMASI ARTIKEL

Halaman:
1 – 10

Tanggal penyerahan:
13 Mei 2025

Tanggal diterima:
25 Desember 2025

Tanggal terbit:
25 Desember 2025

EMAIL

[1]adi.permadi@che.uad.ac.id
1* **corresponding author**

ABSTRACT

Carbon dots (CDs) are carbon-based nanomaterials smaller than 10 nm that exhibit strong fluorescence, excellent chemical stability, and environmental friendliness, making them promising candidates for diverse applications. This paper discusses the synthesis methods of carbon dots, particularly bottom-up techniques such as pyrolysis and hydrothermal synthesis, using eco-friendly precursors like agricultural and food waste. CDs are characterized by techniques including FTIR, UV-Vis, and TEM to reveal their structural and optical properties. CDs have various applications, including heavy metal sensing, bioimaging, and antimicrobial agents. The key advantages of CDs include low production costs, abundant raw materials, and high biocompatibility. This study highlights the great potential of CDs in supporting environmentally friendly technologies and encourages further research on their functionalization and future applications.

Keywords: *Bioimaging, Carbon dots, Drug delivery, Nanotechnology, Fotoluminesensi*

ABSTRAK

Karbon dots (CDs) merupakan material nano karbon dengan ukuran kurang dari 10 nm yang memiliki sifat fluoresen tinggi, kestabilan kimia baik, dan ramah lingkungan, sehingga menjadikannya kandidat potensial untuk berbagai aplikasi. Makalah ini membahas metode sintesis karbon dots, terutama metode bottom-up seperti pirolisis dan metode hidrotermal, serta bahan baku ramah lingkungan seperti limbah pertanian dan makanan. Karakterisasi CDs dilakukan menggunakan teknik seperti FTIR, UV-Vis, dan TEM untuk mengetahui struktur dan sifat optiknya. CDs memiliki berbagai aplikasi, antara lain sebagai sensor logam berat, bioimaging, dan agen antimikroba. Keunggulan utama CDs meliputi biaya produksi rendah, sumber bahan melimpah, dan kompatibilitas biologis yang tinggi. Studi ini menyoroti potensi besar CDs dalam mendukung teknologi ramah lingkungan serta mendorong riset lanjutan untuk pengembangan fungsionalisasi dan aplikasinya di masa depan.

Kata kunci: *Bioimaging, Carbon dots, Drug delivery, Nanotechnology, Fotoluminesensi*

PENDAHULUAN

Pengembangan sistem penghantaran obat yang efisien dan bertarget menjadi aspek krusial dalam bidang farmasi dan biomedis modern. Terapi konvensional sering kali menghadapi berbagai kendala, seperti rendahnya bioavailabilitas obat, toksisitas sistemik yang tinggi, serta kurangnya spesifisitas terhadap target sel atau jaringan [1]. Hal ini menyebabkan efektivitas pengobatan menjadi terbatas dan risiko efek samping meningkat. Untuk itu, dibutuhkan pendekatan baru yang mampu meningkatkan efisiensi penghantaran dan mengurangi efek samping. Nanoteknologi hadir sebagai solusi inovatif yang menawarkan keunggulan dalam skala molekuler, termasuk kemampuan pengangkutan obat secara spesifik dan terkontrol. Dengan memanfaatkan nanomaterial seperti Carbon Dots, obat dapat diantarkan

langsung ke target spesifik melalui mekanisme yang responsif terhadap stimulus tertentu. Pendekatan ini memberikan harapan baru dalam terapi yang lebih aman, efektif, dan presisi [2].

Karbon Dots adalah nanopartikel karbon dengan ukuran kurang dari 10 nm yang memiliki sifat fluoresen [3]. Sejarah penemuan dan perkembangan awal Carbon Dots (CDs) secara umum dimulai pada awal 2000-an ketika para peneliti menemukan nanopartikel karbon dengan sifat fluoresensi unik. CDs pertama kali diisolasi secara tidak sengaja saat memproses karbon nanotube atau fullerenes. Sejak itu, penelitian berkembang pesat karena CDs memiliki keunggulan seperti biokompatibilitas, stabilitas kimia, dan potensi aplikasi luas di bidang bioimaging, sensor, dan katalisis [4]. Metode sintesis awal CDs meliputi pembakaran, pemecahan laser, dan metode kimia basah. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah arc discharge, di mana karbon dihasilkan melalui loncatan listrik antara elektroda karbon dalam media cair. Penambahan bahan seperti amonia dalam media cair dapat memodifikasi permukaan CDs dengan menambahkan gugus fungsi amino (-NH2), yang meningkatkan biokompatibilitas dan sifat hidrofilik material tersebut. Struktur CDs yang dihasilkan biasanya berbentuk sferikal dan teratur, dengan karakteristik kimia yang dapat dianalisis menggunakan teknik seperti FTIR, SEM, TEM, dan EDX untuk memastikan keberadaan gugus fungsi dan komposisi unsur [5], [6].

Keunggulan Carbon Dots (CDs) dibandingkan dengan nanopartikel lain meliputi biokompatibilitas yang tinggi, kelarutan dalam air, kemudahan modifikasi secara kimia, serta sifat tidak beracun. Hal ini menjadikan CDs sangat potensial untuk berbagai aplikasi, terutama dalam bidang bioteknologi dan medis [7]. Metode sintesis Carbon Dots (CDs) terbagi menjadi pendekatan top-down dan bottom-up, di mana bottom-up lebih umum digunakan karena menawarkan kontrol morfologi dan ukuran partikel. Metode bottom-up seperti hidrotermal, solvotermal, pirolisis, dan microwave-assisted synthesis memungkinkan sintesis yang lebih efisien dan ramah lingkungan [8]. Kondisi sintesis seperti suhu, waktu, dan doping sangat memengaruhi ukuran, gugus fungsi permukaan, serta sifat fotoluminesensi Carbon Dots (CDs). Pengaturan parameter ini memungkinkan penyesuaian celah energi dan efisiensi emisi untuk aplikasi spesifik di bidang biomedis dan optoelektronik [9].

Berbagai teknik karakterisasi digunakan secara komplementer untuk menganalisis nanostruktur TiO_2, termasuk TEM untuk morfologi dan ukuran partikel, serta FTIR untuk identifikasi gugus fungsi permukaan. UV-Vis dan PL digunakan untuk mengevaluasi sifat optik dan emisi, sementara XPS memberikan informasi detail tentang komposisi dan keadaan oksidasi permukaan. DLS juga penting untuk menentukan distribusi ukuran partikel dalam suspensi, terutama dalam konteks aplikasi biomedis dan sensor [10]. Memahami karakteristik Carbon Dots (CDs) sangat penting untuk aplikasi biomedis karena sifat fisikokimia dan biokompatibilitasnya menentukan efektivitas dan keamanan dalam penggunaan seperti pengiriman obat, pencitraan biomedis, dan terapi. Karakteristik seperti ukuran, permukaan, dan kemampuan fluoresensi mempengaruhi interaksi CDs dengan sel dan jaringan, serta kemampuan mereka dalam menargetkan dan melepaskan obat secara tepat. Oleh karena itu, pemahaman mendalam tentang karakteristik ini sangat krusial untuk mengoptimalkan fungsi CDs dalam aplikasi biomedis [11].

Carbon Dots (CDs) menawarkan mekanisme penghantaran obat yang beragam, seperti konjugasi langsung dengan molekul obat, enkapsulasi dalam matriks CDs, atau sebagai carrier stimulus-responsif yang melepaskan obat sebagai respons terhadap perubahan lingkungan seperti pH atau cahaya [12]. Keunggulan utama CDs dalam sistem ini meliputi kemampuan targeting ke sel atau jaringan tertentu, sensitivitas terhadap kondisi mikro lingkungan (misalnya pH tumor), serta sifat fluoresensi intrinsik yang memungkinkan pelacakan distribusi obat secara in vivo tanpa penanda eksternal tambahan [13]. Aplikasi spesifik dari sistem penghantaran berbasis CDs telah berhasil diterapkan dalam terapi anti-kanker, antibakteri, dan terapi gen, menunjukkan efektivitas tinggi dalam meningkatkan bioavailabilitas, mengurangi efek samping, dan mencapai pelepasan obat yang lebih terkontrol dan presisi [14].

Pemilihan topik review ini didasarkan pada kebutuhan akan ulasan komprehensif mengenai perkembangan terkini dalam sintesis, karakterisasi, dan pemanfaatan Carbon Dots (CDs) dalam sistem penghantaran obat. CDs memiliki potensi besar sebagai platform multifungsi yang terus berkembang di bidang medis dan farmasi karena sifat uniknya seperti biokompatibilitas, kemampuan fotoluminesensi, dan kemampuan untuk dimodifikasi secara permukaan. Review ini diharapkan dapat memberikan wawasan ilmiah yang mendalam serta menjadi referensi bagi penelitian lanjutan dalam pengembangan sistem penghantaran obat berbasis nanomaterial.

METODE

Kajian Literatur

Metode kajian literatur dilakukan dengan menelusuri berbagai jurnal ilmiah terkini melalui basis data terpercaya seperti ScienceDirect, PubMed, dan SpringerLink. Penelusuran difokuskan pada publikasi 5–10 tahun terakhir yang membahas penggunaan carbon dots (CDs) dalam sistem penghantaran obat, termasuk aspek sintesis, karakterisasi, mekanisme kerja, serta tantangan dan peluang aplikatifnya. Artikel yang dipilih diseleksi berdasarkan relevansi topik, kejelasan metodologi, serta kontribusinya terhadap perkembangan ilmu di bidang nanoteknologi biomedis.

Penelusuran Jurnal

Berdasarkan penelusuran jurnal melalui situs seperti Google Scholar dan beberapa database jurnal seperti Portal Garuda, PubMed, dan ScienceDirect, peneliti menemukan 70 jurnal yang relevan dengan kata kunci yang digunakan. Selanjutnya dilakukan proses skrining terhadap 60 jurnal terpilih untuk menilai kesesuaian topik dan kualitas informasi. Dari hasil tersebut, sebanyak 50 jurnal full text yang memenuhi kriteria inklusi dan eksklusi digunakan sebagai dasar dalam kajian literatur ini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sintesis Karbon Dots (CDs)

Metode top-down adalah pendekatan pembuatan nanomaterial dengan memecah material berukuran besar menjadi partikel nano melalui proses fisik atau kimia. Contoh tekniknya meliputi ablasi laser, elektrooksidasi, dan arc-discharge yang memungkinkan pembentukan nanomaterial dengan kontrol terhadap ukuran dan morfologinya [15]. Menurut Yiu., et. al. (2024) mengemukakan bahwa metode top-down memiliki kelebihan berupa kemampuan menghasilkan partikel dengan ukuran dan bentuk yang relatif seragam serta cocok untuk produksi skala besar karena kemudahan operasionalnya. Namun, metode ini juga memiliki kekurangan seperti potensi kerusakan struktur material, konsumsi energi tinggi, kontaminasi dari alat, dan efisiensi rendah dalam menghasilkan partikel berukuran sangat kecil dengan distribusi sempit [16].

Metode bottom-up membentuk nanomaterial dari unit dasar seperti atom atau molekul melalui teknik seperti hidrotermal, solvotermal, microwave-assisted, dan pirolisis. Pendekatan ini memungkinkan kontrol tinggi terhadap ukuran, bentuk, dan sifat material yang dihasilkan [17]. Pemanfaatan prekursor alami seperti biomassa dan senyawa karbon organik dalam pengembangan nanomaterial dan sistem penghantaran obat kini banyak diteliti. Pada penelitian oleh Patil., et. al. (2023) menggunakan limbah pisang untuk sintesis nanopartikel perak dengan aktivitas fotokatalitik, antimikroba, dan sitotoksik, sementara senyawa karbon dari biomassa dimanfaatkan dalam pembuatan nanovesikel polimerik untuk penghantaran obat kanker secara target [18]. Penelitian oleh Paul et al. (2023) menunjukkan bahwa parameter sintesis seperti suhu, waktu, pH, dan jenis pelarut sangat mempengaruhi ukuran, stabilitas, dan sifat fluoresensi Carbon Dots (CDs). Faktor-faktor ini secara kolektif menentukan kualitas CDs untuk aplikasi biomedis dan sistem penghantaran obat [19].

Fungsionalisasi doping dengan elemen seperti nitrogen, sulfur, dan fosfor digunakan untuk memodifikasi sifat material guna meningkatkan efektivitas sistem penghantaran obat. Penelitian oleh Revantalab., et. al. (2018) mengemukakan bahwa doping ini memengaruhi polaritas, stabilitas, dan interaksi permukaan, namun harus dioptimalkan agar sesuai dengan target biologis dan menghindari pengenalan oleh sistem fagosit mononuklear (MPS) [20]. Konjugasi permukaan nanopartikel dengan senyawa bioaktif atau polimer meningkatkan stabilitas, spesifisitas target, dan efisiensi penyerapan oleh sel. Contohnya, modifikasi dengan mannose, PEI, atau biotin terbukti meningkatkan efektivitas penghantaran dan aktivitas terapeutik pada sistem nanoplatform [21].

Karakterisasi Karbon Dots (CDs)

Transmission Electron Microscopy (TEM), *Scanning Electron Microscopy* (SEM), dan *Dynamic Light Scattering* (DLS) adalah teknik utama dalam karakterisasi nanostruktur. TEM menggunakan berkas elektron tembus untuk menghasilkan citra resolusi tinggi dari struktur internal

dan morfologi partikel nano, sementara SEM memindai permukaan sampel dengan elektron untuk menampilkan topografi dan morfologi permukaan secara detail. DLS mengukur penyebaran cahaya dari partikel dalam suspensi untuk menentukan ukuran hidrodinamik dan stabilitas partikel. Ketiga teknik ini sangat penting dalam penelitian dan pengembangan nanomedisin untuk mengevaluasi ukuran, bentuk, morfologi, dan kestabilan nanopartikel [22], [23], [24]. FTIR mengidentifikasi gugus fungsi dalam sampel berdasarkan vibrasi ikatan kimia akibat serapan radiasi inframerah. XPS menganalisis elemen dan keadaan kimia permukaan material dengan mendeteksi energi elektron yang dipancarkan akibat paparan sinar-X [25]. Raman spektroskopi mendeteksi vibrasi molekul dan perubahan struktur kristal, termasuk defek dan ketidakteraturan. XRD menganalisis struktur kristal secara kuantitatif, termasuk parameter kisi dan cacat melalui pola difraksi [26].

Sifat optik dan fotoluminesensi dapat dianalisis menggunakan teknik spektroskopi UV-Vis dan spektroskopi fluoresensi. Spektroskopi UV-Vis digunakan untuk mengamati interaksi cahaya dengan materi, termasuk perubahan ukuran nanopartikel yang dapat diatur dengan rasio polimer dan iradiasi cahaya, yang menunjukkan sifat responsif cahaya dari material tersebut. Pada Penelitian oleh Khizar., et. al. (2023) mengemukakan bahwa spektroskopi fluoresensi digunakan untuk memeriksa kemampuan material dalam memuat obat dan profil pelepasan obat secara in vitro di berbagai lingkungan dengan mengontrol cahaya atau nilai pH. Interaksi dinamis antara domain azobenzena (AZO) dan β-cyclodextrin (β-CD) juga dapat diamati melalui teknik ini untuk mengkonfirmasi reaktivitas cahaya nanopartikel, termasuk kecepatan respons, kontrol, dan ketahanan terhadap kelelahan [27], [28]. Pada penelitian oleh Lee., et. al. (2017) mengemukakan bahwa efek kuantum size dan passivasi permukaan memengaruhi emisi nanomaterial dengan mengubah tingkat energi dan mengurangi rekombinasi non-radiatif, sehingga meningkatkan efisiensi fotoluminesensi. Dalam sistem liposom dan AuNPs, passivasi permukaan membantu mengontrol pelepasan obat secara fototermal atau fotokimia melalui peningkatan stabilitas dan respons emisi [29].

Aplikasi Karbon Dots dalam Penghantaran Obat

Interaksi antara Cyclodextrins (CDs) dan obat terutama terjadi melalui gaya non-kovalen seperti interaksi hidrofobik, ikatan hidrogen, dan gaya van der Waals, yang memungkinkan adsorpsi fisik dan pembentukan kompleks inklusi dalam rongga hidrofobik CD. Menurut Trotta., et. al. (2022) menyatakan bahwa mekanisme ini memungkinkan molekul obat terperangkap secara selektif tanpa membentuk ikatan kimia kuat, seperti pada interaksi kurkumin dengan β- atau γ-CD yang meningkatkan aktivitas antioksidan. Meskipun ikatan kovalen dapat terjadi melalui modifikasi kimia tertentu, mekanisme ini bukanlah cara utama dalam enkapsulasi obat oleh CDs. Enkapsulasi berbasis inklusi secara signifikan meningkatkan kelarutan, stabilitas, dan bioavailabilitas obat, seperti ditunjukkan oleh peningkatan kelarutan air kurkumin hingga 7000 kali lipat dalam sistem supramolekuler berbasis CD [30].

Dalam penelitian Bera et al. (2025), respons N-MQDs terhadap stimulus cahaya ditunjukkan secara jelas melalui perubahan intensitas fluoresensi saat terpapar cahaya UV dan daylight, di mana fluoresensi N-MQDs dapat dipadamkan oleh ion As^{3+} dan dipulihkan kembali dengan penambahan MBTZ, sebagaimana terlihat pada halaman 4–6. Mekanisme pemadaman ini melibatkan interaksi antara gugus amina dan oksigen pada permukaan N-MQDs dengan As^{3+}, membentuk kompleks non-fluoresen. Sementara itu, respons terhadap stimulus lain seperti pH, suhu, dan enzim tidak dijelaskan secara eksplisit, namun disebutkan bahwa pemadaman fluoresensi oleh As^{3+} bersifat statis dan tidak terpengaruh signifikan oleh perubahan suhu, menunjukkan bahwa efek ini tidak bergantung pada kondisi termal [31], [32], [33].

Pada penelitian oleh You et. al. (2024) modifikasi CQDs dengan ligan targeting seperti asam folat (FA), antibodi, atau peptida dapat meningkatkan spesifisitas dan efektivitas terapeutik. Contohnya, N-doped CQDs yang dimediasi oleh asam folat (NDCQDs-FA) digunakan sebagai pembawa obat quercetin (QC) untuk terapi kanker dengan melepaskan QC secara bertahap ke sel karsinoma kolon. Konjugat NDCQDs-FA-QC ini menunjukkan penurunan signifikan pada tingkat kelangsungan hidup sel kanker karena peningkatan penyerapan QC dan akumulasi obat yang lebih tinggi di dalam tumor [34]. Penghantaran obat anti-kanker seperti doxorubicin dan paclitaxel, antibiotik, atau agen antiinflamasi dapat dilakukan menggunakan carbon dots (CDs) sebagai pembawa obat. CDs memiliki kemampuan untuk masuk ke dalam sel dengan mudah dan dapat dimodifikasi

permukaannya untuk meningkatkan spesifisitas target, sehingga memungkinkan penghantaran obat yang lebih efektif ke lokasi penyakit. Selain itu, setelah keamanan CDs terverifikasi, kompleks CDs dengan obat dapat digunakan untuk menargetkan lesi sekaligus membunuh sel tumor atau mengatasi infeksi dan peradangan secara efisien. Pendekatan ini juga memungkinkan pengembangan metode terapi yang dapat mendeteksi dan mengevaluasi kondisi pasien secara real-time, sehingga mempercepat dan meningkatkan efektivitas pengobatan [35], [36], [37].

Keunggulan Carbon Dots (CDs) sebagai carrier obat meliputi biokompatibilitas dan biodegradabilitas yang baik, sehingga aman digunakan dalam aplikasi biomedis. Selain itu, CDs memiliki efek pelacakan fluoresen yang memungkinkan visualisasi dan pemantauan distribusi obat secara real-time dalam tubuh. Namun, tantangan utama dalam penggunaan CDs adalah pengendalian ukuran dan distribusi partikel yang konsisten serta stabilitas kimia dan fisik selama proses pengiriman obat [38]. Tantangan utama penggunaan QDs dalam biomedis meliputi stabilitas fotoluminesensi, kontrol rilis obat, dan potensi imunogenisitas. Struktur core-shell dan modifikasi permukaan dapat meningkatkan stabilitas, biokompatibilitas, dan pengaturan rilis obat. Selain itu, regulasi ketat terkait toksisitas logam berat menuntut pengembangan QDs yang lebih aman dan ramah lingkungan [39].

Berikut ini disajikan tabel perbandingan studi terkini tentang penggunaan carbon dots (CDs) dalam sistem penghantaran obat. Tabel ini merangkum berbagai aspek penting dari masing-masing studi, seperti jenis CDs yang digunakan, metode sintesis, target obat, mekanisme penghantaran, serta keunggulan dan tantangan yang dihadapi. Informasi ini bertujuan untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai kemajuan riset dan potensi aplikasi CDs dalam bidang drug delivery.

Tabel 1. Perbandingan Studi Terkini tentang Carbon Dots dalam Penghantaran Obat

No	Studi & Sumber	Metode Sintesis & Bahan Dasar	Obat yang Dihantarkan	Mekanisme Pelepasan	Aplikasi Biomedis	Hasil Utama
1	[40], [41], [42]	Hidroterm al dari asam folat	Kurkumin	Responsif pH (pH 5 dan 7,4)	Antibakteri dan Antikanker (HeLa, HepG2)	Efisiensi adsorpsi kurkumin 83,11%; IC_{50} terhadap HeLa: 88,7 µg/mL; tidak toksik pada HepG2
2	[43], [44], [45]	Sintesis hijau dari albumin serum sapi (BSA)	Linezolid	Pelepasan berkelanjuta n	Penyembuha n luka dan antibakteri	Aktivitas antibakteri tinggi; biokompatibilitas baik; potensi sebagai biomaterial penyembuh luka
3	[46], [47]	Microwav e-assisted dari glukosa	Doksorubisin (DOX)	Responsif pH (asam)	Terapi kanker serviks	Pelepasan DOX dipicu pH asam; peningkatan sitotoksisitas terhadap sel kanker serviks
4	[48], [49]	Emulsi ganda (W/O/W) dengan	Kurkumin	Responsif pH	Terapi kanker payudara	Pelepasan terkontrol; peningkatan stabilitas dan

		kitosan dan Fe_2O_3				bioavailabilitas kurkumin
5	[50], [51]	Konjugasi asam hialuronat dengan graphene oxide quantum dots	Metformin	Tidak disebutkan	Terapi meta-inflamasi	Pengurangan peradangan jaringan adiposa dan steatosis hepatik; potensi sebagai agen terapi ganda
6	[52], [53]	Doping Fe pada carbon dots	Tidak spesifik	Tidak disebutkan	Terapi kanker multi-level	Induksi apoptosis; penghambatan transisi epitel-mesenkimal; aktivasi makrofag antitumor

Beragamnya metode sintesis seperti hidrotermal, sintesis hijau, dan metode emulsi mencerminkan fleksibilitas tinggi dalam produksi carbon dots untuk aplikasi penghantaran obat. Responsivitas terhadap pH adalah mekanisme pelepasan obat yang umum digunakan dalam hidrogel, di mana hidrogel dapat merespon perubahan pH lingkungan dengan mengubah struktur atau interaksinya sehingga memungkinkan pelepasan obat yang terkendali. Mekanisme ini sangat berguna untuk target seperti jaringan tumor yang memiliki lingkungan asam, sehingga obat dapat dilepaskan secara spesifik di lokasi tersebut. Hidrogel dapat mengandung ikatan seperti ikatan ionik dan hidrogen yang sensitif terhadap perubahan pH, sehingga memicu pelepasan obat sesuai kondisi lingkungan sekitar [54], [55].

Pada penelitian oleh Das., et. al. (2022) mengemukakan bahwa aplikasi biomedis dari Carbon Dots (CDs) meliputi terapi kanker, antibakteri, penyembuhan luka, dan pengobatan peradangan, yang menunjukkan potensi luas dalam bidang medis. CDs digunakan sebagai agen nano fotodinamik untuk terapi kanker, serta dalam pengembangan bahan pembalut luka antibakteri yang dapat menyerap ion Fe3+ untuk menghambat pertumbuhan bakteri di lokasi infeksi. Selain itu, CDs juga memiliki sifat biokompatibilitas tinggi dan fotostabilitas yang mendukung penggunaannya dalam bioimaging dan diagnosis medis [56]. Pengembangan CDs responsif multi-stimulus memungkinkan penghantaran obat yang lebih presisi dan adaptif terhadap lingkungan biologis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada bagian ini, penulis dapat memberikan ucapan terima kasih kepada pihak (perorangan atau lembaga) yang membantu dalam penelitian maupun penulisan artikel.

KESIMPULAN

Dokumen *Karbon Dots* membahas tentang sintesis, karakterisasi, dan aplikasi dari karbon dots (CDs), yaitu nanomaterial karbon berskala nano dengan sifat fluoresensi tinggi, stabilitas kimia baik, dan ramah lingkungan. CDs dapat disintesis dari berbagai sumber alami maupun kimia melalui metode bottom-up atau top-down. Aplikasinya luas, termasuk dalam bidang biomedis (seperti bioimaging dan drug delivery), sensor, fotokatalis, serta teknologi energi. Studi ini menekankan potensi besar CDs sebagai material multifungsi yang menjanjikan untuk inovasi teknologi masa depan, seiring dengan peningkatan efisiensi dan pemahaman terhadap mekanisme kerjanya. Meskipun memiliki banyak keunggulan, tantangan seperti kontrol ukuran partikel, stabilitas kimia, dan regulasi keamanan tetap perlu diperhatikan. Oleh karena itu, penelitian lanjutan sangat diperlukan untuk mengoptimalkan fungsionalisasi dan memperluas aplikasinya dalam bidang medis dan teknologi lainnya.

.

DAFTAR PUSTAKA

[1] W. Chen, G. Lv, W. Hu, D. Li, S. Chen, and Z. Dai, "Synthesis and applications of graphene quantum dots: A review," Apr. 25, 2018, *Walter de Gruyter GmbH*. doi: 10.1515/ntrev-2017-0199.

[2] H. F. Etefa, A. A. Tessema, and F. B. Dejene, "Carbon Dots for Future Prospects: Synthesis, Characterizations and Recent Applications: A Review (2019–2023)," *C (Basel)*, vol. 10, no. 3, p. 60, Jul. 2024, doi: 10.3390/c10030060.

[3] S. A. Lestari, Y. A. Nihan, W. Windari, and I. Salsabila, "Review Article: Karakteristik Terbaik Nanopartikel Emas Hasil Green Synthesis Menggunakan Ekstrak Tumbuhan sebagai Bioreduktor," *Jurnal Integrasi Kesehatan & Sains*, vol. 6, no. 2, pp. 144–149, Jul. 2024, doi: 10.29313/jiks.v6i2.13727.

[4] I. Retnosari, I. N. Hayati, A. Amalia, S. Hastuti, and T. E. Saraswati, "The Chemical Characteristics of Iron Oxide/Carbon Synthesized by the Arc Discharge Method in Liquid Media with the Addition of Ammonia," *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, vol. 21, no. 4, pp. 166–170, Oct. 2018, doi: 10.14710/jksa.21.4.166-170.

[5] P. Ranjan, S. Agrawal, A. Sinha, T. R. Rao, J. Balakrishnan, and A. D. Thakur, "A Low-Cost Non-explosive Synthesis of Graphene Oxide for Scalable Applications," *Sci Rep*, vol. 8, no. 1, Dec. 2018, doi: 10.1038/s41598-018-30613-4.

[6] M. A. Correa-Ochoa, J. Rojas, L. M. Gómez, D. Aguiar, C. A. Palacio-Tobón, and H. A. Colorado, "Systematic Search Using the Proknow-C Method for the Characterization of Atmospheric Particulate Matter Using the Materials Science Techniques XRD, FTIR, XRF, and Raman Spectroscopy," Jun. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/su15118504.

[7] V. Harish *et al.*, "Review on Nanoparticles and Nanostructured Materials: Bioimaging, Biosensing, Drug Delivery, Tissue Engineering, Antimicrobial, and Agro-Food Applications," Feb. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/nano12030457.

[8] A. O. Adeola, M. P. Duarte, and R. Naccache, "Microwave-assisted synthesis of carbon-based nanomaterials from biobased resources for water treatment applications: emerging trends and prospects," *Frontiers in Carbon*, vol. 2, Jul. 2023, doi: 10.3389/frcrb.2023.1220021.

[9] Y. Cai *et al.*, "Phototherapy in cancer treatment: strategies and challenges," Dec. 01, 2025, *Springer Nature*. doi: 10.1038/s41392-025-02140-y.

[10] S. Jafari, B. Mahyad, H. Hashemzadeh, S. Janfaza, T. Gholikhani, and L. Tayebi, "Biomedical applications of TiO2 nanostructures: Recent advances," 2020, *Dove Medical Press Ltd.* doi: 10.2147/IJN.S249441.

[11] O. C. Adekoya, G. J. Adekoya, R. E. Sadiku, Y. Hamam, and S. S. Ray, "Density Functional Theory Interaction Study of a Polyethylene Glycol-Based Nanocomposite with Cephalexin Drug for the Elimination of Wound Infection," *ACS Omega*, vol. 7, no. 38, pp. 33808–33820, Sep. 2022, doi: 10.1021/acsomega.2c02347.

[12] E. Serag, M. Helal, and A. El Nemr, "Curcumin Loaded onto Folic acid Carbon dots as a Potent drug Delivery System for Antibacterial and Anticancer Applications," *J Clust Sci*, vol. 35, no. 2, pp. 519–532, Feb. 2024, doi: 10.1007/s10876-023-02491-y.

[13] M. Usman and S. Cheng, "Recent Trends and Advancements in Green Synthesis of Biomass-Derived Carbon Dots," *Eng*, vol. 5, no. 3, pp. 2223–2263, Sep. 2024, doi: 10.3390/eng5030116.

[14] A. O. Adeola, M. P. Duarte, and R. Naccache, "Microwave-assisted synthesis of carbon-based nanomaterials from biobased resources for water treatment applications: emerging trends and prospects," *Frontiers in Carbon*, vol. 2, Jul. 2023, doi: 10.3389/frcrb.2023.1220021.

[15] G. Zheng *et al.*, "Therapeutic applications and potential biological barriers of nano-delivery systems in common gastrointestinal disorders: a comprehensive review," Apr. 01, 2025, *Springer Science and Business Media B.V.* doi: 10.1007/s42114-025-01292-3.

[16] X. Yin *et al.*, "Aptamer-functionalized nanomaterials (AFNs) for therapeutic management of hepatocellular carcinoma," Dec. 01, 2024, *BioMed Central Ltd*. doi: 10.1186/s12951-024-02486-5.

[17] S. Ding *et al.*, "Overcoming blood–brain barrier transport: Advances in nanoparticle-based drug delivery strategies," Jul. 01, 2020, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.mattod.2020.02.001.

[18] M. Patil *et al.*, "An insight of various vesicular systems, erythrosomes, and exosomes to control metastasis and cancer," Jul. 01, 2023, *Elsevier Inc.* doi: 10.1016/j.adcanc.2023.100103.

[19] P. Paul *et al.*, "Nanomedicines for the management of diabetic nephropathy: present progress and prospects," 2023, *Frontiers Media SA*. doi: 10.3389/fendo.2023.1236686.

[20] S. Rezvantalab *et al.*, "PLGA-based nanoparticles in cancer treatment," *Front Pharmacol*, vol. 9, no. NOV, Nov. 2018, doi: 10.3389/fphar.2018.01260.

[21] P. R. Kumbhar, P. Kumar, A. Lasure, R. Velayutham, and D. Mandal, "An updated landscape on nanotechnology-based drug delivery, immunotherapy, vaccinations, imaging, and biomarker detections for cancers: recent trends and future directions with clinical success," Dec. 01, 2023, *Springer*. doi: 10.1186/s11671-023-03913-6.

[22] H. Nsairat *et al.*, "How Advanced are Self-Assembled Nanomaterials for Targeted Drug Delivery? A Comprehensive Review of the Literature," 2025, *Dove Medical Press Ltd*. doi: 10.2147/IJN.S490444.

[23] A. Sharma *et al.*, "Advances in Lung Cancer Treatment Using Nanomedicines," 2023, *American Chemical Society*. doi: 10.1021/acsomega.2c04078.

[24] Y. Dutt *et al.*, "Therapeutic applications of nanobiotechnology," Dec. 01, 2023, *BioMed Central Ltd*. doi: 10.1186/s12951-023-01909-z.

[25] L. Ding, P. Agrawal, S. K. Singh, Y. S. Chhonker, J. Sun, and D. J. Murry, "Polymer-Based Drug Delivery Systems for Cancer Therapeutics," Mar. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/polym16060843.

[26] Z. Zhao, A. Ukidve, J. Kim, and S. Mitragotri, "Targeting Strategies for Tissue-Specific Drug Delivery," Apr. 02, 2020, *Cell Press*. doi: 10.1016/j.cell.2020.02.001.

[27] S. Khizar, N. Zine, A. Errachid, and A. Elaissari, "Introduction to Stimuli-Responsive Materials and Their Biomedical Applications," in *ACS Symposium Series*, vol. 1436, American Chemical Society, 2023, pp. 1–30. doi: 10.1021/bk-2023-1436.ch001.

[28] S. Senapati, A. K. Mahanta, S. Kumar, and P. Maiti, "Controlled drug delivery vehicles for cancer treatment and their performance," Dec. 01, 2018, *Springer Nature*. doi: 10.1038/s41392-017-0004-3.

[29] Y. Lee and D. H. Thompson, "Stimuli-responsive liposomes for drug delivery," Sep. 01, 2017, *Wiley-Blackwell*. doi: 10.1002/wnan.1450.

[30] F. Trotta *et al.*, "Citation: A Review of Cyclodextrin Encapsulation and Intelligent Response for the Release of Curcumin," 2022, doi: 10.3390/polym.

[31] S. Bera and S. K. Bhunia, "Bright yellow fluorescent N-doped Ti3C2 MXene quantum dots as an 'on/off/on' nanoprobe for selective As3+ ion detection," *Nanoscale*, Feb. 2025, doi: 10.1039/d4nr04139a.

[32] Z. Zhao, A. Ukidve, J. Kim, and S. Mitragotri, "Targeting Strategies for Tissue-Specific Drug Delivery," Apr. 02, 2020, *Cell Press*. doi: 10.1016/j.cell.2020.02.001.

[33] L. Ding, P. Agrawal, S. K. Singh, Y. S. Chhonker, J. Sun, and D. J. Murry, "Polymer-Based Drug Delivery Systems for Cancer Therapeutics," Mar. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/polym16060843.

[34] W. You *et al.*, "Fluorescent carbon quantum dots with controllable physicochemical properties fantastic for emerging applications: A review," *Carbon Neutralization*, vol. 3, no. 2, pp. 245–284, Mar. 2024, doi: 10.1002/cnl2.120.

[35] B. Wang and S. Lu, "The light of carbon dots: From mechanism to applications," Jan. 05, 2022, *Cell Press*. doi: 10.1016/j.matt.2021.10.016.

[36] U. e. Kalsoom, R. Yi, J. Qu, and L. Liu, "Nonlinear Optical Properties of CdSe and CdTe Core-Shell Quantum Dots and Their Applications," Apr. 20, 2021, *Frontiers Media SA*. doi: 10.3389/fphy.2021.612070.

[37] S. Das, L. Ngashangva, and P. Goswami, "Carbon dots: An emerging smart material for analytical applications," *Micromachines (Basel)*, vol. 12, no. 1, pp. 1–36, Jan. 2021, doi: 10.3390/mi12010084.

[38] T. Srinivasulu, K. Saritha, and K. T. R. Reddy, "Synthesis and characterization of Fe-doped ZnO thin films deposited by chemical spray pyrolysis," *Modern Electronic Materials*, vol. 3, no. 2, pp. 76–85, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.moem.2017.07.001.

[39] U. e. Kalsoom, R. Yi, J. Qu, and L. Liu, "Nonlinear Optical Properties of CdSe and CdTe Core-Shell Quantum Dots and Their Applications," Apr. 20, 2021, *Frontiers Media SA*. doi: 10.3389/fphy.2021.612070.

[40] E. Serag, M. Helal, and A. El Nemr, "Curcumin Loaded onto Folic acid Carbon dots as a Potent drug Delivery System for Antibacterial and Anticancer Applications," *J Clust Sci*, vol. 35, no. 2, pp. 519–532, Feb. 2024, doi: 10.1007/s10876-023-02491-y.

[41] J. Qi *et al.*, "Carbon Dots as Advanced Drug-Delivery Nanoplatforms for Antiinflammatory, Antibacterial, and Anticancer Applications: A Review," *ACS Appl Nano Mater*, vol. 6, no. 11, pp. 9071–9084, Jun. 2023, doi: 10.1021/acsanm.3c01207.

[42] 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, doi: 10.1016/j.cartre.2023.100276.

[43] D. S. Ghataty, R. I. Amer, M. A. Amer, M. F. Abdel Rahman, and R. N. Shamma, "Green Synthesis of Highly Fluorescent Carbon Dots from Bovine Serum Albumin for Linezolid Drug Delivery as Potential Wound Healing Biomaterial: Bio-Synergistic Approach, Antibacterial Activity, and In Vitro and Ex Vivo Evaluation," *Pharmaceutics*, vol. 15, no. 1, p. 234, Jan. 2023, doi: 10.3390/pharmaceutics15010234.

[44] D. S. Ghataty, R. I. Amer, M. A. Amer, M. F. Abdel Rahman, and R. N. Shamma, "Green Synthesis of Highly Fluorescent Carbon Dots from Bovine Serum Albumin for Linezolid Drug Delivery as Potential Wound Healing Biomaterial: Bio-Synergistic Approach, Antibacterial Activity, and In Vitro and Ex Vivo Evaluation," *Pharmaceutics*, vol. 15, no. 1, p. 234, Jan. 2023, doi: 10.3390/pharmaceutics15010234.

[45] H. Kaurav, D. Verma, A. Bansal, D. N. Kapoor, and S. Sheth, "Progress in drug delivery and diagnostic applications of carbon dots: a systematic review," *Front Chem*, vol. 11, Jul. 2023, doi: 10.3389/fchem.2023.1227843.

[46] H. Barhum *et al.*, "In Brain Multi-Photon Imaging of Vaterite Drug Delivery Cargoes loaded with Carbon Dots," 2023.

[47] M. Zoghi, M. Pourmadadi, F. Yazdian, M. N. Nigjeh, H. Rashedi, and R. Sahraeian, "Synthesis and characterization of chitosan/carbon quantum dots/Fe2O3 nanocomposite comprising curcumin for targeted drug delivery in breast cancer therapy," *Int J Biol Macromol*, vol. 249, p. 125788, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.125788.

[48] K. Sarkar *et al.*, "Hyaluronic acid-graphene oxide quantum dots nanoconjugate as dual purpose drug delivery and therapeutic agent in meta-inflammation," *J Nanobiotechnology*, vol. 21, no. 1, p. 246, Aug. 2023, doi: 10.1186/s12951-023-02015-w.

[49] M. Yang *et al.*, "Fe-doped carbon dots: a novel biocompatible nanoplatform for multi-level cancer therapy," *J Nanobiotechnology*, vol. 21, no. 1, p. 431, Nov. 2023, doi: 10.1186/s12951-023-02194-6.

[50] S. A. Mathew, P. Praveena, S. Dhanavel, R. Manikandan, S. Senthilkumar, and A. Stephen, "Luminescent chitosan/carbon dots as an effective nano-drug carrier for neurodegenerative diseases," *RSC Adv*, vol. 10, no. 41, pp. 24386–24396, 2020, doi: 10.1039/D0RA04599C.

[51] N. Dubey, S. Ramteke, N. K. Jain, T. Dutta, and A. L. Koner, "Glucose-derived carbon dots for targeted delivery of doxorubicin in cancer therapy," *New Journal of Chemistry*, vol. 47, no. 35, pp. 16390–16398, 2023, doi: 10.1039/D3NJ02843G.

[52] Y. Chai, Y. Feng, K. Zhang, and J. Li, "Preparation of Fluorescent Carbon Dots Composites and Their Potential Applications in Biomedicine and Drug Delivery—A Review," *Pharmaceutics*, vol. 14, no. 11, p. 2482, Nov. 2022, doi: 10.3390/pharmaceutics14112482.

[53] H. F. Etefa, A. A. Tessema, and F. B. Dejene, "Carbon Dots for Future Prospects: Synthesis, Characterizations and Recent Applications: A Review (2019–2023)," *C (Basel)*, vol. 10, no. 3, p. 60, Jul. 2024, doi: 10.3390/c10030060.

[54] C. W. H. Rajawasam *et al.*, "Educational series: characterizing crosslinked polymer networks," Dec. 19, 2023, *Royal Society of Chemistry*. doi: 10.1039/d3py00914a.

[55] M. H. Tran, I. Booth, A. Azarakhshi, P. Berrang, J. Wulff, and A. G. Brolo, "Synthesis of Graphene and Graphene Films with Minimal Structural Defects," *ACS Omega*, vol. 8, no. 43, pp. 40387–40395, Oct. 2023, doi: 10.1021/acsomega.3c04788.

[56] S. Das, L. Ngashangva, and P. Goswami, "Carbon dots: An emerging smart material for analytical applications," *Micromachines (Basel)*, vol. 12, no. 1, pp. 1–36, Jan. 2021, doi: 10.3390/mi12010084.