

Carbon Quantum Dots (CQDs) sebagai Sensor Optik

Monika Jamila Turrahmi¹, Deski Beri²

^{1,2}Program Studi Kimia, Universitas Negeri Padang
e-mail: monikajamila2@gmail.com

Abstrak

Carbon quantum dots (CQDs) adalah bahan nano semikonduktor berbasis karbon dengan dimensi nol yang baru dikenal karena ukurannya yang kecil, kurang dari 10 nm, dan karakteristik fluoresensinya yang relatif kuat. Tujuan penulisan artikel ini adalah untuk menjelaskan aplikasi CQD dalam bidang sensor. Hal yang paling penting agar CQDs dapat digunakan sebagai sensor adalah karakteristik emisi fluoresensinya. Fluoresens yang digunakan untuk penginderaan harus memiliki sinyal fluoresensi yang stabil dan masa pakai emisi yang lama. Selain itu, kompatibilitas pH dan selektivitas emisi fluoresensi yang dimiliki oleh CQDs sangat mempengaruhi proses sensor. Salah satu penelitian yang telah dilakukan adalah deteksi sulcotrione (sul) menggunakan NCQDs, sul menyebabkan intensitas fluoresensi NCQDs menurun dengan meningkatnya konsentrasi sul. Hal ini dapat disebabkan karena terbentuknya ikatan hidrogen antara atom oksigen O=S=O/C=O pada molekul Sul dengan H dan N (O) dari -OH/NH₂ pada permukaan NCQDs. Hal ini menyebabkan agregasi N-CQD dan fluoresensi yang padam.

Kata kunci: *Carbon Quantum Dots, Sensor, Nanoparticles*

Abstract

Carbon quantum dots (CQDs) are carbon-based semiconductor nanomaterials with zero dimensions that are newly recognised due to their small size of less than 10 nm and their relatively strong fluorescence characteristics. The purpose of writing this article is to explain the application of CQDs in the field of sensors. The most important thing for a CQDs to be used as a sensor is its fluorescence emission characteristics. Fluoresensing used for sensing must have a stable fluorescence signal and a long emission lifetime. In addition, the pH compatibility and selectivity of fluorescence emission possessed by CQDs greatly affect the sensor process. One of the studies that have been conducted is the detection of sulcotrione (sul) using NCQDs, sul causes the fluorescence intensity of NCQDs to decrease with increasing Sul concentration. This can be due to the formation of hydrogen bonds between oxygen atoms O=S=O/C=O in Sul molecules and H and N (O) from -OH/NH₂ on the surface of NCQDs. This leads to N-CQD aggregation and quenched fluorescence.

Keywords : *Carbon Quantum Dots, sensor, nanoparticles.*

PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir, material nano berbasis karbon seperti carbon nanotube (CNT), *fullerene*, *graphene*, dan berlian nano telah menarik perhatian luas. Namun, persiapan dan pemisahan berlian nano sulit dilakukan; CNT, fullerene, dan graphene memiliki sifat kelarutan yang buruk dalam air dan kesulitan dalam memberikan fluoresensi yang kuat di area yang terlihat, yang sangat membatasi aplikasinya. Titik-titik kuantum karbon (CQD) adalah nanomaterial berbasis karbon nol dimensi baru yang dikenal dengan ukurannya yang kecil dan karakteristik fluoresensi yang relatif kuat. Di bidang penelitian CQDs, graphene quantum dots (GQDs), carbon nanodots (CNDs), dan polymer dots (PDs) adalah penelitian utama objek. Dalam beberapa kasus, CQDs juga disebut carbon dots (CD).

Laporan terkait nanopartikel telah banyak dilakukan, seperti penelitian mengenai Carbon Quantum Dot (CQDs) yang sedang marak dilakukan pada beberapa tahun belakangan. CQDs atau yang disebut juga sebagai Carbon Dot (CDs) merupakan nanopartikel yang berukuran sangat kecil tak lebih dari 10 nm. CQDs memiliki sifat yang berbeda dari nanopartikel lainnya seperti mempunyai fluoresensi yang baik, fabrikasi biaya yang rendah, biokompatibilitas tinggi, toksisitas yang rendah, ramah lingkungan, stabilitas kimia yang baik serta memiliki kelarutan dalam air yang baik. CQDs memiliki banyak manfaat diberbagai bidang seperti bidang optoelektronik, sensor, fotovoltai, drug delivery, biomedis dan lain sebagainya (Zhu dkk., 2022)

Ada dua cara dalam mensintesis CQDs, yaitu metode *top-down* dan metode *bottom-up*. Metode *top-down* merupakan metode yang mengubah makromolekul berukuran besar menjadi CQDs yang berukuran kecil baik secara fisika maupun kimia. Sedangkan metode *bottom-up* mengacu kepada polimerisasi dan karbonisasi dari serangkaian molekul kecil menjadi CQDs melalui reaksi kimia (Shibata et al., 2022).

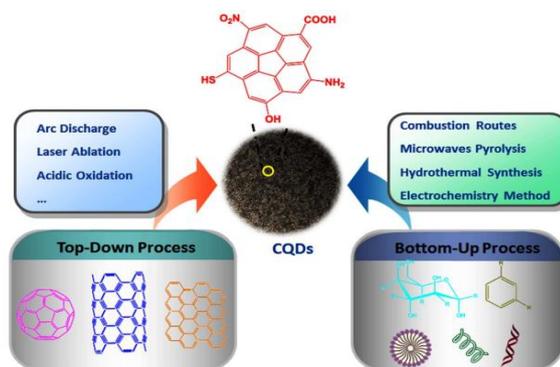
Beberapa metode tradisional dan lanjutan seperti spektrometri massa plasma berpasangan induktif, resonansi paramagnetik elektron, spektroskopi serapan atom, spektrofotometri, analisis elektrokimia dan kolorimetri telah sering dilakukan untuk mendeteksi ion logam, namun masih diperlukan penerapan metode yang sederhana, tidak mahal, akurat dan cepat untuk mendeteksi ion dalam air. Oleh karena itu banyak penelitian mengenai CQDs yang digunakan untuk mendeteksi ion-ion dan senyawa tersebut. Tujuan dilakukannya penulisan ini yaitu untuk menjelaskan penggunaan CQDs sebagai sensor optik.

Pada beberapa tahun belakangan, nano *Carbon Quantum Dots* (CQDs) telah banyak menarik perhatian banyak ilmuwan dikarenakan sifat yang dimilikinya, seperti ukurannya yang kecil, emisi fluoresensi, stabilitas kimia, kelarutan dalam air, sintesisnya yang mudah serta kemudahan fungsionalisasi (Kim et al., 2020). CQDs adalah struktur nano karbon dengan ukuran kurang dari 10nm. Fluoresensi dalam CQDs sendiri berasal dari dua sumber, emisi fluoresensi dari transisi celah pita p-domain terkongyugasi dan fluoresensi dari cacat permukaan.

Carbon quantum dots (CQDs) merupakan nanomaterial berbasis karbon dengan nol dimensi yang baru dikenal karena ukurannya yang kecil serta karakteristik fluoresensinya yang relatif kuat (Semeniuk et al., 2019). Untuk membuat bahan ini

berpendar, ukuran dan gugus permukaannya harus disesuaikan dengan hati-hati sehingga menyempurkan struktur elektroniknya CQDs tidak hanya memiliki sifat optik yang lebih baik dari semikonduktor Quantum Dot tradisional lainnya tetapi juga mengkompensasi kekurangan bahan tradisional dalam hal sitotoksitas, lingkungan dan biohazard. Selain itu, CQDs juga memiliki kelarutan air yang baik, stabilitas kimiawi, ketahanan *photobleaching*, kemudahan fungsionalisasi permukaan serta dapat dipersiapkan dalam skala besar (Wang *et al.*, 2019).

Sejak CQDs ditemukan, berbagai macam teknik telah dilakukan dan dikembangkan untuk mempersiapkannya (Naik *et al.*, 2019). Secara umum, metode sintesis CQDs dikelompokkan menjadi dua, yaitu metode *Top-down* dan metode *bottom-up*. Metode *top-down* yaitu penghancuran atau pendispersian makromolekul menjadi CQDs yang berukuran kecil dengan metode fisika atau kimia. Sedangkan pada proses *bottom-up* mengacu pada proses polimerisasi dan karbonisasi serangkaian molekul kecil menjadi CQDs melalui reaksi kimia. Beberapa metode yang dilakukan untuk sintesis CQDs yaitu elektrokimia, ablasi laser, oksidasi plasm asam, oksidasi termal, *microwave*, metode pirolisis, hidrotermal/solvotermal dan *arc discharge ultrasonic*.



Gambar 1. Metode top-down dan metode bottom up sintesis CQDs (Wang *et al.*, 2019).

Sumber daya terbarukan dan molekul-molekul kecil digunakan sebagai prekursor dengan bantuan pemanasan, iradiasi gelombang mikro dan ultrasound. Hal ini tergantung kepada perubahan fluoresensi, protokol penginderaan yang berbeda akan dicapai terutama telah banyak variasi strategi penginderaan yang telah dikembangkan dalam metode sintesis CQDs.

Struktur CQDs yang diperoleh dapat berupa grafit atau amorf. Ukuran CQDs sendiri dapat disetel oleh nanokomposit yang berbeda. Gugus fungsional yang berbeda dapat dengan mudah digunakan untuk memodifikasi permukaan CQDs, hal ini memungkinkannya untuk memiliki lebih banyak kemungkinan untuk menyetel sifat fisikokimia menjadi fungsional dan memiliki sifat katalitik yang mudah. Sifat ini dapat digunakan dalam berbagai pengaplikasian seperti pelabelan sel, pengiriman obat,

deteksi ion logam, tinta neon, fotokalatis, pencitraan optik, biosensing dan aplikasi konversi/ penyimpanan energi (Bu *et al.*, 2019).

Teknik optik meliputi segala sesuatu yang berhubungan dengan interaksi iradiasi elektromagnetik dengan bahan, interaksi meliputi interaksi hamburan, absorpsi, dan emisi iradiasi elektromagnetik. Dengan sifat yang dimiliki oleh CQDs, yaitu memiliki emisi fluoresensi yang tinggi dan baik menjadikannya ideal sebagai sensor optik untuk mendeteksi analit target. Beberapa penelitian telah melaporkan penggunaan CQDs sebagai sensor ion logam, seperti deteksi logam Hg^{2+} , Pb^{2+} , Fe^{3+} dan Cu^{2+} (Asmaa *et al.*, 2021).

Beberapa metode tradisional dan lanjutan seperti *inductive coupled plasma mass spectrometry*, *electron paramagnetic resonance*, *atomic absorption spectroscopy*, *spectrophotometry*, *electrochemical* dan *colorimetric analysis* telah sering dilakukan untuk mendeteksi ion logam, namun masih diperlukan penerapan metode yang sederhana, tidak mahal, akurat dan cepat untuk mendeteksi ion dalam air. Penggunaan CQDs sebagai sensor disesuaikan dengan ion yang akan dideteksi serta prekursor yang akan digunakan sehingga nantinya akan menghasilkan CQDs yang memiliki fluoresensi yang sesuai untuk mendeteksi ion logam tersebut.

Kompatibilitas pH penting untuk titik-titik kuantum karbon dalam aplikasinya untuk deteksi ion logam dalam lingkungan asam dan basa kompleks. Gugus nitrogen yang kaya elektron penting untuk menyediakan kondisi rekombinasi elektron-lubang yang terdelokalisasi dari titik-titik kuantum karbon, yang rentan terhadap efek protonasi dan deprotonasi.

Selain pH, Selektivitas deteksi adalah parameter penting dalam mengukur dan mengevaluasi kinerja sensor fluoresen. Beberapa Dalam kondisi yang identik, berikut ini adalah selektivitas metode untuk deteksi MnO_4^- yaitu: Fe^{3+} , Mn^{2+} , Ca^{2+} , Al^{3+} , Fe^{2+} , MnO_4^- , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , NO_2^- , ClO , H_2O_2 , CO_3^{2-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- . Setiap ion yang akan dideteksi memiliki metode selektivitas yang berbeda.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hal utama yang paling penting agar suatu CQDs dapat digunakan sebagai sensor yaitu karakteristik emisi fluoresensi yang terkandung padanya. Dimana pada setiap CQDs yang akan digunakan untuk deteksi suatu ion menggunakan prekursor yang spesifik ketika proses sintesis dilakukan. Selain itu, CQDs yang akan digunakan sebagai sensor juga dapat didoping menggunakan atom elektronegatif yang akan meningkatkan efisiensi sensor ion logam.

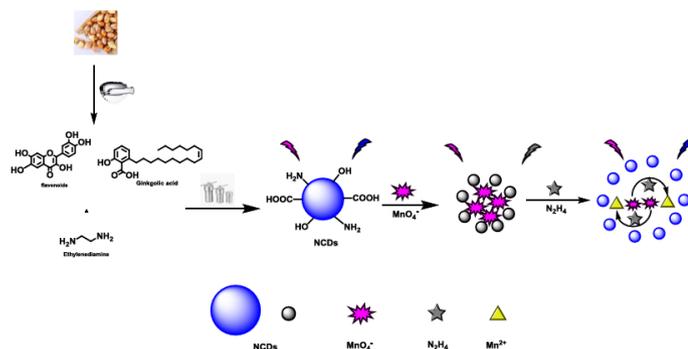
Fluoresensing yang digunakan untuk sensing atau imaging harus memiliki sinyal fluoresensi yang stabil dan masa pakai emisi yang lama. CQDs memancarkan fluoresensi yang kuat dalam larutan berair selama 6 jam atau bahkan 1 tahun, karena CQDs sendiri stabil bila dipertahankan dalam larutan berair dan larutan yang memiliki salinitas tinggi untuk waktu yang lama (Zhang *et al.*, 2014).

Penggunaan CQDs sebagai sensor optik terjadi karena adanya proses *quenching* pada emisi fluoresensi, proses *quenching* merupakan proses penurunan emisi fluoresensi pada CQDs ketika diberikan pada logam, proses ini terjadi karena

adanya transfer muatan antara CQDs dan kation pada logam. Penurunan intensitas terjadi karena adanya koordinasi antara kation dengan gugus fungsi yang terdapat pada permukaan CQDs. Hal ini juga disebabkan oleh transfer energi elektron non-radiasi sehingga mengurangi pendaran CQDs itu sendiri.

Sebagai contoh CQDs yang didoping Nitrogen yang berasal dari kulit pisang telah digunakan untuk mendeteksi ion Fe^{3+} dengan mata telanjang, karena memiliki kemampuan untuk mengubah sesuatu yang tak berwarna menjadi warna kuning di dalam media air.

Adapun penelitian yang telah dilakukan, mendeteksi ion permanganat dan hidrazin dilakukan menggunakan CQDs yang telah didoping oleh Nitrogen menggunakan metode hidrotermal untuk proses sintesis dengan prekursor yang digunakan yaitu buah ginkgo dan etildiamin (Zhi *et al.*, 2022). Dari penelitian yang dilakukan diperoleh bahwa spektrum serapan UV-Vis MnO_4^- dan spektrum eksitasi fluoresensi N-CQDS bertumpang tindih, hal ini menunjukkan MnO_4^- menyerap eksitasi dan emisi N-CQDs.



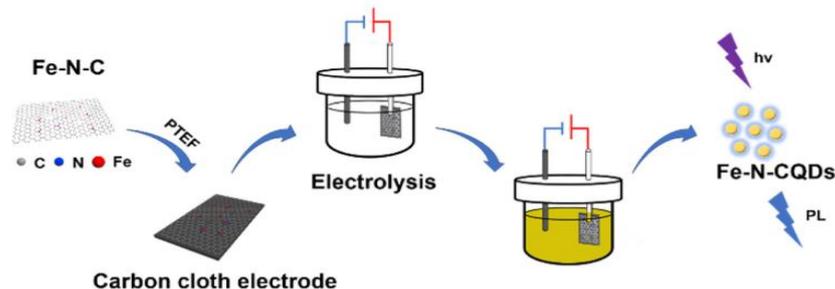
Gambar 2. Proses sintesis dan uji fluoresensi MnO_4^- dan N_2H_4 (Zhi *et al.*, 2022).

Untuk proses deteksi ion, dilakukan dibawah parameter optimum, solusi N-CDs pertama diencerkan dengan aquades untuk mendapatkan suspensi N-CDs. Pada deteksi MnO_4^- , suspensi N-CDs dan MnO_4^- dengan konsentrasi yang bervariasi dicampur secara merata kemudian dibiarkan selama 30 detik pada suhu ruang (25°C). Untuk deteksi N_2H_4 , N_2H_4 dengan konsentrasi berbeda ditambahkan ke kompleks N-CDs- MnO_4^- pada suhu kamar selama 1 menit. Spektrum fluoresensi diukur di bawah eksitasi 398 nm. Selektivitas untuk masalah ini diukur dengan menambahkan lima belas jenis ion logam lainnya.

Kation atau anion lain hampir tidak menyebabkan gangguan pada pemadaman fluoresensi N-CD. ketika MnO_4^- berinteraksi dengan ion lain, gangguan ion lain pada efek pendinginan sistem N-CDs / MnO_4^- dapat diabaikan. Hasilnya menunjukkan bahwa N-CD memiliki selektivitas yang lebih baik untuk MnO_4^- . Efek ion-ion yang berbeda pada pemulihan fluoresensi N-CDs/ MnO_4^- diperiksa untuk menentukan selektivitas N-CDs/ MnO_4^- terhadap penentuan N_2H_4 . Kehadiran spesies yang mengganggu tidak berpengaruh pada deteksi N_2H_4 . Oleh karena itu, metode ini dapat mewujudkan penentuan selektif MnO_4^- dan N_2H_4 secara aktual sampel.

Penelitian selanjutnya yang telah dilakukan yaitu menggunakan CQDs yang telah didoping Fe dan N, untuk mendeteksi ion Cu^{2+} . Fe-N-CQDs disintesis dengan elektrolisis yang efisien dari elektroda karbon, yang dilapisi dengan karbon doping nitrogen dengan besi monoatomik (FE-N-C), emisi yang dihasilkan yaitu fluoresensi berwarna biru. Dimana memiliki hubungan linear yang sangat luas dengan Cu^{2+} . Percobaan selektivitas ion logam dilakukan dengan melarutkan Serbuk Fe-N-CQDs dalam aquades dan dicatat intensitas fluoresensi pada panjang gelombang eksitasi 340 nm sebagai intensitas awal (F0) dengan suspensi Fe-N-CQDs (Sun *et al.*, 2021).

Berikut merupakan ilustrasi sintesis dari Fe-N-CQDs yang dilakukan oleh



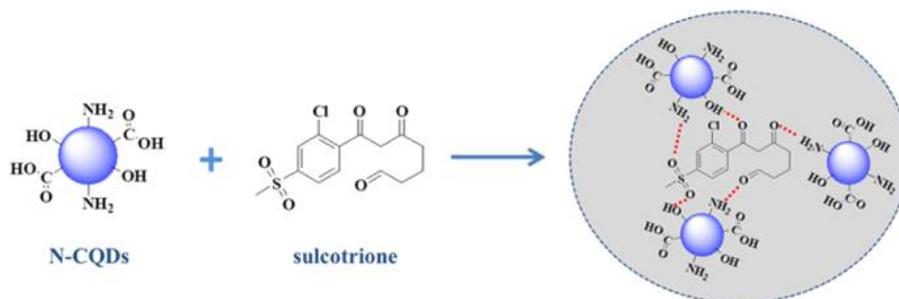
Gambar 3. Ilustrasi preparasi Fe-N-CQDs sebagai sensor (Sun *et al.*, 2021)

Pada proses deteksi logam Cu^{2+} larutan ion logam yang berbeda ditambahkan ke dalam suspensi Fe-N-CQDs. Khususnya, untuk menghambat hidrolisis, selanjutnya ditambahkan HCl ke dalam ion logam dan larutan blanko. Setelah beberapa menit, intensitas fluoresensi suspensi terganggu penuh dicatat sebagai F pada panjang gelombang eksitasi yang sama. Percobaan deteksi sensitif Cu^{2+} diulangi dengan menggunakan konsentrasi Cu^{2+} yang berbeda. Spektrum fluoresensi berulang kali direkam pada suhu kamar, dan percobaan dilakukan dalam kondisi yang sama.

Untuk mengevaluasi selektivitas Fe-N-CQDs-2 terhadap ion Cu^{2+} percobaan komparatif dilakukan dengan kation logam Cu^{2+} , Pb^{2+} , Co^{2+} , Zn^{2+} , Ca^{2+} , Ba^{2+} , Ni^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Fe^{3+} , Cd^{2+} , Cr^{3+} , dan anion HCO_3^- , Br^- , CO_3^{2-} , HPO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} . Diperoleh selektivitas yang sangat baik antara Fe-N-CQDs-2 dengan Cu^{2+} . Sensitivitas Fe-N-CQDs-2 terhadap ion Cu^{2+} , intensitas fluoresensi emisi Fe-N-CQDs-2 terhadap konsentrasi Cu^{2+} yang berbeda ditunjukkan pada gambar. Dengan meningkatnya konsentrasi Cu^{2+} , puncak emisi Fe-N-CQDs-2 pada 340 nm menurun secara bertahap, yang menunjukkan sensitivitas yang besar terhadap Cu^{2+} . Hal ini membuktikan bahwa Fe-N-CQD tidak hanya memiliki sensitivitas yang tinggi dalam deteksi Cu^{2+} tetapi juga berpotensi yang sangat baik dalam aplikasi deteksi Cu^{2+} .

Sedangkan penelitian yang dilakukan sebelumnya yaitu deteksi sulcotrione (Sul) dan aktivitas anti-patogen menggunakan Nitrogen doping CQDs dengan prekursor hijau yaitu akar tumbuhan kelor. Adapun emisi fluoresensi yang dihasilkan berwarna biru (Wang *et al.*, 2021).

Berikut merupakan skema deteksi deteksi sul yang dilakukan menggunakan N-CQDs



Gambar 4. Skema deteksi sul oleh N-CQDs (Wang *et al.*, 2021).

Dari penelitian yang dilakukan, untuk mendeteksi masing-masing zat maka CQDs yang akan digunakan terlebih dahulu dilarutkan dalam larutan yang mengandung zat/senyawa yang akan dideteksi. Selanjutnya larutan tersebut akan dideteksi menggunakan fluoresensi spektrometer pada panjang gelombang eksitasi 350 nm dan panjang gelombang emisi 445 nm.

Dengan menggunakan kondisi optimum, spektrum fluoresensi N-CQDs dengan adanya konsentrasi Sul yang berbeda c. Intensitas fluoresensi N-CQDs berkurang dengan meningkatnya kadar Sul. Fenomena ini dapat disebabkan oleh pembentukan ikatan hidrogen antara atom oksigen O=S=O / C=O dalam molekul Sul dan H dan N (O) dari -OH / NH₂ pada permukaan N-CQDs. Hal ini mungkin menyebabkan agregasi N-CQD dan fluoresensi yang dipadamkan.

Penelitian yang telah dilaporkan oleh (Nagaraj *et al.*,2022) yaitu mendeteksi ion Fe³⁺ juga menggunakan fluoresensi CQDs yang disintesis dari buah *B. flabellifer* (apel es). Probe sensor CQDs yang disintesis dipelajari dengan berbagai kekuatan ion Fe³⁺ Penurunan konsentrasi ion Fe³⁺ bergantung pada konsentrasi ion Fe³⁺ diamati pada sifat fluoresensi CQDs karena pembentukan kompleks hidroksida (logam) pada permukaan CQDs.

SIMPULAN

Penggunaan CQDs sebagai sensor optik terjadi akibat adanya proses pemadaman (*quenching*) pada emisi fluoresensi, proses quenching merupakan proses penurunan emisi fluoresensi pada CQDs saat diberi pada logam, proses ini terjadi akibat adanya transfer muatan antara CQDs dengan kation pada logam. Penurunan intensitas terjadi karena terjadinya koordinasi antara kation dengan gugus fungsi yang terdapat pada permukaan CQDs. Hal itu juga diakibatkan karena terjadinya transfer energi elektron non radiasi sehingga menurunkan pendaran dari CQDs itu sendiri.

DAFTAR PUSTAKA

Z. Zhu, H. Niu, R. Li, Z. Yang, J. Wang, and X. Li, "Biosensors and Bioelectronics: X One-pot hydrothermal synthesis of fluorescent carbon quantum dots with tunable emission color for application in electroluminescence detection of dopamine," vol. 10, no. January, 2022, doi: 10.1016/j.biosx.2022.100141.

- H. Shibata, M. Abe, K. Sato, K. Uwai, K. Tokuraku, and T. Iimori, "Microwave-assisted synthesis and formation mechanism of fluorescent carbon dots from starch," *Carbohydr. Polym. Technol. Appl.*, vol. 3, no. December 2021, p. 100218, 2022, doi: 10.1016/j.carpta.2022.100218.
- K. W. Kim, T. Y. Choi, Y. M. Kwon, and J. Y. H. Kim, "Simple synthesis of photoluminescent carbon dots from a marine polysaccharide found in shark cartilage," *Electron. J. Biotechnol.*, vol. 47, pp. 36–42, 2020, doi: 10.1016/j.ejbt.2020.07.003.
- M. Semeniuk et al., "Future Perspectives and Review on Organic Carbon Dots in Electronic Applications," *ACS Nano*, vol. 13, no. 6, pp. 6224–6255, 2019, doi: 10.1021/acsnano.9b00688.
- X. Wang, Y. Feng, P. Dong, and J. Huang, "A Mini Review on Carbon Quantum Dots: Preparation, Properties, and Electrocatalytic Application," *Front. Chem.*, vol. 7, no. October, pp. 1–9, 2019, doi: 10.3389/fchem.2019.00671.
- V. Naik et al., "Nitrogen-Doped Carbon Dots via Hydrothermal Synthesis: Naked Eye Fluorescent Sensor for Dopamine and Used for Multicolor Cell Imaging," *ACS Appl. Bio Mater.*, vol. 2, no. 5, pp. 2069–2077, 2019, doi: 10.1021/acsabm.9b00101.
- L. Bu et al., "One-step synthesis of N-doped carbon dots, and their applications in curcumin sensing, fluorescent inks, and super-resolution nanoscopy.," *Mikrochim. Acta*, vol. 186, no. 10, p. 675, Sep. 2019, doi: 10.1007/s00604-019-3762-5.
- Asmaa M. El-Shafey, "Carbon dots : Discovery , structure , fluorescent properties , and applications," *Green Process. Synth.*, vol. 10, pp. 134–156, 2021.
- S. Pei, J. Zhang, M. Gao, D. Wu, Y. Yang, and R. Liu, "A facile hydrothermal approach towards photoluminescent carbon dots from amino acids," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 439, pp. 129–133, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2014.10.030>.
- S. Zhi, X. Yang, and C. Yao, "*Green Analytical Chemistry Nitrogen doped carbon dots for sensitive detection of permanganate and hydrazine by a fluorescence off-on strategy*," vol. 3, no. July, pp. 0–6, 2022, doi: 10.1016/j.greeac.2022.100022.
- S. Sun et al., "Electrochemical synthesis of Fe_{Nx} doped carbon quantum dots for sensitive detection of Cu²⁺ ion," *Green Energy Environ.*, no. xxxx, 2021, doi: 10.1016/j.gee.2021.04.005.
- Z. Wang et al., "The green synthesis of carbon quantum dots and applications for sulcotrione detection and anti-pathogen activities," *J. Saudi Chem. Soc.*, vol. 25, no. 12, p. 101373, 2021, doi: 10.1016/j.jscs.2021.101373.
- M. Nagaraj et al., "Detection of Fe³⁺ ions in aqueous environment using fluorescent carbon quantum dots synthesized from endosperm of *Borassus flabellifer*," *Environ. Res.*, vol. 212, no. PB, p. 113273, 2022, doi: 10.1016/j.envres.2022.113273.