



Review

Karbon dots (C-dots) dari Bahan Hayati untuk Deteksi Logam Berat

(Carbon Dots (C-Dots) from Biomass for Heavy Metal Detection)

Cut Navita Rahmi, Sri Sugiarti*, Alvian Dea Yuliani

Jurusan Kimia, FMIPA, IPB University
Jalan Raya Dramaga, Babakan, Kec. Dramaga, Kota Bogor, 16680, Indonesia*Corresponding author: srisugiarti@apps.ipb.ac.id

DOI: 10.20961/alchemy.19.2.61881.234-246

Received 9 June 2022, Revised 9 December 2022, Accepted 30 December 2022, Published 30 September 2022

Kata kunci:bahan hayati;
C-dots;
deteksi;
ion logam berat.

ABSTRAK. Pendeteksian logam berat pada limbah hasil industri perlu dilakukan untuk mencegah timbulnya penyakit apabila memasuki tubuh manusia. Salah satu bahan yang dapat digunakan untuk pendeteksian logam berat yaitu C-dots. C-dots yang berasal dari bahan hayati akan menghasilkan gugus fungsi yang dapat meningkatkan karakteristik optik C-dots agar lebih selektif dalam pendeteksian logam berat. Selain itu, penggunaan bahan hayati sebagai sumber C-dots akan memanfaatkan limbah sehingga mengurangi sampah. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji nanopartikel karbon C-dots yang berasal dari sumber hayati sebagai pendeteksian logam berat. C-dots yang berasal dari sumber hayati sudah banyak diteliti sebagai deteksi logam berat secara selektif. Gugus fungsi pada permukaan C-dots akan menentukan interaksi spesifik antara C-dots dan masing-masing logam. Reaksi pembentukan kompleks antara C-dots dengan ion logam cenderung mengikuti aturan sebagai berikut, ion logam yang keras akan cenderung mengikat ligan yang keras dan ion logam lunak cenderung mengikat lebih banyak ligan yang lunak. C-dots tersintesis dengan metode hidrotermal cenderung menghasilkan *quantum yield* dan intensitas fluoresensi yang lebih tinggi yang sensitif untuk deteksi logam berat.

Keywords:biomass;
C-dots;
detection;
heavy metal ion.

ABSTRACT. Detecting heavy metals in industrial waste is necessary to prevent the disease from entering the human body. One of the materials that can be used to detect heavy metals is carbon dots (C-dots). C-dots derived from biological materials have functional groups that can improve their optical characteristics to be more selective in detecting heavy metals. In addition, using natural materials as a source of C-dots will utilize waste, thereby reducing waste. This study aims to review carbon nanoparticles derived from natural sources for detecting heavy metals. C-dots derived from biological sources have been widely studied as selective heavy metal detection. The functional groups on the surface of the C-dots will determine the specific interactions between the C-dots and each metal. The complex reaction between C-dots and metal ions tends to follow the rules: hard metal ions tend to bind to hard ligands, and soft metal ions tend to bind more to soft ligands. C-dots synthesized via the hydrothermal method tend to produce a higher quantum yield and fluorescence intensity that are sensitive to heavy metal detection.

ISI

PENDAHULUAN.....	235
NANODOT KARBON (C-DOTS)	235
Sifat dan Karakteristik Optik C-Dots	236
Ukuran dan Permukaan	236
Absorbansi dan Fluoresensi C-dots	236
Gugus Fungsi C-dots	237
C-Dots dari Bahan Alam untuk Deteksi Logam.....	237
Interaksi dan Limit Deteksi C-Dots dari Bahan Alam untuk Deteksi Logam	239
Metode Sintesis C-dots.....	241
Pengaruh Metode Sintesis C-dots	242
KESIMPULAN	243

Cite this as: Rahmi, C. N., Sugiarti, S., and Yuliani, A.D., 2023. Karbon Dots (C-dots) dari Bahan Hayati untuk Deteksi Logam Berat. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 19(2), 234-246. <https://dx.doi.org/10.20961/alchemy.19.2.61881.234-246>.

PENDAHULUAN

Limbah industri yang mengandung logam berat berbahaya bagi kesehatan manusia dan lingkungan jika tidak ditangani dengan benar. Limbah yang memiliki kandungan logam berat yang melewati ambang batas berpotensi menimbulkan berbagai penyakit seperti kanker, penyakit itai-itai, keracunan dan penyakit ginjal apabila terserap ke dalam tubuh manusia (Istarani and Pandebesie, 2014). Salah satu bahan yang telah banyak diteliti untuk digunakan dalam aplikasi analisis bidang kimia untuk deteksi logam, sensor, dan *bioimaging*, yaitu nanopartikel karbon (C-dots). C-dots sebagai sensor logam berat telah dikembangkan dari dasawarsa yang lalu hingga saat ini. Perkembangan sintesis C-dots seiring dengan penemuan bahan hayati sebagai sumber yang baik untuk sintesis C-dots sehingga pada saat ini telah banyak sumber yang menggunakan C-dots dari bahan hayati untuk pendeteksian logam berat.

C-dots merupakan nanopartikel karbon berukuran 10 nm berdimensi nol (Li *et al.*, 2012). C-dots memiliki kelebihan intensitas fluoresensi tinggi, sifat optik yang baik, biokompatibilitas yang tinggi, sifat kimia yang stabil, berfluoresensi, tidak berbahaya ke lingkungan, sintesis yang mudah, biaya murah, larut dalam air, *inert*, toksisitas rendah, dan mudah dalam pengaplikasian (Baker and Baker, 2010; Irvani and Varma, 2020; Li *et al.*, 2012). Beberapa tahun terakhir, material awal C-dots yang berasal dari limbah hayati banyak diteliti untuk mensintesis C-dots karena memiliki kelebihan ramah lingkungan dan biaya yang murah (Tyagi *et al.*, 2016). C-dots dapat disintesis dari material awal yang mengandung karbon, seperti asam sitrat oleh Qu *et al.* (2012), susu kedelai oleh Zhu *et al.* (2012), kulit jeruk oleh Prasannan and Imae (2013), kulit lemon oleh Tyagi *et al.* (2016), dan kulit buah naga dan pir oleh Hepriyadi and Isnaeni (2018).

Keberadaan senyawa fenolik, karbohidrat, protein, lignin, hemiselulosa, dan selulosa pada sumber hayati dapat menjadi sumber gugus fungsi yang diduga akan menambah keberadaan gugus karbonil dan hidroksil di permukaan C-dots dan akan meningkatkan intensitas fluoresensinya. Selain itu, gugus fungsi hidroksil dan karboksil akan menyebabkan adanya interaksi antara gugus fungsi dengan logam yang akan diikat (Liaotrakoon, 2013). C-dots yang dihasilkan dari bahan alam biasanya menghasilkan fotoluminesens berwarna biru pada panjang gelombang 435 – 480 nm disebabkan oleh gugus fungsi yang berada pada permukaan C-dots, yaitu karbonil dan hidroksil (Das *et al.*, 2018). Ulasan ini membahas beberapa penelitian terkait sintesis C-dots yang berasal dari sumber hayati untuk deteksi logam berat dengan mempertimbangkan gugus fungsi pada permukaan, limit deteksi, dan *quantum yield* dari C-dots. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji nanopartikel karbon C-dots yang berasal dari sumber hayati dalam pengaplikasiannya untuk mendeteksi logam berat.

Artikel ulasan ini disusun melalui empat tahapan, yaitu tahapan pertama mencari dan menyeleksi pustaka yang akan diacu pada penelitian ini. Pustaka didapatkan melalui situs seperti sciencedirect.com, pubsrsc.org, Google Scholar, hindawi.com, reasearchgate.net, mdpi.com, ncbi.nlm.nih.gov, dan situs jurnal lainnya. Kata kunci pencarian yang digunakan, yaitu “*Synthesis carbon dots from natural resourcess or biomass for metal ion determination*”. Pada tahap pertama ini, penyeleksian jurnal dilakukan dengan memilah artikel dari jurnal yang sesuai dengan tema kemudian mengambil bagian hasil, tujuan, serta simpulan dari jurnal terpilih. Tahap kedua, yaitu menyatukan hasil dari data, informasi, dan simpulan yang sudah dipahami untuk mencari dan membandingkan keterkaitan antar pustaka. Tahap ketiga, yaitu mengidentifikasi dan menganalisis keterkaitan antar jurnal dan informasi yang akan dikaji pada penelitian ini. Tahap keempat, yaitu merumuskan pembahasan dan menyimpulkan informasi yang didapatkan.

NANODOT KARBON (C-DOTS)

Nanodot karbon (C-dots) adalah nanomaterial karbon berdimensi 0, yaitu dimensi x, y, dan z berada pada skala nano. C-dots terdiri dari inti C-dots dengan atom karbon berhibridisasi sp^2 dan sp^3 yang dapat dimodifikasi pada permukaan (Gayen *et al.*, 2019). C-dots berbeda dengan material karbon pada umumnya karena memiliki intensitas fluoresensi yang kuat sehingga disebut juga dengan karbon berfluoresensi (Li *et al.*, 2012). C-dots memiliki kelarutan dan kesesuaian untuk fungsionalisasi dengan berbagai senyawa organik, anorganik, polimer, dan biologis. C-dots dapat disintesis dengan rute yang cepat, murah dengan sifat kimia yang stabil, tidak berbahaya ke lingkungan, larut dalam air, *inert*, toksisitas rendah, dan mudah dalam pengaplikasian (Baker and Baker, 2010; Irvani and Varma, 2020; Li *et al.*, 2012).

Sifat dan Karakteristik Optik C-Dots

Ukuran dan Permukaan

C-dots merupakan material dengan ukuran secara umum dibawah 10 nm. Ukuran dan permukaan C-dots dapat diamati menggunakan HR-TEM (*High Resolution-Transmission Electron Microscop*) atau XRD (*X-Ray Diffraction*). Ukuran dan sifat permukaan C-dots ditentukan untuk mengamati struktur kristal serta jenis dan kelimpahan gugus fungsi pada permukaannya. Analisis HR-TEM akan mengidentifikasi ultrastuktur dari C-dots dengan resolusi yang tinggi dan memberikan informasi terkait morfologi partikel, distribusi ukuran, dan struktur kristal dari C-dots. Analisis XRD dapat memberikan informasi terkait sifat kristal C-dots seperti dimensi sel satuan dan jarak kristal dalam inti karbon (Jelinek, 2017; Singh *et al.*, 2018). Jelinek (2017) melakukan analisis XRD yang menunjukkan adanya puncak pada 2θ dengan mencerminkan stuktur grafit kristal. Puncak XRD dengan jarak kisi 0,45 nm yang lebih besar dari grafit (*bulk graphite*) menunjukkan karakter C-dots yang disintesis memiliki karakter amorf tertentu (Jelinek, 2017). Salah satu hasil dari analisis HR-TEM C-dots yang disintesis dari batu bara menghasilkan informasi C-dots kristalin dengan bentuk *spherical* bulat dan ukuran partikel sebesar 3.10 ± 0.80 nm (Hu *et al.*, 2014).

Absorbansi dan Fluoresensi C-dots

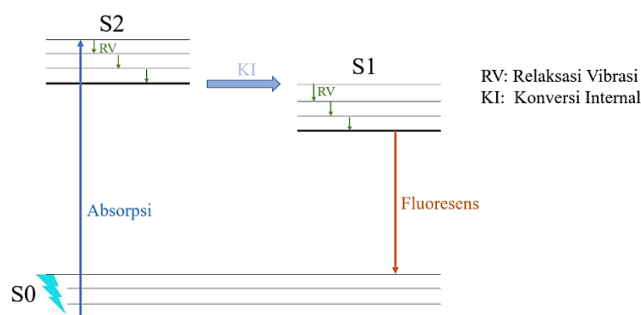
Serapan optik dari C-dots berada pada wilayah ultraviolet khususnya ultraviolet dekat. Secara umum C-dots memiliki pita absorpsi yang berada pada 260 – 320 nm. Puncak penyerapan optik C-dots umumnya terjadi karena adanya transisi elektron dari π ke π^* dari ikatan rangkap dua cincin benzena atau C=C dan transisi dari n ke π^* dari ikatan C=O. Menurut Zhang *et al.* (2019b), transisi n ke π^* tergantung pada jenis gugus fungsi yang ada di permukaan C-dots, seperti gugus hidroksi atau epoksida. Absorbansi dari C-dots dapat diukur dengan spektrofotometer UV-Vis. Tujuan pengukuran absorbansi C-dots, yaitu untuk mendapatkan absorbansi maksimum untuk penentuan panjang gelombang eksitasi pada pengukuran fluoresensi C-dots. Pita emisi dari C-dots umumnya terletak di warna biru yang berada pada 450 nm ketika tereksitasi di pita serapan n ke π^* . Sifat emisi dari C-dots bergantung pada panjang gelombang eksitasi. Seiring dengan peningkatan bertahap dari panjang gelombang eksitasi maka akan terjadi pergeseran merah (batokromik) pada puncak emisi yang disertai dengan perubahan intensitas emisi. Penentuan nilai absorbansi maksimum pada pengukuran spektrofotometer UV-Vis dapat menentukan panjang gelombang eksitasi yang menghasilkan intensitas emisi yang maksimal (Bandi *et al.*, 2018; Hu *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2019).

Salah satu sifat yang substansial dari C-dots ialah sifat fotoluminesensinya berupa fluoresensi. Sifat fluoresensi dari C-dots dapat diatur (*tuned*) dengan intensitas fluoresensi yang baik. Salah satu cara untuk mengatur intensitas maupun panjang gelombang maksimum fluresensi adalah melalui variasi C-dots yang digunakan. Selain itu variasi ukuran C-dots juga dapat mempengaruhi sifat fluoresensinya. C-dots cenderung menunjukkan emisi untuk wilayah spektrum yang luas atau yang diinginkan sehingga panjang gelombang yang digunakan dapat diatur (bersifat *tuneable*) (Zhang *et al.*, 2019b). Sifat fluoresensi C-dots akan menentukan sifat optik yang memengaruhi kinerja C-dots dalam berbagai aplikasi termasuk untuk mendeteksi ion logam berat. Mekanisme fluoresensi yang terjadi, yaitu ketika molekul mengabsorpsi radiasi maka elektron akan tereksitasi dari S0 (keadaan dasar) ke S2 (keadaan tereksitasi). Molekul kehilangan energi melalui relaksasi vibrasi kemudian terjadi konversi internal ke S1. Molekul kembali kehilangan energi melalui relaksasi vibrasi dan setelah itu elektron akan kembali menuju S0 (keadaan dasar) dengan memancarkan radiasi fluoresensi (Gambar 1). Mekanisme fluoresensi pada C-dots terjadi akibat adanya transisi elektron π . Elektron mengalami eksitasi dari pita HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*) ke pita LUMO (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital*) setelah menerima energi UV namun elektron pada pita LUMO tidak stabil yang mengakibatkan elektron akan rekombinasi ke pita HOMO kembali dengan mengemisikan cahaya tampak, yaitu fluoresensi (Aji *et al.*, 2020).

Salah satu parameter fluoresensi yang dapat menentukan sifat fluoresensi C-dots ialah, panjang gelombang emisi maksimum yang didapatkan dari intensitas fluoresensi yang paling tinggi. C-dots pada umumnya akan mengemisikan fluoresensi biru yang bergantung pada panjang gelombang eksitasinya. Semakin tinggi panjang gelombang eksitasi, maka akan terjadi pergeseran merah kearah kanan pada spektrum emisi fluoresensi dari C-dots yang akan menghasilkan warna selain biru pada fluoresensinya. Panjang gelombang maksimum emisi dapat ditentukan menggunakan spektrofotometer fluoresensi.

Mekanisme emisi fluoresensi dipengaruhi oleh empat prinsip, yaitu efek kurungan kuantum, keadaan permukaan dan molekul C-dots, serta efek *cross-link enhanced emission*. Efek kurungan kuantum menggambarkan elektron dalam tingkat energi, potensial, pita konduksi, dan celah pita energi elektron. Efek ini dipengaruhi oleh

domain π terkonjugasi dan ukuran kluster dari C-dots. Panjang gelombang emisi akan menurun dengan mengecilnya ukuran C-dots akibat perbedaan energi (*band gap*) antara pita kulit terluar dan pita konduksi melebar. Panjang gelombang emisi akan meningkat seiring dengan bertambahnya cincin aromatik terkonjugasi akibat perbedaan energi pada pita domain konjugasi π semakin sempit. Keadaan permukaan C-dots berpengaruh pada emisi dengan hibridisasi sinergis dari inti karbon dan gugus kimia. C-dots dengan permukaan yang lebih banyak gugus fungsi seperti C=N, C=O, dan C-N lebih berwarna dibandingkan dengan C-dots dengan gugus fungsi permukaan yang lebih sedikit. Keadaan molekul berhubungan dengan fluorofor organik pada permukaan inti karbon. Keberadaan fluorofor molekuler akan meningkatkan *quantum yield* dari C-dots. Efek *cross-link enhanced emission* melibatkan pembentukan pusat emisi fluoresensi yang diinduksi dari agregasi atau ikatan silang (Li and Li, 2021).

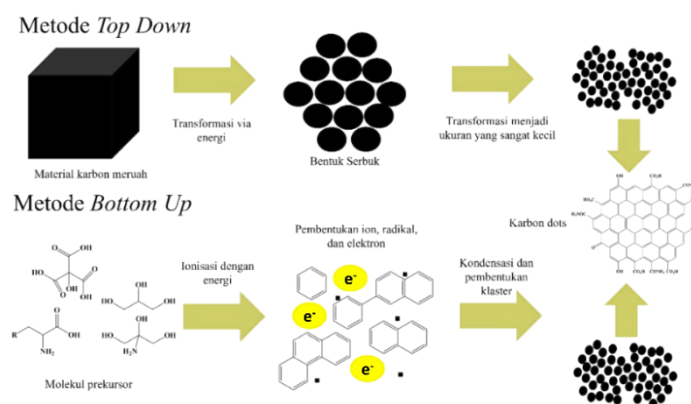


Gambar 1. Diagram Jablonski (Frackowiak, 1988).

Gugus Fungsi C-dots

C-dots merupakan material yang sebagian besar terdiri atas karbon, hidrogen, dan oksigen. Adanya oksidasi parsial dari sumber C-dots yaitu prekursor karbon, gugus karboksil, asam karboksilat, hidroksil, dan eter menghasilkan permukaan C-dots yang kaya akan gugus fungsi. Penambahan agen pasivasi atau doping dapat menambah jenis gugus fungsi dari fosfor ataupun nitrogen. Penentuan gugus fungsi pada C-dots diukur dengan spektrofotometer inframerah transformasi fourier (FTIR). Penentuan gugus fungsi pada C-dots menentukan interaksi C-dots dengan logam atau bahan yang akan dideteksi. Absorpsi C-dots dapat meningkat apabila terjadi pasivasi permukaan seiring dengan penambahan gugus fungsi. Gugus fungsi pada permukaan C-dots akan memengaruhi penyerapan optik karena gugus fungsi yang berbeda akan memiliki daerah serapan yang berbeda pula. Hal ini akan memengaruhi warna serapan UV dari C-dots (Gao *et al.*, 2016; Singh *et al.*, 2018).

C-Dots dari Bahan Alam untuk Deteksi Logam



Gambar 2. Struktur dan proses pembentukan C-dots dengan metode *top down* dan *bottom up*.

C-dots dapat disintesis dengan material awal berupa sumber karbon yang berasal dari bahan alam maupun bahan sintetik. C-dots yang disintesis dari bahan alam memiliki kelebihan berupa ramah lingkungan, biaya yang murah, serta berkontribusi untuk pemanfaatan limbah apabila kelimpahannya tinggi, dan sebagai pengembangan material baru dengan aplikasi yang mutakhir (Zhang *et al.*, 2017). Beberapa C-dots yang berhasil disintesis dari bahan alam ialah, dari kedelai oleh Zhu *et al.* (2012), kulit jeruk oleh Prasannan and Imae (2013), kulit lemon oleh

Tyagi *et al.* (2016), kulit buah naga dan pir oleh Hepriyadi and Isnaeni, (2018), dan material lain yang mengandung karbon. C-dots dapat disintesis dengan metode *top down* dan *bottom up* (Gambar 2).

Metode *top down* adalah metode sintesis karbon nanopartikel dengan pemecahan atau pembelahan dari struktur karbon yang besar melalui pendekatan kimia, fisika, dan elektrokimia. Metode *top down* meliputi *arc-discharge*, *laser ablation*, dan oksidasi elektrokimia (Kala *et al.*, 2016). Metode *bottom up* adalah metode sintesis C-dots dari senyawa prekursor molekular dengan proses sintesis yang sederhana meliputi mikrogelombang, hidrotermal, dan oksidasi (Baker and Baker, 2010). Sintesis C-dots dari bahan alam dengan metode *top down* dilakukan dari sumber karbon yang relatif makroskopis secara langsung seperti buah, sayur, bahan biomassa seperti limbah. Sintesis C-dots dengan metode *bottom up* dilakukan dengan prekursor sebagai material awal ataupun melewati proses untuk menjadi molekul prekursor sebagai material awal sintesis C-dots seperti biopolimer atau biomolekul (Zhang *et al.*, 2017). Kedua metode tersebut dapat digunakan untuk mensintesis C-dots yang berasal dari bahan alam.

Tabel 1. Sintesis C-dots dari bahan alam dengan berbagai metode selama enam tahun terakhir yang digunakan untuk deteksi logam berat.

Metode	Prekursor	Quantum Yield (%)	Limit Deteksi	Referensi	Logam
Hidrotermal	Limbah bawang bombai	28	0,31 μM	(Bandi <i>et al.</i> , 2016)	Fe^{3+}
Hidrotermal	Lobak merah (<i>rose-heart radish</i>)	13,6	0,13 μM	(Liu <i>et al.</i> , 2017b)	Fe^{3+}
Hidrotermal	Bombyx mori silk	61,1	0,38 μM	(Liu <i>et al.</i> , 2017a)	Fe^{3+}
Hidrotermal	Ubi	8,64	0,32 μM	(Shen <i>et al.</i> , 2017)	Fe^{3+}
Hidrotermal	Batang pisang	48	6,4 nM	(Vandarkuzhali <i>et al.</i> , 2017)	Fe^{3+}
Hidrotermal	<i>Rice residue</i>	23,48	0,7462 μM	(Qi <i>et al.</i> , 2019)	Fe^{3+}
Hidrotermal	Bunga <i>osmanthus fragrans</i>	18,53	5 nM	(Wang <i>et al.</i> , 2019)	Fe^{3+}
Hidrotermal	Biji kopi	9,8	15,4 nM	(Zhang <i>et al.</i> , 2019a)	Fe^{3+}
Hidrotermal	Kacang cranberry	10,85	9,55 μM	(Zulfajri <i>et al.</i> , 2019)	Fe^{3+}
Hidrotermal	Kulit pisang	23	0,66 μM	(Atchudan <i>et al.</i> , 2020a)	Fe^{3+}
Hidrotermal	Malus floribunda	18	2,5 μM	(Atchudan <i>et al.</i> , 2020b)	Fe^{3+}
Hidrotermal karbonisasi	Buah aserola	8,64	-	(Carvalho <i>et al.</i> , 2019)	Fe^{3+}
Hidrotermal karbonisasi	<i>Prunus avium</i>	13	0,96 μM	(Edison <i>et al.</i> , 2016)	Fe^{3+}
Karbonisasi pirolisis	Daging buah manggis	-	52 nM	(Yang <i>et al.</i> , 2017)	Fe^{3+}
Pirolisis	Bunga palm	13,97	10 nM	(Murugan and Sundramoorthy, 2018)	Fe^{3+}
Ultrasonikasi	Kacang kedelai	16,7	2,9 μM	(Zhao <i>et al.</i> , 2019)	Fe^{3+}
Oksidasi asam	Buah nanas	18,0; 37,6; 44,7	0,03 μM	(Gupta <i>et al.</i> , 2020)	Fe^{3+}

Tabel 2. Sintesis C-dots dari bahan alam dengan berbagai metode selama enam tahun terakhir yang digunakan untuk deteksi logam berat. (Lanjutan)

Metode	Prekursor	Quantum Yield (%)	Limit Deteksi	Referensi	Logam
Mikro-gelombang	<i>Roasted chickpea</i>	1,8	2,74 μ M	(Başoğlu <i>et al.</i> , 2020)	Fe ³⁺
Hidrotermal	Madu	-	1,02 nM	(Srinivasan <i>et al.</i> , 2016)	Hg ²⁺
Hidrotermal	Limbah <i>barley</i> (jiluh)	14,4	0,48 μ M	(Xie <i>et al.</i> , 2019)	Hg ²⁺
Hidrotermal	Jeruk nipis	31	5,3 nM	(Tadesse <i>et al.</i> , 2020)	Hg ²⁺
Mikro-gelombang	Akar teratai	19	18,7 nM	(Gu <i>et al.</i> , 2016)	Hg ²⁺
Solvotermal	Kulit jagung	6,9	9 nM	(Zhao <i>et al.</i> , 2017)	Hg ²⁺
Oksidasi asam	<i>Musk melon</i>	7,07; 26,9; 14,3	0,33 μ M	(Desai <i>et al.</i> , 2019)	Hg ²⁺
Hidrotermal	<i>Ocimum sanctum</i> (<i>holy basil</i>)	9,3	0,59 nM	(Kumawat <i>et al.</i> , 2017)	Pb ²⁺
Hidrotermal	<i>Lantana camara</i>	33,15	9,64 nM	(Bandi <i>et al.</i> , 2018)	Pb ²⁺
Hidrotermal	Kulit lemon	14	73 nM	(Tyagi <i>et al.</i> , 2016)	Cr ⁶⁺
Hidrotermal	Daun kemangi (<i>tulsi</i> leave)	3,06	4,5 ppb	(Bhatt <i>et al.</i> , 2018)	Cr ⁶⁺
Mikro-gelombang	Bawang daun	18,6	15 nm	(Gu <i>et al.</i> , 2018)	Cd ²⁺
Hidrotermal	<i>Peach gum</i>	28,46	0,064 μ M	(Liao <i>et al.</i> , 2016)	Au ³⁺
Mikro-gelombang	Biji nangka	17,91	239 nM	(Raji <i>et al.</i> , 2019)	Au ³⁺
Hidrotermal	<i>Pyrus pyrifolia</i> (pir asia)	10,8	0,0025 μ M	(Bhamore <i>et al.</i> , 2018)	Al ³⁺
Mikro-gelombang	Buah <i>quince</i>	8,55	-	(Ramezani <i>et al.</i> , 2018)	As ³⁺

Penggunaan prekursor, kondisi reaksi seperti suhu, waktu, pelarut, dan proses pemisahan yang berbeda akan memengaruhi sifat optik, elektrik, dan hidrofilik dari C-dots, sehingga C-dots yang disintesis dengan metode dan kondisi yang berbeda akan memiliki sifat yang bervariasi (Lin *et al.*, 2020). Sintesis C-dots dari bahan alam untuk deteksi ion logam berat telah diteliti sebelumnya dan hasil studi pustaka selama 6 tahun terakhir dirangkum pada Tabel 1.

Interaksi dan Limit Deteksi C-Dots dari Bahan Alam untuk Deteksi Logam

Penggunaan prekursor C-dots yang berasal dari bahan alam biasanya kaya akan gugus fungsi hidroksil dan karbonil yang ada pada permukaan C-dots. Senyawa aktif yang berbeda pada sumber prekursor C-dots berbeda akan memiliki gugus fungsi yang berbeda pula, dan setiap gugus fungsi pada permukaan C-dots akan spesifik interaksinya dengan logam. Tabel 1 menunjukkan beberapa C-dots yang berasal dari sumber hayati untuk deteksi ion Fe³⁺. Mekanisme deteksi logam berat menggunakan C-dots dari seluruh artikel yang direview adalah metode pemadaman (*quenching*). Menurut Gupta *et al.* (2020), mekanisme pemadaman fluoresensi C-dots dari ion Fe³⁺

dipengaruhi oleh gugus fungsi $-\text{COOH}$, $-\text{OH}$, dan $-\text{NH}_2$ yang berasal dari prekursor nanas yang akan berinteraksi kuat dengan cara koordinasi dengan ion Fe^{3+} menjadi nanoagregat ion C-dots- Fe^{3+} . Hal ini akan mengakibatkan perubahan drastis pada morfologi dan ukuran melalui pembentukan kompleks C-dots- Fe^{3+} sehingga intensitas fluoresensinya semakin menurun. Peristiwa ini didukung oleh (Bandi *et al.*, 2016) yang mensintesis C-dots dari sumber hayati kulit bawang bombai. Pada kulit bawang bombai, terdapat gugus fungsi fenolik, hidroksil, dan amina yang akan berkoordinasi dengan Fe^{3+} sehingga intensitas fluoresensinya menurun. C-dots dari kulit bawang bombai juga diuji dengan logam lain untuk melihat selektivitas Fe^{3+} . Ketika masing-masing deretan logam Mn^{2+} , Fe^{2+} , Ca^{2+} , Ba^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{3+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Sn^{2+} , Al^{3+} , Ni^{2+} , Mg^{2+} , Hg^{2+} , Fe^{3+} ditambahkan dengan larutan C-dots secara terpisah pada masing-masing tabung, penurunan intensitas fluoresensi C-dots secara signifikan hanya teramati pada ion Fe^{3+} yang menunjukkan C-dots dari kulit bawang bombai hanya selektif terhadap ion Fe^{3+} .

Hal tersebut membuktikan bahwa jenis gugus fungsi pada permukaan C-dots akan menentukan selektivitas interaksi logam dengan gugus fungsi. Pada Tabel 1, dapat disimpulkan C-dots yang berasal dari sumber hayati limbah bawang bombai, kulit pisang, *rice residue*, *roasted chickpea*, daging buah manggis, buah nanas, buah tomat, dan kacang kedelai semuanya selektif terhadap logam Fe^{3+} . Dengan demikian, C-dots dari bahan-bahan tersebut memiliki jenis gugus fungsi permukaan yang mirip sehingga dapat berinteraksi selektif dengan Fe^{3+} .

C-dots yang berasal dari madu oleh (Srinivasan *et al.*, 2016) hanya selektif terhadap logam Hg^{2+} , sedangkan C-dots dari kulit lemon oleh (Tyagi *et al.*, 2016) selektif terhadap Cr^{6+} , dan hal yang serupa pula untuk C-dots yang selektif terhadap logam Pb^{2+} , Al^{3+} , Au^{3+} , dan As^{3+} (Tabel 2). Peristiwa ini menunjukkan bahwa jenis gugus fungsi yang ada pada permukaan C-dots masing-masing berbeda satu sama lain, dan C-dots akan selektif interaksinya terhadap logam tertentu sesuai dengan jenis gugus fungsi yang ada pada permukaan C-dots. Hal ini didukung oleh (Bhamore *et al.*, 2018) yang mensintesis C-dots dari buah pir asia untuk deteksi selektif ion Al^{3+} .

Tabel 2. Gugus fungsi pada C-dots selektif untuk deteksi logam tertentu.

Deteksi logam	Metode	Prekursor	Gugus Fungsi yang Terdeteksi	Deretan Logam Uji	Referensi
Fe^{3+}	Hidrotermal	Limbah bawang bombai	$-\text{OH}$, $\text{C}-\text{N}$, $\text{C}=\text{O}$, $\text{C}=\text{C}$, $\text{C}-\text{O}$, $\text{C}-\text{C}$, $\text{C}-\text{N}$, $\text{C}-\text{O}$, $-\text{NH}$, $-\text{COOH}$	Na^+ , K^+ , Mn^{2+} , Ba^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} , Sn^{2+} , Cr^{2+} , Al^{3+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , Hg^{2+} , Cd^{2+} , Ca^{2+} , dan Fe^{3+}	(Bandi <i>et al.</i> , 2016)
Fe^{3+}	Oksidasi asam	Buah nanas	$-\text{OH}$, $\text{C}-\text{N}$, $\text{C}=\text{O}$, $\text{C}=\text{C}$, $-\text{NH}$, $-\text{CH}_2$,	Co^{2+} , Cu^{2+} , Al^{3+} , Mn^{2+} , Pb^{2+} , Hg^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{3+} , Fe^{2+} , dan Fe^{3+}	(Gupta <i>et al.</i> , 2020)
Fe^{3+}	Hidrotermal	<i>Lantana camara</i>	$-\text{OH}$, $\text{C}-\text{N}$, $\text{C}=\text{O}$, $\text{C}=\text{C}$, $\text{C}-\text{C}$, $\text{C}-\text{H}$, $\text{C}-\text{O}$, $\text{C}=\text{N}$, $\text{C}-\text{N}-\text{C}$, $\text{N}-\text{H}$, $\text{C}-\text{OH}$, $\text{C}-\text{O}-\text{C}$, NH_2	Na^+ , K^+ , Mn^{2+} , Ba^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} , Sn^{2+} , Cr^{3+} , Al^{3+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , Hg^{2+} , Cd^{2+} , Ca^{2+} , dan Fe^{3+}	(Bandi <i>et al.</i> , 2018)
Hg^{2+}	Hidrotermal	Madu	$\text{C}-\text{O}$, $\text{C}=\text{O}$, $\text{O}-\text{C}-\text{O}$, $\text{N}-\text{C}-\text{O}$, $\text{O}-\text{C}=\text{O}$, $\text{O}-\text{C}-\text{O}$, $\text{O}=\text{C}-\text{N}$, $\text{C}=\text{O}$, $\text{C}-\text{O}$, DNA	Pb^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , Cr^{2+} , Ag^+ , Al^{3+} , Fe^{3+} , Au^{3+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , dan Hg^{2+}	(Srinivasan <i>et al.</i> , 2016)
Cr^{6+}	Hidrotermal	Kulit lemon	$-\text{COOH}$, $-\text{OH}$, $-\text{COO}^-$, $\text{C}=\text{O}$, $\text{C}-\text{H}$, $\text{C}=\text{C}$, $\text{C}-\text{C}$, $\text{C}-\text{H}$, $\text{C}-\text{OH}$, $\text{C}-\text{O}-\text{C}$, $\text{C}=\text{O}$, $-\text{COOH}$, $\text{C}-\text{OH}$, $\text{C}-\text{O}-\text{C}$, $\text{C}=\text{O}$, $-\text{COOH}$	Ni^{2+} , Cd^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} , Co^{2+} , Ba^{2+} , dan Cr^{6+}	(Tyagi <i>et al.</i> , 2016)
Al^{3+}	Hidrotermal	<i>Pyrus pyrifolia</i> (pir asia)	$\text{C}-\text{H}$, $\text{C}=\text{O}$, $\text{N}-\text{H}$, $\text{C}-\text{H}$ cincin aromatik, $\text{C}-\text{O}$, $\text{C}-\text{H}$	Hg^{2+} , Ni^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , Ba^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{3+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{3+} , dan Al^{3+}	(Bhamore <i>et al.</i> , 2018)

Mekanisme deteksi logam yang terjadi ialah koordinasi gugus fungsi $-\text{CO}$, CHO , $-\text{COOH}$, dan $-\text{NH}_2$ dengan ion Al^{3+} membentuk kompleks C-dots- Al^{3+} sehingga intensitas fluoresensinya berubah. Peristiwa ini menunjukkan

gugus fungsi pada C-dots untuk deteksi Fe^{3+} berbeda dengan Al^{3+} yang menunjukkan C-dots memiliki interaksi yang spesifik dengan setiap logam. Namun demikian, dari semua artikel yang direview tidak ada yang menyatakan gugus fungsi yang bekerja spesifik untuk mendeteksi logam tertentu, sehingga kesimpulan sementara yang dapat diambil adalah bahwa selektivitas C-dots terhadap logam tergantung pada variasi gugus fungsi di permukaannya.

Peristiwa tersebut dapat dihubungkan dengan sifat reaksi kompleks yang berbasis teori asam basa keras dan lunak. Mekanisme yang terjadi pada interaksi C-dots dan logam merupakan reaksi pengompleksan. Reaksi kompleks merupakan molekul yang terbentuk akibat adanya reaksi antara ion logam dengan ligan. Ion logam yang keras (asam keras) merupakan logam yang kecil dan tidak mudah terpolarisasi sehingga cenderung lebih menyukai ligan basa lunak seperti oksigen dan nitrogen yang merupakan ligan atom donor elektronegatif. Ion logam yang lunak (asam lunak) memiliki ukuran yang besar dan mudah terpolarisasi sehingga cenderung lebih menyukai ligan sulfur yang berupa basa lunak. Kompleks yang stabil terbentuk dari reaksi asam keras dengan basa keras/ asam lunak dengan basa lunak. Reaksi pengompleksan logam Al^{3+} , Fe^{3+} , Cr^{6+} yang berupa ion logam keras akan cenderung berinteraksi dengan ligan basa keras seperti oksigen dan nitrogen. Reaksi pengompleksan Hg^{2+} yang berupa logam lunak akan berinteraksi kuat dengan sulfur dan fosfor dan sedikit berinteraksi dengan nitrogen dan oksigen (Cammack and Hughes, 2007).

Sifat dan karakteristik C-dots akan memengaruhi sensitivitas, reproduksibilitas, dan limit deteksi pada aplikasi sebagai sensor untuk logam berat. Beberapa parameter yang memengaruhi sifat dan karakteristik C-dots, yaitu *Quantum Yield* (QY) fluoresensi, intensitas fluoresensi, ukuran, koefisien molar absorpsi, dan *lifetime* fluoresensi. C-dots yang efektif untuk menjadi sensor logam berat, yaitu yang memiliki koefisien absorpsi molar, intensitas fluoresensi dan QY yang tinggi. Keadaan gugus fungsi pada permukaan dari C-dots yang stabil akan meningkatkan interaksi antara C-dots dan logam target yang akan dideteksi. Karakteristik optik yang sangat bermanfaat untuk aplikasi sebagai deteksi logam berat yaitu sifat luminesens dari C-dots. C-dots dengan intensitas fluoresensi yang baik akan mendeteksi ion logam berat lebih maksimal (Li and Li, 2021).

Karbon dots dapat mendeteksi logam berat dengan selektivitas, sensitivitas, dan akurasi yang baik. Sifat yang sangat menentukan untuk C-dots sebagai deteksi logam berat yaitu limit deteksi dan fluoresensi dari C-dots. C-dots dengan limit deteksi dan fluoresensi yang baik akan berinteraksi dengan logam lebih mudah sehingga sensitivitas dari C-dots sebagai sensor semakin meningkat. Terdapat dua mekanisme dari C-dots untuk deteksi logam, yaitu *quench* (pemadaman atau *turn off*) atau *enhance* (peningkatan atau *turn on*). Mekanisme *quenching* pada C-dots terbagi menjadi dua, yaitu statis dan dinamis. Pada proses *quenching* statis molekul membentuk kompleks pada keadaan dasar melalui interaksi antara C-dots dan logam sebelum eksitasi terjadi. Proses *quenching* dinamis terjadi ketika keadaan tereksitasi kembali ke keadaan dasar akibat adanya tumbukan antara C-dots dengan logam karena transfer muatan (Li and Li, 2021).

Beberapa penelitian telah dilakukan terkait C-dots yang digunakan untuk deteksi logam. Penelitian C-dots yang disintesis dari daun bawang oleh (Gu *et al.*, 2018) ditambahkan agen pasivasi nitrogen dan sulfur. Agen pasivasi heteroatom dapat memfungsionalisasi permukaan dari C-dots untuk pengaplikasian yang lebih baik dengan mengontrol sifat fotoluminesensnya. Nitrogen dan sulfur digunakan untuk mempertahankan gugus S dan N pada permukaan C-dots karena pada daun bawang banyak mengandung karbon, nitrogen, oksigen, dan sulfur. Penambahan heteroatom dilakukan untuk meningkatkan *quantum yields* dari C-dots dan menyediakan situs untuk interaksi antara C-dots dengan target (logam). Nitrogen akan membantu pemberian ukuran atom yang sebanding dengan karbon dan fosfor dapat membentuk pengaruh pertukaran *defect* (cacat) pada ikatan sp^3 yang berperan sebagai donor *n-type*. Nitrogen dan fosfor akan mengubah karakteristik elektronik dari C-dots sehingga aplikasi dari C-dots lebih efektif.

Metode Sintesis C-dots

Sintesis C-dots yang berasal dari sumber hayati dapat dilakukan dengan beberapa metode (Tabel 1). Metode hidrotermal merupakan metode yang paling banyak digunakan para peneliti untuk mensintesis C-dots secara *bottom up*. Metode ini memiliki kelebihan, yaitu ramah lingkungan, biaya yang murah, tidak beracun, tahap penyiapan yang sederhana dengan penggunaan pelarut air pada kondisi suhu dan tekanan tinggi (Hernawati *et al.*, 2018; Tyagi *et al.*, 2016). C-dots yang disintesis dari kulit pisang oleh (Atchudan *et al.*, 2020a) didapatkan distribusi ukuran diameter C-dots 4 nm dengan panjang gelombang maksimum emisi 445 nm yang berwarna biru dan berhasil selektif mendeteksi Fe^{3+} dengan limit deteksi $0.66 \mu\text{M}$. Sintesis C-dots dari kulit buah dengan metode hidrotermal menghasilkan C-dots dengan karakterisasi ukuran dan sifat fotoluminesens yang baik. Sintesis C-dots oleh Tyagi *et al.* (2016) dari kulit lemon menghasilkan distribusi ukuran diameter C-dots yang baik, yaitu 1 – 3

nm dengan panjang gelombang emisi yang bervariasi dari 488 nm hingga 605 nm dengan warna hijau dan merah. Agen pasivasi yang digunakan ialah asam sulfat dan natrium hipoklorit. C-dots yang dihasilkan dapat selektif mendeteksi Cr^{6+} dengan limit deteksi 73 nM (Tabel 1).

Salah satu metode *bottom up* lain yang banyak digunakan yaitu metode mikrogelombang. Metode ini memiliki kelebihan ramah lingkungan, membutuhkan waktu yang lebih sedikit, dan dapat mengubah suhu secara *real-time* dengan menyesuaikan daya sehingga dapat menghemat energi (Jahdaly *et al.*, 2021). Penggunaan metode mikrogelombang pada sintesis C-dots banyak digunakan dari bahan alam seperti biji nangka oleh Raji *et al.* (2019), akar teratai oleh Gu *et al.* (2016), dan beberapa bahan alam lainnya. Sintesis C-dots dari akar teratai oleh Gu *et al.* (2016) menghasilkan ukuran diameter C-dots sebesar 9,41 nm. C-dots ini berhasil mendeteksi Hg^{2+} dengan limit deteksi 18,7 nm secara selektif. Sintesis C-dots dari biji nangka oleh (Raji *et al.*, 2019) menghasilkan C-dots dengan ukuran 3 – 7 nm dengan panjang gelombang emisi 437 nm dengan warna fotoluminesens biru dengan limit deteksi Au^{3+} sebesar 239 nm (Tabel 1).

Sintesis C-dots dengan metode oksidasi asam dilakukan dengan menambahkan pereaksi asam untuk reaksi oksidasi dalam sintesis C-dots. (Desai *et al.*, 2019) mensintesis C-dots dari buah melon dengan metode oksidasi asam, yaitu penambahan pereaksi asam sulfat dan asam fosfat menghasilkan C-dots dengan ukuran 3,5 – 5,8 nm dan panjang gelombang emisi 432 – 554 nm dengan variasi warna fotoluminesens biru, hijau, dan kuning. C-dots dari buah melon berhasil mendeteksi Hg^{2+} secara selektif dengan limit deteksi 0,33 μm . Sintesis C-dots dengan metode ultrasonikasi dilakukan dengan pemecahan karbon besar menggunakan energi yang tinggi dari gelombang suara ultrasonik (Sharma and Das, 2019). Sintesis dengan metode ini memiliki kelebihan mudah dan menghasilkan fluoresensi yang bagus namun cenderung menghasilkan *quantum yield* yang rendah (Singh *et al.*, 2018).

Sintesis C-dots dengan metode *top down* dari bahan alam kacang kedelai berhasil disintesis dengan metode ultrasonikasi oleh (Zhao *et al.*, 2019) untuk mendeteksi ion Fe^{3+} . Ukuran rerata C-dots yang didapatkan sebesar 2,4 nm dengan panjang gelombang maksimum emisi, yaitu 445 nm dengan warna fluoresensi biru dengan limit deteksi 2,9 μm (Tabel 1). Metode ultrasonikasi meliputi material karbon yang besar dipecahkan dengan diberikan gelombang suara ultrasonik dengan energi yang sangat tinggi (Sharma and Das, 2019; Singh *et al.*, 2018).

Pengaruh Metode Sintesis C-dots

Pengaruh metode sintesis dengan hasil C-dots disajikan pada Tabel 3. C-dots disintesis dari bahan hayati berupa daun rambutan dan daun pandan menggunakan dua metode yaitu hidrotermal dan mikrogelombang. Jenis gugus fungsi yang dihasilkan dari C-dots daun pandan dan daun rambutan serupa yaitu gugus amina, hidroksil, dan juga karbonil dan berhasil mendeteksi ion logam Cu^{2+} dengan limit deteksi yang rendah. Berdasarkan *quantum yield* yang dihasilkan, C-dots yang disintesis dengan metode hidrotermal cenderung menghasilkan *quantum yield* yang lebih tinggi dibandingkan dengan mikrogelombang pada C-dots daun pandan dan daun rambutan (Tabel 3).

Tabel 3. Pengaruh metode sintesis C-dots dari daun rambutan dan daun pandan terhadap C-dots untuk deteksi Cu^{2+} (Kasmiarno *et al.*, 2021).

Prekursor C-dots	Metode	Limit deteksi (μM)	Quantum yield (%)	Gugus fungsi
Daun Rambutan	Mikrogelombang	189,52	1,01	–OH, N–H, C=O
	Hidrotermal	123,67	2,7	
Daun Pandan	Mikrogelombang	233,164	0,99	–OH, N–H, C=O
	Hidrotermal	282,898	2,79	

Hasil dari penentuan intensitas fluoresensi dari C-dots yang diuji, terlihat C-dots yang disintesis dengan metode hidrotermal lebih tinggi dibandingkan mikrogelombang (Kasmiarno *et al.*, 2021). C-dots yang disintesis dengan metode hidrotermal cenderung menghasilkan C-dots dengan intensitas fluoresensi dan *quantum yield* yang lebih tinggi (Tabel 1). Metode hidrotermal cenderung menghasilkan C-dots yang baik karena menggunakan suhu dan tekanan yang tinggi ditambah dengan kehilangan jumlah material (produk) yang minimal. Metode ini dapat mengontrol nanomaterial yang akan disintesis dengan baik melalui reaksi kimia pada fase cairan atau multifase (Gan *et al.*, 2020).

KESIMPULAN

C-dots yang berasal dari sumber hayati berpotensi sebagai bahan deteksi ion logam berat dikarenakan akan memperkaya gugus fungsi yang ada pada permukaan C-dots. Gugus fungsi pada permukaan C-dots bertindak sebagai agen fungsionalisasi yang akan berinteraksi dengan logam yang akibatnya akan memengaruhi intensitas fluoresensi dari C-dots. Setiap logam memiliki interaksi yang spesifik dengan gugus fungsi pada permukaan C-dots. Ion logam keras akan berinteraksi dengan ligan pada C-dots yang keras sedangkan ion logam lunak akan berinteraksi kuat dengan ligan pada C-dots yang lunak pula. Sintesis C-dots dengan metode hidrotermal cenderung menunjukkan hasil yang lebih baik pada parameter *quantum yield* dan intensitas fluoresensi. Hal ini akan mengarah pada peningkatan kemampuan C-dots dari bahan alam sebagai bahan deteksi logam berat.

KONFLIK KEPENTINGAN

Tidak ada konflik kepentingan dalam artikel ini.

KONTRIBUSI PENULIS

CNR: Metodologi, Pengumpulan Data, Analisis Data, Penulisan Draf Manuskrip; SS: Konseptualisasi, Metodologi, Analisis Data, Supervisi, Telaah dan Penyuntingan Manuskrip; ADY: Pengumpulan Data.

DAFTAR PUSTAKA

- Aji, M.P., Sholikhah, L., Silmi, F.I., Permatasari, H.A., Rahmawati, I., Priyanto, A., and Nuryadin, B.W., 2020. Carbon Dots from Dragonfruit Peels as Growth-Enhancer on Ipomoea Aquatica Vegetable Cultivation. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 11, 035005. <https://doi.org/10.1088/2043-6254/ab9d15>.
- Atchudan, R., Edison, T.N.J.I., Perumal, S., Muthuchamy, N., and Lee, Y.R., 2020a. Hydrophilic Nitrogen-Doped Carbon Dots from Biowaste Using Dwarf Banana Peel for Environmental and Biological Applications. *Fuel*, 275, 117821. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117821>.
- Atchudan, R., Edison, T.N.J.I., Perumal, S., Muthuchamy, N., and Lee, Y.R., 2020b. Eco-Friendly Synthesis of Tunable Fluorescent Carbon Nanodots from Malus Floribunda for Sensors and Multicolor Bioimaging. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 390. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.112336>.
- Baker, S.N., and Baker, G.A., 2010. Luminescent Carbon Nanodots: Emergent Nanolights. *Angewandte Chemie - International Edition*, 49, 6726–6744. <https://doi.org/10.1002/anie.200906623>.
- Bandi, R., Dadigala, R., Gangapuram, B.R., and Guttena, V., 2018. Green Synthesis of Highly Fluorescent Nitrogen – Doped Carbon Dots from Lantana Camara Berries for Effective Detection of Lead(II) and Bioimaging. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 178, 330–338. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2017.11.010>.
- Bandi, R., Gangapuram, B.R., Dadigala, R., Eslavath, R., Singh, S.S., and Guttena, V., 2016. Facile and Green Synthesis of Fluorescent Carbon Dots from Onion Waste and Their Potential Applications as Sensor and Multicolour Imaging Agents. *RSC Advances*, 6, 28633–28639. <https://doi.org/10.1039/c6ra01669c>.
- Başoğlu, A., Ocak, Ü., and Gümrükçüoğlu, A., 2020. Synthesis of Microwave-Assisted Fluorescence Carbon Quantum Dots Using Roasted–Chickpeas and Its Applications for Sensitive and Selective Detection of Fe³⁺ Ions. *Journal of Fluorescence*, 30, 515–526. <https://doi.org/10.1007/s10895-019-02428-7>.
- Bhamore, J.R., Jha, S., Singhal, R.K., Park, T.J., and Kailasa, S.K., 2018. Facile Green Synthesis of Carbon Dots from Pyrus Pyrifolia Fruit for Assaying of Al³⁺ Ion via Chelation Enhanced Fluorescence Mechanism. *Journal of Molecular Liquids*, 264, 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.05.041>.
- Bhatt, S., Bhatt, M., Kumar, A., Vyas, G., Gajaria, T., and Paul, P., 2018. Green Route for Synthesis of Multifunctional Fluorescent Carbon Dots from Tulsi Leaves and Its Application as Cr(VI) Sensors, Bio-Imaging and Patterning Agents. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 167, 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2018.04.008>.
- Cammack, R., and Hughes, M.N., 2007. Considerations for the Specification of Enzyme Assays Involving Metal Ions Enzyme Assays Involving Metal Ions. *Essec*, 93–108.
- Carvalho, J., Santos, L.R., Germino, J.C., Terezo, A.J., Moreto, J.A., Quides, F.J., and Freitas, R.G., 2019. Hydrothermal Synthesis to Water-Stable Luminescent Carbon Dots from Acerola Fruit for Photoluminescent Composites Preparation and Its Application as Sensors. *Materials Research*, 22. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0920>.

- Das, R., Bandyopadhyay, R., and Pramanik, P., 2018. Carbon Quantum Dots from Natural Resource: A Review. *Materials Today Chemistry*, 8, 96–109. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2018.03.003>.
- Desai, M.L., Jha, S., Basu, H., Singhal, R.K., Park, T.J., and Kailasa, S.K., 2019. Acid Oxidation of Muskmelon Fruit for the Fabrication of Carbon Dots with Specific Emission Colors for Recognition of Hg²⁺ Ions and Cell Imaging. *ACS Omega*, 4, 19332–19340. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02730>.
- Edison, T.N.J.I., Atchudan, R., Shim, J.J., Kalimuthu, S., Ahn, B.C., and Lee, Y.R., 2016. Turn-off Fluorescence Sensor for the Detection of Ferric Ion in Water Using Green Synthesized N-Doped Carbon Dots and Its Bio-Imaging. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 158, 235–242. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016.03.010>.
- Frackowiak, D., 1988. The Jablonski Diagram. *Journal of Photochemistry and Photobiology, B: Biology*, 2 (1988), 399–408. [https://doi.org/10.1016/1011-1344\(88\)85060-7](https://doi.org/10.1016/1011-1344(88)85060-7).
- Gan, Y.X., Jayatissa, A.H., Yu, Z., Chen, X., and Li, M., 2020. Hydrothermal Synthesis of Nanomaterials. *Journal of Nanomaterials*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8917013>.
- Gao, X., Du, C., Zhuang, Z., and Chen, W., 2016. Carbon Quantum Dot-Based Nanoprobes for Metal Ion Detection. *Journal of Materials Chemistry C*, 4, 6927–6945. <https://doi.org/10.1039/C6TC02055K>.
- Gayen, B., Palchoudhury, S., and Chowdhury, J., 2019. Carbon Dots: A Mystic Star in the World of Nanoscience. *Journal of Nanomaterials*, 1. <https://doi.org/10.1155/2019/3451307>.
- Gu, D., Hong, L., Zhang, L., Liu, H., and Shang, S., 2018. Nitrogen and Sulfur Co-Doped Highly Luminescent Carbon Dots for Sensitive Detection of Cd (II) Ions and Living Cell Imaging Applications. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 186, 144–151. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2018.07.012>.
- Gu, D., Shang, S., Yu, Q., and Shen, J., 2016. Green Synthesis of Nitrogen-Doped Carbon Dots from Lotus Root for Hg(II) Ions Detection and Cell Imaging. *Applied Surface Science*, 390, 38–42. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.08.012>.
- Gupta, D.A., Desai, M.L., Malek, N.I., and Kailasa, S.K., 2020. Fluorescence Detection of Fe³⁺ Ion Using Ultra-Small Fluorescent Carbon Dots Derived from Pineapple (Ananas Comosus): Development of Miniaturized Analytical Method. *Journal of Molecular Structure*, 1216, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.128343>.
- Hepriyadi, S.U., and Isnaeni, 2018. Synthesis and Optical Characterization of Carbon Dot from Peels of Dragon Fruit and Pear. *Omega: Jurnal Fisika dan Pendidikan Fisika*, 4, 19. <https://doi.org/10.31758/omegajphysphiseduc.v4i1.19>.
- Hernawati, Setiawan, N.A., Shintawati, R., and Priyandoko, D., 2018. The Role of Red Dragon Fruit Peel (Hylocereus Polyrhizus) to Improvement Blood Lipid Levels of Hyperlipidaemia Male Mice. *Journal of Physics: Conference Series*, 1013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1013/1/012167>.
- Hu, C., Yu, C., Li, M., Wang, X., Yang, J., Zhao, Z., Eychmüller, A., Sun, Y.P., and Qiu, J., 2014. Chemically Tailoring Coal to Fluorescent Carbon Dots with Tuned Size and Their Capacity for Cu(II) Detection. *Small*, 10, 4926–4933. <https://doi.org/10.1002/sml.201401328>.
- Iravani, S., and Varma, R.S., 2020. Green Synthesis, Biomedical and Biotechnological Applications of Carbon and Graphene Quantum Dots. A Review. *Environmental Chemistry Letters*, 18, 703–727. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00984-0>.
- Istarani, F., and Pandebesie, E.S. 2014. Studi Dampak Arsen (As) Dan Kadmium (Cd). *Jurnal Teknik POMITS*, 3, 1–6.
- Jahdaly, B.A. Al, Elsadek, M.F., Ahmed, B.M., Farahat, M.F., Taher, M.M., and Khalil, A.M., 2021. Outstanding Graphene Quantum Dots from Carbon Source for Biomedical and Corrosion Inhibition Applications: A Review. *Sustainability (Switzerland)*, 13, 1–33. <https://doi.org/10.3390/su13042127>.
- Jelinek, R. 2017. Carbon Quantum Dots. Synthesis, Properties and Applications, 1st ed. Springer International Publishing.
- Kala, D., Jolly, C.M., and Athiramol, P.S., 2016. Green Fluorescent Carbon Dots: A Novel Drug Targeting and Cell Imaging Agent. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 7, 3163. [https://doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.7\(8\).3163-72](https://doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.7(8).3163-72).
- Kasmiarno, L.D., Fikarda, A., Sambudi, N.S., and Gunawan, R.K., 2021. Carbon Quantum Dots (CQDs) from Rambutan and Pandan Leaves for Cu²⁺ Detection. *Waste Technology*, 9, 1–10.
- Kumawat, M.K., Thakur, M., Gurung, R.B., and Srivastava, R., 2017. Graphene Quantum Dots for Cell Proliferation, Nucleus Imaging, and Photoluminescent Sensing Applications. *Scientific Reports*, 7, 1–16.

<https://doi.org/10.1038/s41598-017-16025-w>.

- Li, H., Kang, Z., Liu, Y., and Lee, S.T., 2012. Carbon Nanodots: Synthesis, Properties and Applications. *Journal of Materials Chemistry*, 22, 24230–24253. <https://doi.org/10.1039/c2jm34690g>.
- Li, P., and Li, S.F.Y., 2021. Recent Advances in Fluorescence Probes Based on Carbon Dots for Sensing and Speciation of Heavy Metals. *Nanophotonics*, 10, 877–908. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2020-0507>
- Liao, J., Cheng, Z., and Zhou, L., 2016. Nitrogen-Doping Enhanced Fluorescent Carbon Dots: Green Synthesis and Their Applications for Bioimaging and Label-Free Detection of Au³⁺ Ions. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 4, 3053–3061. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b00018>.
- Liaotrakoon, W., 2013. Characterization of Dragon fruit (*Hylocereus* spp.) Components with Valorization Potential. Ghent(BE): Ghent University.
- Lin, X., Xiong, M., Zhang, J., He, C., Ma, X., Lin, X., Xiong, M., Zhang, J., He, C., Ma, X., Zhang, H., and Kuang, Y., 2020. Carbon Dots Based on Natural Resources : Synthesis and Applications in Sensors. *Microchemical Journal*, 105604. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.105604>.
- Liu, H., Zhang, Y., Liu, J.H., Hou, P., Zhou, J., and Huang, C.Z., 2017a. Preparation of Nitrogen-Doped Carbon Dots with High Quantum Yield from: Bombyx Mori Silk for Fe(III) Ions Detection. *RSC Advances*, 7, 50584–50590. <https://doi.org/10.1039/c7ra10130a>.
- Liu, M.L., Chen, B. Bin, Li, C.M., and Huang, C.Z., 2019. Carbon Dots: Synthesis, Formation Mechanism, Fluorescence Origin and Sensing Applications. *Green Chemistry*, 21, 449–471. <https://doi.org/10.1039/c8gc02736f>.
- Liu, W., Diao, H., Chang, H., Wang, H., Li, T., and Wei, W., 2017b. Green Synthesis of Carbon Dots from Rose-Heart Radish and Application for Fe³⁺ Detection and Cell Imaging. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 241, 190–198. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.10.068>.
- Murugan, N., and Sundramoorthy, A.K., 2018. Green Synthesis of Fluorescent Carbon Dots from Borassus Flabellifer Flowers for Label-Free Highly Selective and Sensitive Detection of Fe³⁺ Ions. *New Journal of Chemistry*, 42, 13297–13307. <https://doi.org/10.1039/c8nj01894d>.
- Prasannan, A., and Imae, T., 2013. One-Pot Synthesis of Fluorescent Carbon Dots from Orange Waste Peels. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52, 15673–15678. <https://doi.org/10.1021/ie402421s>.
- Qi, H., Teng, M., Liu, M., Liu, S., Li, J., Yu, H., Teng, C., Huang, Z., Liu, H., Shao, Q., Umar, A., Ding, T., Gao, Q., and Guo, Z., 2019. Biomass-Derived Nitrogen-Doped Carbon Quantum Dots: Highly Selective Fluorescent Probe for Detecting Fe³⁺ Ions and Tetracyclines. *Journal of Colloid and Interface Science*, 539, 332–341. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.12.047>.
- Qu, S., Wang, X., Lu, Q., Liu, X., and Wang, L., 2012. A Biocompatible Fluorescent Ink Based on Water-Soluble Luminescent Carbon Nanodots. *Angewandte Chemie - International Edition*, 51, 12215–12218. <https://doi.org/10.1002/anie.201206791>.
- Raji, K., Ramanan, V., and Ramamurthy, P., 2019. Facile and Green Synthesis of Highly Fluorescent Nitrogen-Doped Carbon Dots from Jackfruit Seeds and Its Applications towards the Fluorimetric Detection of Au³⁺ Ions in Aqueous Medium and in: In Vitro Multicolor Cell Imaging. *New Journal of Chemistry*, 43, 11710–11719. <https://doi.org/10.1039/c9nj02590a>.
- Ramezani, Z., Qorbanpour, M., and Rahbar, N., 2018. Green Synthesis of Carbon Quantum Dots Using Quince Fruit (*Cydonia Oblonga*) Powder as Carbon Precursor: Application in Cell Imaging and As³⁺ Determination. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 549, 58–66. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.04.006>.
- Sharma, A., and Das, J., 2019. Small Molecules Derived Carbon Dots: Synthesis and Applications in Sensing, Catalysis, Imaging, and Biomedicine. *Journal of Nanobiotechnology*, 17, 1–24. <https://doi.org/10.1186/s12951-019-0525-8>.
- Shen, J., Shang, S., Chen, X., Wang, D., and Cai, Y., 2017. Facile Synthesis of Fluorescence Carbon Dots from Sweet Potato for Fe³⁺ Sensing and Cell Imaging. *Materials Science and Engineering C*, 76, 856–864. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.03.178>.
- Singh, I., Arora, R., Dhiman, H., and Pahwa, R., 2018. Carbon Quantum Dots: Synthesis, Characterization and Biomedical Applications. *Turkish Journal of Pharmaceutical Sciences*, 15, 219–230. <https://doi.org/10.4274/tjps.63497>.
- Srinivasan, K., Subramanian, K., Murugan, K., and Dinakaran, K., 2016. Sensitive Fluorescence Detection of Mercury(II) in Aqueous Solution by the Fluorescence Quenching Effect of MoS₂ with DNA Functionalized Carbon Dots. *Analyst*, 141, 6344–6352. <https://doi.org/10.1039/c6an00879h>.

- Tadesse, A., Hagos, M., Ramadevi, D., Basavaiah, K., and Belachew, N., 2020. Fluorescent-Nitrogen-Doped Carbon Quantum Dots Derived from Citrus Lemon Juice: Green Synthesis, Mercury(II) Ion Sensing, and Live Cell Imaging. *ACS Omega*, 5, 3889–3898. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03175>.
- Tyagi, A., Tripathi, K.M., Singh, N., Choudhary, S., and Gupta, R.K., 2016. Green Synthesis of Carbon Quantum Dots from Lemon Peel Waste: Applications in Sensing and Photocatalysis. *RSC Advances*, 6, 72423–72432. <https://doi.org/10.1039/c6ra10488f>.
- Vandarkuzhali, S.A.A., Jeyalakshmi, V., Sivaraman, G., Singaravadevel, S., Krishnamurthy, K.R., and Viswanathan, B., 2017. Highly Fluorescent Carbon Dots from Pseudo-Stem of Banana Plant: Applications as Nanosensor and Bio-Imaging Agents. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 252, 894–900. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.06.088>.
- Wang, M., Wan, Y., Zhang, K., Fu, Q., Wang, L., Zeng, J., Xia, Z., and Gao, D., 2019. Green Synthesis of Carbon Dots Using the Flowers of *Osmanthus Fragrans* (Thunb.) Lour. as Precursors: Application in Fe³⁺ and Ascorbic Acid Determination and Cell Imaging. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, <https://doi.org/10.1007/s00216-019-01712-6>.
- Xie, Y., Cheng, D., Liu, X., and Han, A., 2019. Green Hydrothermal Synthesis of N-Doped Carbon Dots from Biomass Highland Barley for the Detection of Hg²⁺. *Sensors (Switzerland)*, 19. <https://doi.org/10.3390/s19143169>.
- Yang, R., Guo, X., Jia, L., Zhang, Y., Zhao, Z., and Lonshakov, F., 2017. Green Preparation of Carbon Dots with Mangosteen Pulp for the Selective Detection of Fe³⁺ Ions and Cell Imaging. *Applied Surface Science*, 423, 426–432. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.05.252>.
- Zhang, W., Jia, L., Guo, X., Yang, R., Zhang, Y., and Zhao, Z., 2019a. Green Synthesis of Up- and down-Conversion Photoluminescent Carbon Dots from Coffee Beans for Fe³⁺ Detection and Cell Imaging. *Analyst*, 144, 7421–7431. <https://doi.org/10.1039/c9an01953g>.
- Zhang, X., Jiang, M., Niu, N., Chen, Z., Liu, S., and Li, J., 2017. Review of Natural Product-derived Carbon Dots: From Natural Products to Functional Materials. *ChemSusChem*, 11, 11–24. <https://doi.org/10.1002/cssc.201701847>.
- Zhang, Y., Xiao, J., Zhuo, P., Yin, H., Fan, Y., Liu, X., and Chen, Z., 2019b. Carbon Dots Exhibiting Concentration-Dependent Full-Visible-Spectrum Emission for Light-Emitting Diode Applications. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 11, 46054–46061. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b14472>.
- Zhao, J., Huang, M., Zhang, L., Zou, M., Chen, D., Huang, Y., and Zhao, S., 2017. Unique Approach to Develop Carbon Dot-Based Nanohybrid Near-Infrared Ratiometric Fluorescent Sensor for the Detection of Mercury Ions. *Analytical Chemistry*, 89, 8044–8049. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.7b01443>.
- Zhao, W.B., Liu, K.K., Song, S.Y., Zhou, R., and Shan, C.X., 2019. Fluorescent Nano-Biomass Dots: Ultrasonic-Assisted Extraction and Their Application as Nanoprobe for Fe³⁺ Detection. *Nanoscale Research Letters*, 14. <https://doi.org/10.1186/s11671-019-2950-x>.
- Zhu, C., Zhai, J., and Dong, S., 2012. Bifunctional Fluorescent Carbon Nanodots: Green Synthesis via Soy Milk and Application as Metal-Free Electrocatalysts for Oxygen Reduction. *Chemical Communications*, 48, 9367–9369. <https://doi.org/10.1039/c2cc33844k>.
- Zulfajri, M., Gedda, G., Chang, C.J., Chang, Y.P. and Huang, G.G., 2019. Cranberry Beans Derived Carbon Dots as a Potential Fluorescence Sensor for Selective Detection of Fe³⁺ Ions in Aqueous Solution. *ACS Omega*, 4, 15382–15392. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b01333>.