



SINTESIS DAN KARAKTERISASI *CARBON DOTS* TERDOPING NITROGEN DARI DAUN JAMBU BIJI (*Psidium guajava* L.) UNTUK DETEKSI FE(III)
SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF NITROGEN-DOPED CARBON DOTS DERIVED FROM GUAVA LEAF (*Psidium guajava* L.) EXTRACT FOR FE(III) DETECTION

Fauza Vita Harira Dzahaba¹, Mohammad Alauhdin^{1*}

¹Department of Chemistry, Universitas Negeri Semarang, Semarang 50229, Indonesia

*email: m.alauhdin@mail.unnes.ac.id

Phone contact: +6282143964242

DOI: <https://doi.org/10.26418/indonesian.v9i2.105105>

ARTICLE INFO

Article history:

Received 19 February 2026

Accepted 30 March 2026

Available online
11 August 2026

Keywords:

carbon dots, guava leaves (*Psidium guajava* L.), metal ion detection, pyrolysis



©2026 Author(s). This is an open-access article under the CC-BY license

ABSTRACT

This study aimed to synthesize and characterize nitrogen-doped carbon dots (C-dots) derived from guava leaves (*Psidium guajava* L.) and evaluate their potential as a fluorescent sensor for Fe(III) detection. Nitrogen-doped C-dots were synthesized via pyrolysis at different temperatures using urea as the nitrogen dopant. The synthesized C-dots were characterized for their optical properties, surface functional groups, particle size distribution, and fluorescence under 365 nm UV irradiation. The results confirmed the successful formation of nanoscale C-dots bearing hydroxyl (–OH), carboxyl (–COOH), and amino (–NH) functional groups that contribute to their fluorescence properties. The synthesis temperature significantly affected the optical characteristics and fluorescence intensity of the C-dots, with the sample prepared at 250 °C exhibiting the highest fluorescence intensity and a strong blue emission. Fluorescence sensing experiments demonstrated that Fe(III) induced greater fluorescence quenching than the other tested metal ions, indicating good selectivity toward Fe(III). These findings demonstrate that nitrogen-doped guava leaf-derived C-dots are promising as a simple, environmentally friendly, and cost-effective fluorescent sensors for Fe(III) detection in aqueous samples.

1. Pendahuluan

Kontaminasi ion logam berat telah menjadi perhatian penting karena dapat menyebabkan pencemaran lingkungan dan efek kumulatif yang berbahaya bagi kesehatan manusia^[1]. Logam berat, seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), merkuri (Hg), dan arsenik (As) dapat terakumulasi dalam organ vital seperti hati, ginjal, dan otot, sehingga menyebabkan berbagai dampak toksik, termasuk disfungsi organ, kerusakan neurologis, dan peningkatan risiko penyakit kronis^[2].

Deteksi dan pemantauan logam berat umumnya dilakukan menggunakan teknik instrumentasi laboratorium, seperti *Atomic Absorption Spectrometry* (AAS) dan *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (ICP-MS). Metode tersebut banyak digunakan sebagai metode rujukan utama karena memiliki sensitivitas dan akurasi yang tinggi^[3]. Namun, metode tersebut memiliki beberapa keterbatasan,

antara lain memerlukan instrumentasi yang berukuran relatif besar dan berbiaya tinggi, prosedur deteksi yang kurang praktis, serta preparasi sampel yang kompleks^[4]. Oleh karena itu, metode deteksi optik menjadi salah satu pendekatan yang lebih sederhana dan memiliki sensitivitas deteksi yang tinggi. Salah satu metode deteksi optik yang menjanjikan adalah spektroskopi fluoresensi menggunakan material *carbon dots*^[5].

Carbon dots (C-dots) telah banyak digunakan dalam berbagai bidang, seperti biosensor, penghantaran obat, pencitraan biologis (*bioimaging*), fotokatalis, dan berbagai aplikasi lainnya. Hal tersebut disebabkan oleh sifat unggul yang dimilikinya, seperti fluoresensi yang kuat, toksisitas yang rendah, dan biokompatibilitas yang baik. Proses sintesis C-dots dapat dilakukan melalui berbagai pendekatan yang ramah lingkungan dan berbiaya rendah, seperti metode hidrotermal, pirolisis, dan penggunaan prekursor karbon alami^[6]. Metode pirolisis umum digunakan dalam sintesis C-dots karena prosedurnya relatif sederhana dan dapat menghasilkan partikel karbon berukuran nano. Pirolisis melibatkan pemanasan prekursor organik yang menyebabkan dekomposisi senyawa organik, diikuti oleh karbonisasi dan kondensasi residu yang kaya karbon hingga terbentuk struktur karbon berukuran nano^[7]. C-dots yang dihasilkan dapat memiliki sifat emisi yang berbeda bergantung pada komposisi prekursor, suhu sintesis, dan waktu reaksi. Ukuran partikel dan karakteristik emisi dapat dikendalikan dengan menyesuaikan suhu dan waktu pirolisis serta keberadaan dopan. Suhu yang lebih rendah cenderung menghasilkan dots berukuran lebih kecil dengan emisi berwarna biru, sedangkan suhu yang lebih tinggi dapat meningkatkan ukuran partikel dan mengubah panjang gelombang emisi serta quantum yield^[8].

Bahan alam banyak digunakan sebagai prekursor dalam sintesis C-dots karena umumnya mengandung senyawa organik kaya karbon, seperti karbohidrat, polifenol, flavonoid, asam organik, dan senyawa aromatik lainnya. Senyawa-senyawa tersebut memiliki kerangka karbon yang dapat mengalami karbonisasi atau pirolisis sehingga membentuk inti karbon berukuran nano dengan domain sp^2 terkonjugasi yang menjadi salah satu karakteristik C-dots. Selain itu, bahan alam juga mengandung gugus fungsi, seperti $-OH$, $-COOH$, dan $-NH_2$ yang dapat bertahan atau terbentuk kembali pada permukaan C-dots setelah proses sintesis. Gugus fungsi tersebut berperan penting dalam menentukan sifat optik dan kemampuan dispersi C-dots dalam air. Penggunaan bahan alam juga sejalan dengan konsep *green synthesis*, karena bersifat terbarukan dan dapat mengurangi ketergantungan pada prekursor sintesis^[9].

Daun jambu biji (*Psidium guajava* L.) memiliki potensi sebagai sumber karbon untuk sintesis C-dots^[10]. Daun jambu biji dipilih sebagai prekursor karena diketahui mengandung berbagai senyawa organik bioaktif, seperti flavonoid, tanin, polifenol, saponin, dan asam organik yang memiliki kandungan karbon tinggi dan struktur yang sesuai untuk proses karbonisasi. Senyawa-senyawa tersebut berpotensi berkontribusi terhadap pembentukan kerangka karbon dan sistem π terkonjugasi selama proses pirolisis. Selain itu, keberadaan gugus hidroksil dan karboksil dalam senyawa fenolik pada daun jambu biji dapat berkontribusi terhadap pembentukan gugus fungsi permukaan C-dots, yang berperan penting dalam sifat fluoresensi dan interaksinya dengan ion logam, seperti Fe^{3+} ^[11]. Daun jambu biji juga melimpah, mudah diperoleh, dan sering dianggap sebagai limbah biomassa. Oleh karena itu, pemanfaatannya sebagai bahan baku sintesis C-dots dapat meningkatkan nilai tambah biomassa sekaligus mendukung pengembangan material berbasis biomassa yang berkelanjutan.

Doping heteroatom, seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan sulfur (S) merupakan salah satu strategi yang banyak digunakan untuk memodifikasi sifat optik C-dots berbasis biomassa^[12]. C-dots yang disintesis tanpa doping heteroatom umumnya memiliki beberapa keterbatasan, seperti hasil kuantum fluoresensi yang relatif rendah, efisiensi emisi yang kurang optimal, serta kestabilan optik yang terbatas. Hal ini disebabkan oleh terbatasnya jumlah *defect states* dan gugus fungsi aktif pada permukaan C-dots, sehingga proses transisi elektron yang menghasilkan emisi fluoresensi menjadi kurang efisien. Oleh karena itu, berbagai strategi modifikasi permukaan dilakukan untuk meningkatkan performa optik C-

dots^[13]. Doping nitrogen memiliki kemampuan untuk menyetel celah pita energi, meningkatkan hasil kuantum fluoresensi, dan fotostabilitas^[14]. Studi sebelumnya telah menunjukkan bahwa doping heteroatom secara signifikan meningkatkan sensitivitas C-dots dengan meningkatkan afinitasnya terhadap logam berat tertentu, sehingga sangat efektif untuk aplikasi deteksi ion logam^[15]. Kehadiran heteroatom seperti nitrogen mampu berinteraksi dengan ion logam melalui mekanisme koordinasi atau kompleksasi. Interaksi ini memengaruhi proses transfer elektron dan dapat menyebabkan pemadaman fluoresensi. Perubahan intensitas fluoresensi ini dapat digunakan sebagai sinyal deteksi keberadaan ion logam^{[16][17]}.

Berbagai penelitian telah melaporkan penggunaan C-dots yang didoping nitrogen sebagai sensor fluoresensi untuk mendeteksi ion logam, khususnya Fe^{3+} . Selain itu, berbagai jenis biomassa telah digunakan sebagai prekursor sintesis C-dots, seperti jarum pinus, limbah biji tanaman, maupun biomassa lainnya. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa C-dots berbasis biomassa dapat memiliki selektivitas dan sensitivitas yang baik terhadap Fe^{3+} , sehingga berpotensi digunakan dalam aplikasi pemantauan lingkungan dan analisis air^[18].

Namun, masih terdapat beberapa keterbatasan dalam penelitian sebelumnya. Mekanisme luminesensi pada C-dots berbasis biomassa masih belum sepenuhnya dipahami, dan kontrol terhadap gugus fungsi permukaan serta sifat optik C-dots masih menjadi tantangan dalam pengembangannya^[19]. Selain itu, sebagian besar penelitian menggunakan jenis biomassa tertentu dan metode sintesis tertentu, sehingga pengaruh variasi jenis prekursor alami, suhu sintesis, serta penggunaan agen doping terhadap sifat fluoresensi dan performa sensor masih perlu dieksplorasi lebih lanjut.

Berdasarkan hal tersebut, kebaruan penelitian ini terletak pada jenis prekursor, suhu sintesis, serta penambahan agen doping pada C-dots. Pada penelitian ini, daun jambu biji (*Psidium guajava* L.) digunakan sebagai bahan dasar sintesis merujuk pada penelitian-penelitian sebelumnya^{[20][21][22]}. Kebaruan juga terletak pada dilakukannya evaluasi pengaruh variasi suhu dalam sintesis C-dots berbasis daun jambu biji (*Psidium guajava* L.) dengan tujuan untuk menghasilkan C-dots dengan sifat optik yang lebih unggul sehingga mampu diaplikasikan sebagai sensor deteksi ion logam berat.

2. Metode

2.1. Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi serbuk daun jambu biji (*Psidium guajava* L.) yang diperoleh dari *market place* daring My Herbal07, urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), besi(III) nitrat ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$), perak nitrat (AgNO_3), timbal(II) nitrat ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$), tembaga(II) nitrat ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$), seng(II) nitrat ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$), kadmium klorida (CdCl_2), nikel(II) nitrat ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$), kobalt(II) nitrat ($\text{Co}(\text{NO}_3)_2$), dan mangan(II) nitrat ($\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$) yang diperoleh dari Merck. Aquabides dari WaterOne.

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi peralatan gelas laboratorium, neraca analitik, lampu UV 365 nm, spektrofotometer UV-Vis (PG Instrument), spektrometer *photoluminescence* (PL) (Vernier SpectroVis Plus), *Particle Size Analyzer* (Horiba SZ-100), dan spektrofotometer *Fourier Transform Infra-Red* (FTIR) (PerkinElmer Spotlight 200).

2.2. Prosedur Kerja

Sintesis C-dots dengan Metode Pirolisis

Metode sintesis yang digunakan mengacu pada penelitian Aji^[23] dengan beberapa modifikasi. Serbuk daun jambu biji ditimbang sebanyak 15 g dan dilarutkan dalam 100 mL aquabides. Larutan kemudian diaduk menggunakan *hotplate* pada suhu 80 °C selama 10 menit. Selanjutnya, larutan disaring menggunakan kertas saring untuk memperoleh ekstrak daun jambu biji. Sebanyak 20 mL ekstrak dimasukkan ke dalam cawan krusibel berkapasitas 50 mL dan ditambahkan 2 g urea. Sampel kemudian ditutup dan dimasukkan ke dalam *furnace* pada suhu 250, 300, dan 350 °C selama 30 menit. Serbuk C-dots yang terbentuk kemudian dihaluskan menggunakan mortar.

Karakterisasi C-dots

Karakterisasi C-dots dilakukan menggunakan beberapa instrumen, yaitu spektrofotometer UV-Vis, spektrometer PL, spektrofotometer FTIR, dan *Particle Size Analyzer* (PSA).

Uji Selektivitas C-dots untuk Deteksi Ion Logam Berat

Larutan blanko dibuat dengan mencampurkan 0,5 mL larutan C-dots yang disintesis pada suhu 250, 300, dan 350 °C dengan 0,5 mL aquabides. Larutan standar dengan konsentrasi 10 mM dari beberapa ion logam (Fe^{3+} , Ag^+ , Pb^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , dan Mn^{2+}) disiapkan. Selanjutnya, 0,5 mL larutan C-dots dicampurkan dengan 0,5 mL masing-masing larutan ion logam dan dibiarkan bereaksi selama 1 menit. Masing-masing sampel kemudian dianalisis menggunakan spektrometer PL pada panjang gelombang 150-600 nm. Efek pemadaman fluoresensi C-dots akibat penambahan ion logam juga diamati secara visual di bawah lampu UV 365 nm.

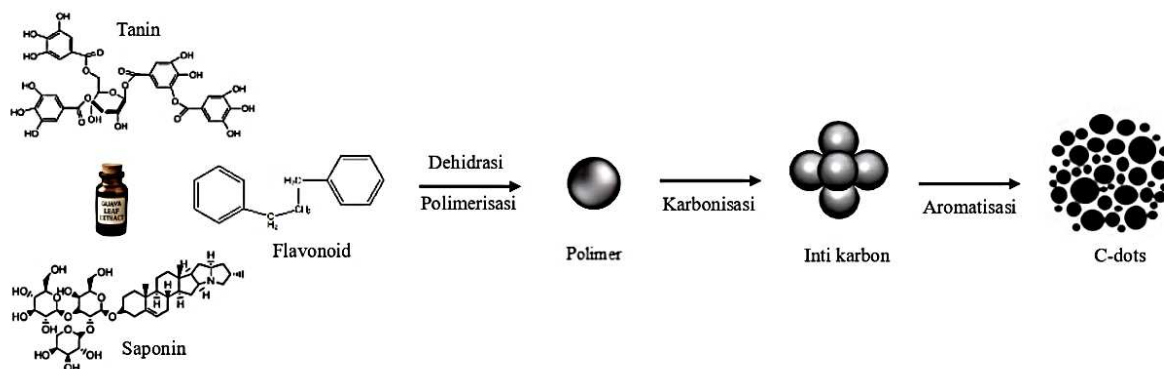
Uji Sensitivitas C-dots untuk Deteksi Fe^{3+}

Larutan blanko dibuat dengan mencampurkan 0,5 mL larutan C-dots pada suhu sintesis optimum dengan 0,5 mL aquabides. Larutan standar Fe^{3+} dengan konsentrasi 1, 5, 10, 15, dan 20 mM disiapkan. Selanjutnya, 0,5 mL larutan C-dots dicampurkan dengan 0,5 mL larutan Fe^{3+} pada masing-masing konsentrasi dan dibiarkan bereaksi selama 1 menit. Sampel kemudian dianalisis menggunakan spektrometer PL pada rentang panjang gelombang 150-600 nm. Efek pemadaman fluoresensi C-dots akibat penambahan Fe^{3+} juga diamati secara visual di bawah lampu UV 365 nm.

3. Hasil dan Pembahasan

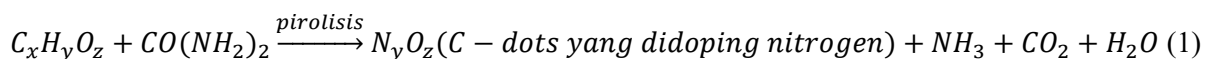
3.1. Sintesis C-dots Daun Jambu Biji (*Psidium guajava* L.)

Sintesis dilakukan dengan memanaskan sampel ekstrak daun jambu biji dalam *furnace* pada variasi suhu 250, 300, dan 350 °C selama 30 menit. Variasi suhu sintesis dilakukan untuk menentukan kondisi optimum C-dots berdasarkan perubahan fluoresensinya. Senyawa organik penyusun prekursor biomassa, seperti tanin, flavonoid, dan saponin, mengalami reaksi dehidrasi, yaitu pelepasan molekul air dari gugus hidroksil ($-\text{OH}$). Seiring dengan meningkatnya suhu, senyawa organik mengalami pemutusan ikatan C–O dan C–C. Selanjutnya, terjadi proses karbonisasi yang menghasilkan fragmen molekul berukuran lebih kecil dan struktur karbon amorf hingga semigrafitik yang menjadi inti C-dots. Karbon hasil karbonisasi selanjutnya mengalami aromatisasi dan membentuk cincin aromatik terkonjugasi (sp^2 carbon domains). Domain tersebut berperan penting dalam sifat fotoluminesensi C-dots. Ilustrasi pembentukan C-dots ditunjukkan pada Gambar 1.

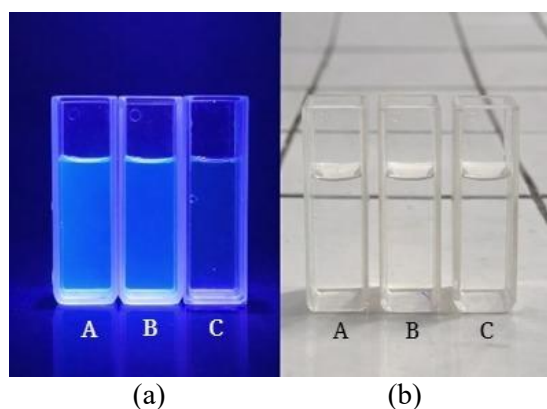


Gambar 1. Ilustrasi pembentukan C-dots dari ekstrak daun jambu biji

Biomassa daun jambu biji bereaksi dengan urea selama perlakuan termal dan mengalami proses dehidrasi, polimerisasi, karbonisasi, dan aromatisasi untuk membentuk C-dots yang didoping nitrogen, dengan NH_3 , CO_2 , dan H_2O sebagai produk samping berupa gas. Skema konseptual pembentukan C-dots terdoping nitrogen dari prekursor biomassa dan urea pada Persamaan 1 berikut.



C-dots yang telah disintesis menghasilkan padatan berwarna hitam pekat. Padatan tersebut menunjukkan terbentuknya material terkarbonisasi, yang ditandai oleh terurainya dan terpolimerisasinya molekul prekursor organik menjadi nanostruktur karbon. Terbentuknya padatan hitam menunjukkan terjadinya proses karbonisasi dan pembentukan inti karbon yang dapat bersifat grafitik atau amorf, yang berkontribusi terhadap sifat fluoresensi dan optik C-dots yang dihasilkan^[24]. Padatan C-dots kemudian dihaluskan menggunakan mortar dan didispersikan dalam aquabides untuk dianalisis. Keberhasilan pembentukan C-dots diamati berdasarkan perubahan fluoresensi secara visual di bawah lampu UV 365 nm (Gambar 2). Sampel C-dots yang dihasilkan dari pirolisis pada suhu 250, 300, dan 350 °C selanjutnya masing-masing disebut C-dots A, C-dots B, dan C-dots C.



Gambar 2. Sampel C-dots: (a) kondisi di bawah sinar UV 365 nm dan (b) kondisi cahaya ruang

Pada Gambar 2, larutan sampel C-dots pada kondisi cahaya ruang tidak menunjukkan emisi cahaya. Ketika disinari menggunakan lampu UV 365 nm, sampel menghasilkan pendaran cahaya berwarna biru-hijau. Hal tersebut sesuai dengan penelitian Ramanarayanan dan Swaminathan mengenai sintesis C-dots dari daun jambu biji^[25]. Suhu pirolisis yang lebih tinggi selama sintesis C-dots dapat mengurangi intensitas fotoluminesensi sehingga menghasilkan pendaran yang lebih redup di bawah sinar UV. Hal tersebut terutama disebabkan oleh peningkatan karbonisasi yang dapat mengurangi gugus fungsi permukaan yang berperan dalam emisi. Pemasakan berlebihan juga dapat mendorong grafitisasi dan peningkatan kristalinitas dalam inti karbon, yang dapat menyebabkan pemadaman fluoresensi melalui perubahan keadaan cacat atau perangkap permukaan^[26]. Sifat fluoresensi C-dots selanjutnya menentukan sifat optiknya yang memengaruhi kinerjanya dalam berbagai aplikasi, termasuk untuk deteksi ion logam berat.

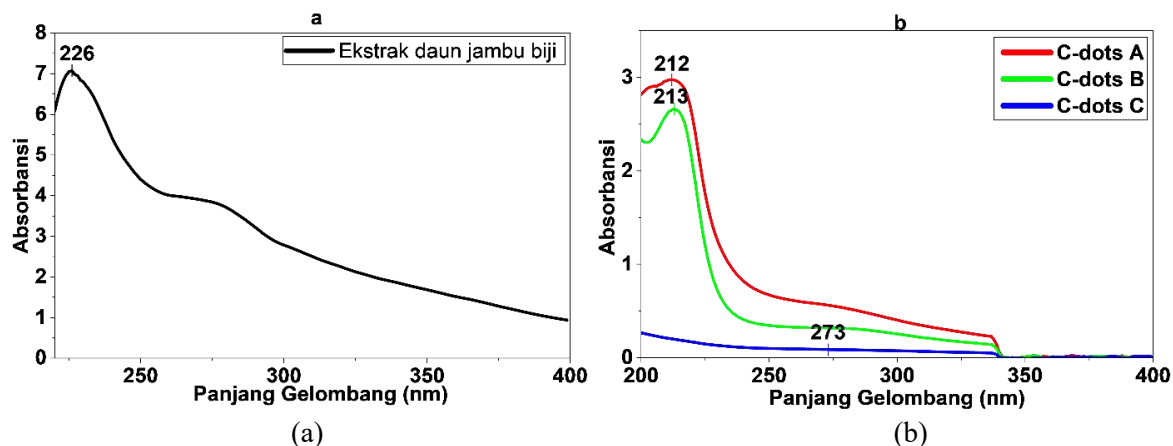
3.2. Karakterisasi C-dots Daun Jambu Biji (*Psidium guajava* L.)

Penentuan Sifat Optik C-dots Menggunakan Spektrofotometer Ultraviolet Visible (UV-Vis) dan Photoluminescence (PL)

Identifikasi puncak absorbansi pada sampel ekstrak daun jambu biji dan C-dots dilakukan menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada rentang panjang gelombang 200–600 nm. Hasil karakterisasi berupa grafik hubungan antara panjang gelombang dan absorbansi ditunjukkan pada Gambar 3. Spektrum absorbansi ekstrak daun jambu biji menunjukkan puncak pada panjang gelombang 226 nm yang berkaitan dengan transisi elektronik $\pi \rightarrow \pi^*$ dari ikatan rangkap terkonjugasi C=C pada senyawa polifenol, flavonoid, dan komponen aromatik alami yang masih mempertahankan struktur molekul organik^[21]. Sistem π terkonjugasi yang relatif lebih panjang menyebabkan energi transisi lebih rendah sehingga serapan muncul pada panjang gelombang yang lebih tinggi.

Sementara itu, C-dots A dan B menunjukkan puncak serapan pada panjang gelombang 212 dan 213 nm, masing-masing, dengan intensitas yang lebih rendah^[21]. Hal tersebut menunjukkan bahwa

struktur elektroniknya didominasi oleh domain karbon sp^2 yang lebih kecil dan sistem π terkonjugasi yang lebih pendek. Proses pirolisis menguraikan senyawa organik kompleks menjadi inti karbon berukuran nano dengan domain yang terbatas sehingga jarak energi antara orbital π dan π^* menjadi lebih besar. Akibatnya, transisi elektronik membutuhkan energi yang lebih tinggi dan serapan terjadi pada panjang gelombang yang lebih pendek.



Gambar 3. Grafik absorbansi UV-Vis: (a) ekstrak dan (b) C-dots

Sementara itu, gelombang maksimum pada C-dots C berbeda jauh jika dibandingkan dengan C-dots A dan B karena tingkat karbonisasinya lebih tinggi. Suhu pemanasan yang lebih tinggi dapat mendorong pembentukan inti karbon dengan domain sp^2 yang lebih luas. Akibatnya, sistem π terkonjugasi pada C-dots C menjadi lebih panjang dibandingkan dengan C-dots A dan C-dots B. Sistem konjugasi yang lebih panjang menurunkan celah energi antara orbital π dan π^* sehingga transisi elektronik terjadi pada energi yang lebih rendah dan ditunjukkan oleh pergeseran serapan ke panjang gelombang yang lebih tinggi (*red shift*), yaitu 273 nm^[21].

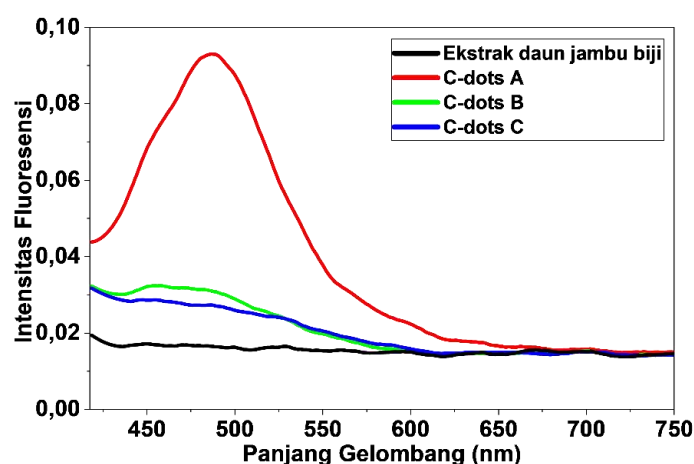
Ekstrak daun jambu biji memiliki absorbansi tertinggi sebesar 7,07, yang menunjukkan bahwa larutan ekstrak masih mengandung banyak senyawa organik kompleks, seperti polifenol dan flavonoid, yang memiliki gugus kromofor sehingga mampu menyerap cahaya dengan kuat. Setelah mengalami proses pirolisis untuk membentuk C-dots, nilai absorbansi mengalami penurunan secara bertahap, yaitu 2,97 pada C-dots A, 2,66 pada C-dots B, dan 0,21 pada C-dots C (Tabel 1). Penurunan absorbansi tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu pirolisis, semakin banyak senyawa organik yang terdekomposisi dan mengalami karbonisasi. Proses tersebut menyebabkan sebagian gugus kromofor yang sebelumnya menyerap cahaya mengalami degradasi atau berubah menjadi struktur karbon yang lebih sederhana. Selain itu, peningkatan suhu pirolisis juga dapat menyebabkan pembentukan struktur karbon yang lebih terkarbonisasi dan kemungkinan aglomerasi partikel sehingga kemampuan material dalam menyerap cahaya menjadi lebih rendah^[24].

Tabel 1. Panjang gelombang maksimum dan absorbansi UV-Vis

Sampel	λ_{maks} (nm)	Absorbansi
Ekstrak	226	7,07
C-dots A	212	2,97
C-dots B	213	2,66
C-dots C	273	0,21

Efek suhu pirolisis terhadap fotoluminesensi ditunjukkan pada Gambar 4. Ekstrak tidak menunjukkan adanya intensitas fluoresensi yang terdeteksi. Hal tersebut diduga karena bahan baku alami, seperti daun jambu biji, hanya mengandung senyawa organik, seperti flavonoid, tanin, fenolik,

dan terpenoid, tetapi belum memiliki inti karbon terkarbonisasi dan domain sp^2 terkonjugasi yang terbentuk selama proses pirolisis^[27]. Sampel C-dots A, C-dots B, dan C-dots C menunjukkan intensitas fluoresensi pada rentang panjang gelombang 400-500 nm yang menunjukkan pendaran berwarna biru-hijau^[28]. Fluoresensi muncul setelah proses pirolisis melalui tahapan dehidrasi, polimerisasi, karbonisasi, dan aromatisasi. Proses tersebut membentuk struktur karbon dan fluoroform yang memungkinkan terjadinya transisi elektronik seperti $\pi-\pi^*$ atau $n-\pi^*$. Panjang gelombang emisi C-dots A, C-dots B, dan C-dots C berturut-turut adalah 486, 472, dan 454 nm (Tabel 2). Panjang gelombang emisi berbanding terbalik dengan energi seiring dengan peningkatan suhu sintesis^[29].



Gambar 4. Grafik intensitas fotoluminesensi C-dots

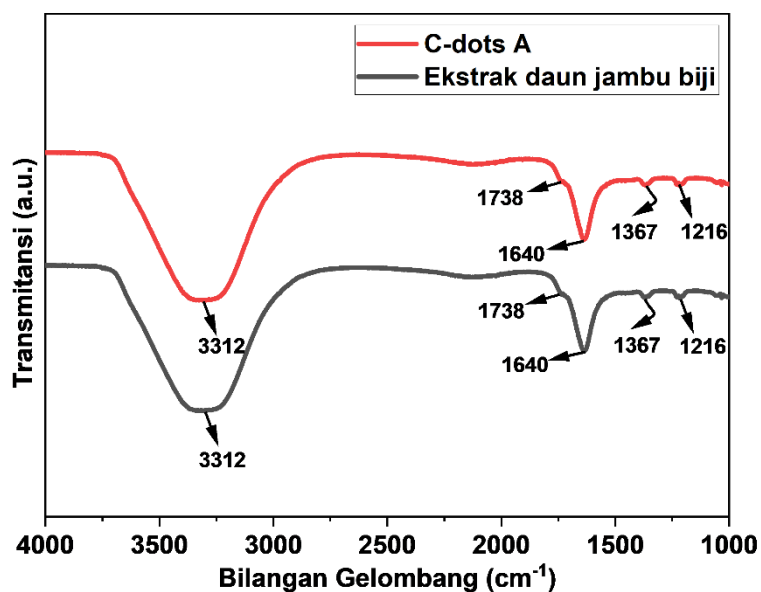
Tabel 2. Intensitas fluoresensi dan panjang gelombang fotoluminesensi

Sampel	Intensitas Fluoresensi	λ_{maks} (nm)
Ekstrak	0,01	-
C-dots A	0,09	486
C-dots B	0,03	472
C-dots C	0,02	454

Sebagai partikel berukuran nano, C-dots dapat mengalami efek pengurungan kuantum. Hal ini menyebabkan jumlah energi transisi yang mungkin dalam partikel C-dots meningkat dan terjadi pada energi yang lebih rendah seiring dengan mengecilnya ukuran partikel. Oleh karena itu, energi emisi C-dots yang meningkat sesuai dengan pengecilan ukuran partikel yang telah terbentuk^[23]. Nilai absorbansi pada C-dots A, C-dots B, dan C-dots C juga menurun seiring dengan peningkatan suhu sintesis. Suhu pada C-dots A berlangsung secara optimal sehingga terbentuk inti karbon dan gugus fungsi permukaan yang berperan sebagai pusat emisi fluoresensi. Kondisi ini menyebabkan proses *electron-hole recombination* berlangsung lebih efisien sehingga menghasilkan intensitas fluoresensi yang lebih tinggi. Sedangkan pada C-dots B dan C menunjukkan bahwa peningkatan suhu menyebabkan karbonisasi yang berlebihan, sehingga sebagian gugus fungsi permukaan yang berperan dalam emisi fluoresensi mengalami degradasi. Selain itu, suhu yang lebih tinggi juga dapat meningkatkan aglomerasi partikel dan pembentukan domain karbon sp^2 yang lebih besar, yang dapat memicu proses *non-radiative recombination* sehingga energi yang dihasilkan tidak dipancarkan sebagai fluoresensi^[30].

Karakterisasi Gugus Fungsi C-dots menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

Karakterisasi menggunakan FTIR PerkinElmer Spotlight 200 dalam rentang bilangan gelombang 4000–400 cm^{-1} . Gambar 5 menunjukkan hasil pengujian FTIR dari ekstrak daun jambu biji sebelum disintesis dan setelah disintesis menjadi C-dots melalui metode pirolisis suhu 250 °C.



Gambar 5. Spektrum FTIR ekstrak dan C-dots A

Bilangan gelombang 3312 cm^{-1} dengan intensitas menguat dan melebar diidentifikasi sebagai regangan hidroksil O–H^[25]. Pita ini mengindikasikan adanya senyawa fenolik, flavonoid, tanin, air, dan alkohol, yang merupakan komponen utama dalam ekstrak daun jambu biji^[31]. Puncak lain ditemukan pada daerah ikatan rangkap antara bilangan gelombang $1800\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$. Pada daerah ini muncul puncak pada 1738 dan 1640 cm^{-1} yang diidentifikasi sebagai ikatan C=O dan C=C terkonjugasi^{[32][25]}. Pada daerah sidik jari (*fingerprint region*) ditemukan puncak pada bilangan gelombang 1367 cm^{-1} yang diidentifikasi sebagai ikatan C–N^[33]. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun ekstrak tidak terdoping nitrogen, ekstrak masih mengandung berbagai senyawa biomolekul, seperti asam amino, alkaloid, dan klorofil yang semuanya memiliki ikatan C–N. Ikatan C–O teridentifikasi pada bilangan gelombang 1216 cm^{-1} ^[25]. Spektrum FTIR ekstrak dan C-dots A menunjukkan tidak adanya perbedaan gugus fungsi yang signifikan. Hal ini disebabkan oleh dominasi gugus fungsi biomassa alami (O–H fenolik, C=C aromatik, C–O eter) dari flavonoid/kuersetin/tanin yang tetap stabil selama pirolisis. Interpretasi hasil spektra FTIR ekstrak dan C-dots daun jambu biji dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Interpretasi spektrum FTIR ekstrak dan C-dots daun jambu biji

Gugus Fungsi	Bilangan Gelombang (cm^{-1})
O–H	3312
C=O	1738
C=C	1640
C–N	1367
C–O	1216

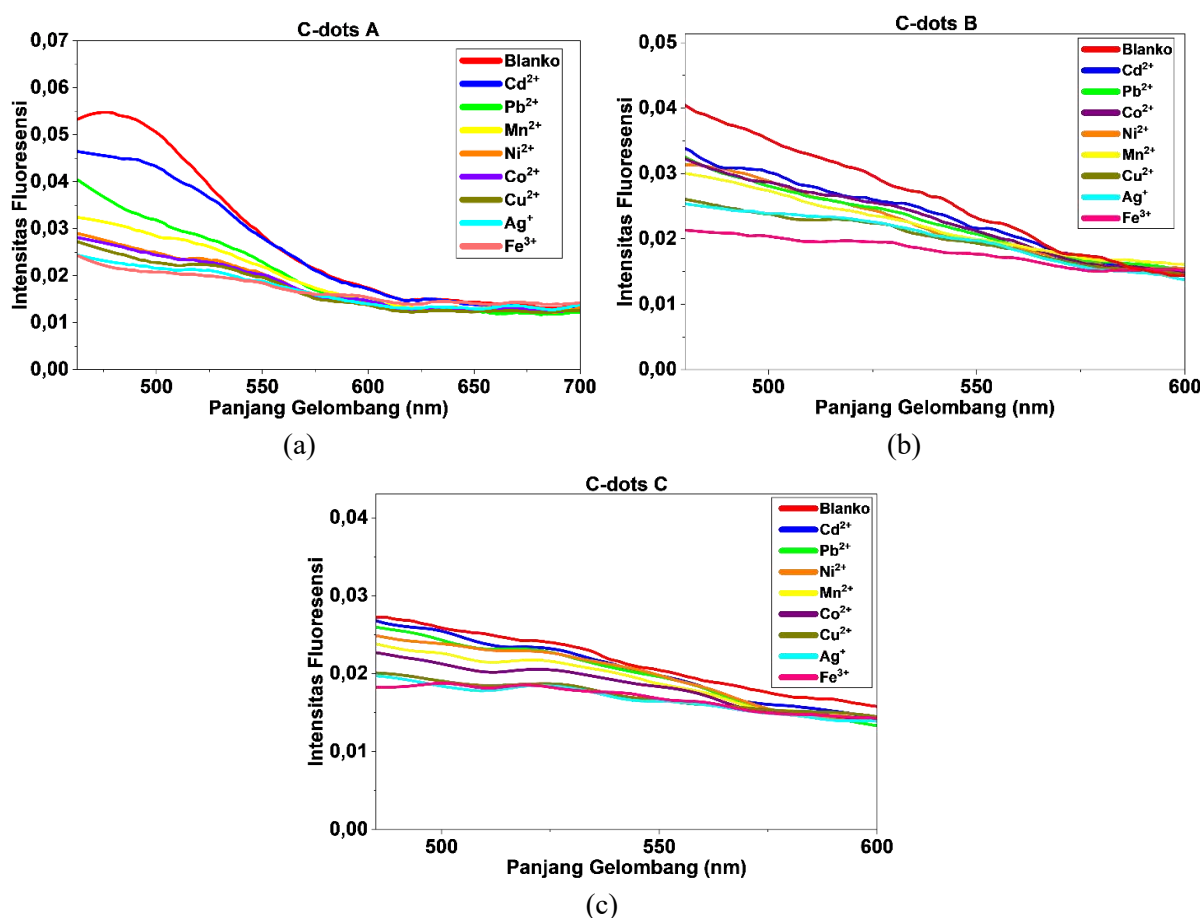
Distribusi Ukuran Partikel

Ukuran partikel ditentukan menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) yang bekerja berdasarkan prinsip hamburan cahaya dinamis. Hasil karakterisasi yang diperoleh dari pengujian PSA C-dots A yaitu *Z-Average* atau diameter rata-rata partikel dan *Polydispersity Index* (PI) atau tingkat lebar distribusi ukuran partikel. Hasil analisis PSA C-dots A menunjukkan nilai *Z-Average* sebesar $6,2\text{ nm}$. Hal ini menunjukkan bahwa diameter rata-rata nanopartikel fotoluminesens masih berada dalam rentang nanometer, yaitu kurang dari 10 nm ^[34]. Perlakuan selama proses pembuatan C-dots dapat memengaruhi

ukuran dan bentuk partikel, antara lain suhu dan waktu reaksi, jenis dan jumlah doping yang ditambahkan, serta metode sintesis yang digunakan^[35]. Nilai PI yang diperoleh adalah 20,317 yang menunjukkan bahwa distribusi ukuran C-dots yang disintesis kurang seragam atau bersifat polidispersi. Nilai $PI < 0,7$ menunjukkan distribusi yang relatif sempit atau homogen (monodispersi), sedangkan $PI > 0,7$ menunjukkan distribusi yang lebar atau heterogen (polidispersi)^[36]. Nilai PI yang sangat besar pada C-dots dapat disebabkan oleh agregasi partikel selama pengukuran menggunakan metode hamburan cahaya dinamis sehingga terbentuk kelompok partikel berukuran lebih besar yang terdeteksi sebagai partikel berukuran besar. Proses pirolisis C-dots juga dapat memicu agregasi akibat kelarutan yang tidak optimal atau kondisi yang membatasi pertumbuhan partikel. Kondisi tersebut dapat menyebabkan fragmen karbon bebas bergabung dan membentuk kluster berukuran lebih besar^[37].

3.3. Uji Selektivitas C-dots terhadap Ion Logam Berat

Uji selektivitas dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan C-dots dalam memberikan respon fluoresensi terhadap berbagai ion logam berat sehingga dapat diketahui ion mana yang memberikan pengaruh paling signifikan terhadap perubahan intensitas fluoresensi. Aquabides yang ditambahkan C-dots digunakan sebagai blanko dan menunjukkan intensitas fluoresensi paling tinggi. Sementara itu, penambahan ion logam, seperti Cd^{2+} , Pb^{2+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} , Ag^+ , dan Fe^{3+} menyebabkan penurunan intensitas fluoresensi dengan derajat yang bervariasi. Ion Fe^{3+} menunjukkan efek pemadaman fluoresensi paling besar, yang ditandai dengan intensitas fluoresensi terendah pada seluruh rentang panjang gelombang. Hal tersebut mengindikasikan bahwa Fe^{3+} memiliki interaksi yang lebih kuat dengan permukaan C-dots dibandingkan ion logam lainnya. Sementara itu, ion seperti Cd^{2+} dan Pb^{2+} menunjukkan intensitas yang relatif lebih tinggi sehingga menghasilkan efek pemadaman fluoresensi yang lebih lemah (Gambar 6).



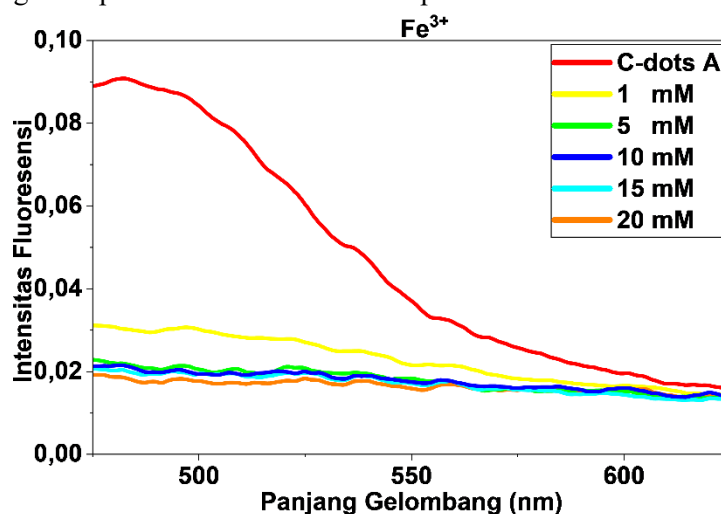
Gambar 6. Spektrum fotoluminesensi (PL): (a) C-dots A, (b) C-dots B, dan (c) C-dots C

Intensitas fluoresensi C-dots B dan C-dots C lebih rendah dibandingkan dengan C-dots A. Perbedaan tersebut dapat dikaitkan dengan perubahan struktur permukaan dan gugus fungsi akibat suhu sintesis yang lebih tinggi, yang selanjutnya memengaruhi sifat optik serta interaksi C-dots dengan ion logam.

Gugus fungsi pada permukaan C-dots dapat memfasilitasi interaksi dengan ion logam karena berperan sebagai donor elektron dan memiliki pasangan elektron bebas. Ion Fe^{3+} memiliki konfigurasi elektron $3d^5$, muatan positif yang tinggi, dan kerapatan muatan yang besar karena jari-jari ionnya relatif kecil. Kondisi tersebut menyebabkan Fe^{3+} bersifat sebagai asam Lewis kuat yang mampu menerima pasangan elektron dari gugus fungsi C-dots. Ketika Fe^{3+} ditambahkan, ion tersebut dapat berinteraksi dengan gugus fungsi permukaan C-dots, seperti $-\text{COOH}$, $-\text{OH}$, dan $-\text{NH}_2$, melalui pembentukan kompleks koordinasi. Interaksi tersebut dapat mengganggu keadaan energi permukaan dan meningkatkan jalur relaksasi nonradiasi sehingga menyebabkan penurunan intensitas fluoresensi yang signifikan^[38].

3.4. Uji Sensitivitas C-dots terhadap ion Fe^{3+}

Pada penelitian ini, C-dots A yang memiliki selektivitas tertinggi selanjutnya diuji untuk menentukan sensitivitas dan rentang linear respons fluoresensinya terhadap konsentrasi Fe^{3+} . Intensitas fluoresensi C-dots tanpa penambahan ion Fe^{3+} (blanko) memiliki nilai tertinggi pada rentang panjang gelombang sekitar 480–500 nm (Gambar 7). Seiring dengan penambahan konsentrasi Fe^{3+} dari 1 hingga 20 mM, terjadi penurunan intensitas fluoresensi. Penurunan intensitas tersebut berbanding terbalik dengan konsentrasi Fe^{3+} , yang menunjukkan bahwa interaksi antara permukaan C-dots dan ion logam menyebabkan peningkatan proses relaksasi nonradiasi pada keadaan tereksitasi C-dots.

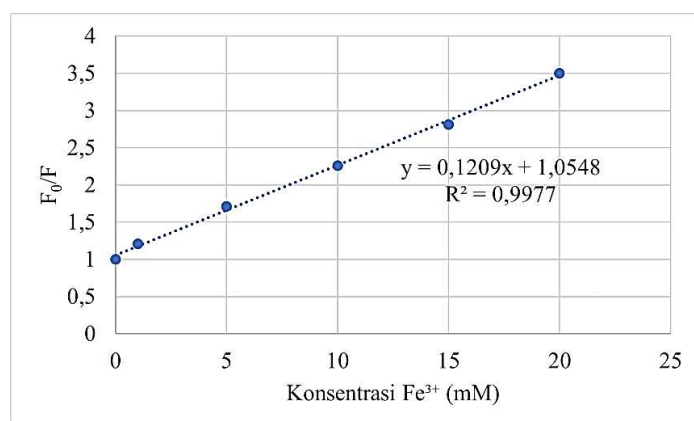


Gambar 7. Spektrum fotoluminesensi C-dots A pada berbagai konsentrasi Fe^{3+}

Pada spektrum PL, penurunan intensitas paling tajam terjadi pada penambahan Fe^{3+} dengan konsentrasi tinggi, sedangkan pada konsentrasi yang lebih rendah, laju penurunan intensitas cenderung melandai. Hal tersebut menunjukkan bahwa situs aktif atau gugus fungsi pada permukaan C-dots mulai mengalami kejenuhan (*saturation point*) oleh ion Fe^{3+} . Kondisi tersebut menunjukkan bahwa C-dots berpotensi digunakan untuk mendeteksi Fe^{3+} pada rentang konsentrasi yang diuji. Perilaku pemadaman fluoresensi oleh ion logam selanjutnya dianalisis menggunakan persamaan Stern–Volmer.

Gambar 8 menunjukkan plot Stern–Volmer untuk menguji respons fluoresensi C-dots terhadap ion Fe^{3+} . Sumbu y (F_0/F) menunjukkan rasio intensitas fluoresensi awal (F_0 , tanpa penambahan Fe^{3+}) terhadap intensitas setelah penambahan Fe^{3+} (F), sementara sumbu x menunjukkan konsentrasi Fe^{3+} dalam mM. Rasio F_0/F dan konsentrasi Fe^{3+} menunjukkan hubungan linear dengan persamaan $y = 0,1209x + 1,0548$ dan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9977. Batas deteksi (*limit of detection*, LOD) dihitung sebesar 1,283 mM. Berdasarkan nilai tersebut, C-dots yang disintesis dari 0,02 g bahan dalam

20 mL larutan mampu mendeteksi logam Fe^{3+} hingga konsentrasi minimum sebesar 1,283 mM.



Gambar 8. Kurva Stern-Volmer uji sensitivitas Fe^{3+}

4. Kesimpulan

C-dots dari daun jambu biji (*Psidium guajava* L.) berhasil disintesis menggunakan metode pirolisis. C-dots A yaitu C-dots yang disintesis pada suhu 250 °C, memiliki panjang gelombang maksimum absorbansi pada 212 nm dan panjang gelombang maksimum fotoluminesensi pada 486 nm. Nilai tersebut menunjukkan respons fotoluminesensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan C-dots B dan C yang disintesis pada suhu 300 dan 350 °C. C-dots A memiliki ukuran partikel sebesar 6,2 nm serta mengandung gugus fungsi permukaan, seperti hidroksil, karbonil, dan amina. C-dots A menunjukkan fluoresensi yang baik di bawah penyinaran UV 365 nm. Penambahan ion Fe^{3+} menyebabkan penurunan intensitas fluoresensi yang lebih signifikan dibandingkan dengan ion logam lainnya. Hal tersebut menunjukkan adanya interaksi antara ion Fe^{3+} dan permukaan C-dots. Dengan demikian, C-dots A berpotensi digunakan sebagai sensor fluoresensi untuk mendeteksi ion Fe^{3+} .

Daftar Pustaka

- [1] Surya B. and Malsoor T. (2023). Assessment Of Heavy Metal Bioaccumulation in Freshwater Fish Species: Implications for Ecosystem Health and Human Well-Being. *International Journal of Multidisciplinary Research*, 5(5):1–12.
- [2] Lama S.A.E. (2022). Water Contamination by Heavy Metals and their Toxic Effect. *Stallion Journal of Multidisciplinary Associated Research Studies*, 1(1):65–71, doi: 10.55544/sjmars.1.1.10.
- [3] Jain R., Thakur A., Kaur P., Kim K.H., and Devi P. (2020). Advances in imaging-assisted sensing techniques for heavy metals in water: Trends, challenges, and opportunities. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 123:115758, doi: 10.1016/j.trac.2019.115758.
- [4] Jiang D., Sheng K., Gui G., Jiang H., Liu X., and Wang L. (2021). A novel smartphone-based electrochemical cell sensor for evaluating the toxicity of heavy metal ions Cd^{2+} , Hg^{2+} , and Pb^{2+} in rice. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 413(16):4277–4287, doi: 10.1007/s00216-021-03379-4.
- [5] 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, doi: 10.20961/alchemy.19.2.61881.234-246.
- [6] Khan A.U., Liu Y., Wang S., Ullah M.W., Chen Q., Zhang D., Kang Z., and Mao B. (2024). Advancements in the green synthesis of carbon dots for sustainable development. *Sustainable Materials and Technologies*, 41:e01004, doi: 10.1016/j.susmat.2024.e01004.
- [7] Devi M., Rawat S., and Sharma S. (2021). Review Article A comprehensive review of the

- pyrolysis process: from carbon nanomaterial synthesis to waste treatment. *Oxford Open Materials Science*, 1:1–30, doi: <https://doi.org/10.1093/oxfmat/itab014>.
- [8] Cui L., Ren X., Sun M., Liu H., and Xia L. (2021). Review Carbon Dots: Synthesis, Properties and Applications. *Nanomaterials*, 11(1):01053–01063, doi: <https://doi.org/10.3390/nano11123419>.
 - [9] Saravanan A., Maruthapandi M., Das P., Luong H.T., and Gedanken A. (2021). Green synthesis of multifunctional carbon dots with antibacterial activities. *Nanomaterials*, 11(2):1–11, doi: [10.3390/nano11020369](https://doi.org/10.3390/nano11020369).
 - [10] Das A., Jati A.P., Selvaraj M., Kataki R., Baskar G., Halder G., and Rokhum S.L. (2024). *Psidium guajava* (guava) leaves derived functional activated carbon as a heterogeneous catalyst for conversion of *Jatropha curcas* oil to biodiesel. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 181:106636, doi: [10.1016/j.jaap.2024.106636](https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106636).
 - [11] Kumar M., Tomar M., Amarowicz R., Saurabh V., Nair M.S., Maheshwari C., Sasi M., Prajapati U., Hasan M., Singh S., Changan S., Prajapat R.K., Berwal M.K., and Satankar V. (2021). Guava (*Psidium guajava* L.) Leaves: Nutritional Composition. *Foods*, 10(752):1–20, doi: [10.3390/foods10040752](https://doi.org/10.3390/foods10040752).
 - [12] Dsouza S.D., Buerkle M., Brunet P., Maddi C., Padmanaban D.B., Morelli A., Payam A.F., Maguire P., Mariotti D., and Srcek V. (2021). The importance of surface states in N-doped carbon quantum dots. *Carbon*, 183:1–11, doi: [10.1016/j.carbon.2021.06.088](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.06.088).
 - [13] Azami M., Wei J., Valizadehderakhshan M., Jayapalan A., Ayodele O.O., and Nowlin K. (2023). Effect of Doping Heteroatoms on the Optical Behaviors and Radical Scavenging Properties of Carbon Nanodots. *The Journal of Physical Chemistry C*, doi: [10.1021/acs.jpcc.3c00953](https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.3c00953).
 - [14] Hasan M., Baheerathan B., Sutradhar S., Shahbandinejad R., Rakshit S., Kozinski J., Li D., Hu Y., and Kang K. (2025). Microwave-assisted synthesis of biomass-derived N-doped carbon dots for metal ion sensing. *Carbon Research*, 4(1), doi: [10.1007/s44246-025-00215-7](https://doi.org/10.1007/s44246-025-00215-7).
 - [15] 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(2):877–908, doi: [10.1515/nanoph-2020-0507](https://doi.org/10.1515/nanoph-2020-0507).
 - [16] Kurukavak Ç.K., Tok M., Toprak A., Yurdakul M., and Ersöz M. (2025). Effect of Hetero-Atom Doping on the Structure and Optical Properties of Carbon Quantum Dots for the Sensitive Detection of Heavy Metal Ions. *Luminescence*, 1–12, doi: [10.1002/bio.70215](https://doi.org/10.1002/bio.70215).
 - [17] Sonaimuthu, M., Ganesan, S., Anand, S., Kumar, A.J., Palanisamy, S., You, S., Velsankar, K., Sudhakar, S., Lo, H.M. and Lee, Y.R. (2023). Multiple heteroatom dopant carbon dots as a novel photoluminescent probe for the sensitive detection of Cu²⁺ and Fe³⁺ ions in living cells and environmental sample analysis. *Environmental Research*, 219:115106, doi: [10.1016/j.envres.2022.115106](https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115106).
 - [18] Wang B., Guo L., Yan X., Hou F., Zhong L., and Xu H. (2023). Dual-mode detection sensor based on nitrogen-doped carbon dots from pine needles for the determination of Fe³⁺ and folic acid. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 285:121891, doi: [10.1016/j.saa.2022.121891](https://doi.org/10.1016/j.saa.2022.121891).
 - [19] Zhou Y., Chen G., Ma C., Gu J., Yang T., and Li L. (2023). Nitrogen-doped carbon dots with bright fluorescence for highly sensitive detection of Fe³⁺ in environmental waters. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 293:122414, doi: [10.1016/j.saa.2023.122414](https://doi.org/10.1016/j.saa.2023.122414).
 - [20] Velmurugan P., Kumar R.V., Sivakumar S., and Ravi A.V. (2022). Fabrication of blue fluorescent carbon quantum dots using green carbon precursor *Psidium guajava* leaf extract and its application in water treatment. *Carbon Letters*, 32(1):119–129, doi: [10.1007/s42823-021-00259-w](https://doi.org/10.1007/s42823-021-00259-w).

- [21] Murugan, G., Nilsuwan, K., Kim, J.T., Rhim, J.W., Zhang, B., Yin, T. and Benjakul, S., 2026. Synthesis and characterization of carbon dots from guava leaves (*Psidium guajava* L.): UV blocking, antioxidant and antimicrobial functions. *Waste and Biomass Valorization*, 17(2), pp.717-730., doi: 10.1007/s12649-025-03117-2.
- [22] Varshney N., Tariq M., Arshad F., and Sk M.P. (2022). Biomass-derived carbon dots for efficient cleanup of oil spills. *Journal of Water Process Engineering*, 49:103016, doi: 10.1016/j.jwpe.2022.103016.
- [23] Aji M.P., Susanto, Wiguna P.A., and Sulhadi. (2017). Facile synthesis of luminescent carbon dots from mangosteen peel by pyrolysis method. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 11(2):119–126, doi: 10.1007/s40094-017-0250-3.
- [24] Qin X., Fu C., Zhang J., Shao W., Qin X., Gui Y., Wang L., Guo H., Chen F., Jiang L., and Wu G. (2022). Direct preparation of solid carbon dots by pyrolysis of collagen waste and their applications in fluorescent sensing and imaging. *Frontiers in Chemistry*, 10:1006389, doi: 10.3389/fchem.2022.1006389.
- [25] Ramanarayanan R. and Swaminathan S. (2020). Synthesis and characterisation of green luminescent carbon dots from guava leaf extract. *Materials Today: Proceedings*, 33:2223–2227, doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.805.
- [26] Inoue K., Suzuki R., Kaneda Y., Tanimura M., Shinozaki K., and Tachibana M. (2025). Plant-seed-derived carbon dots. *Journal of Materials Chemistry C*, 22832–22840, doi: 10.1039/d5tc03150h.
- [27] Putro P.A. and Roza L. (2018). Precursor concentration effect on optical properties of carbon dots from Cassava's peels. *Journal of Physics: Theories and Applications*, 2(02):43–52, doi: 10.20961/jphys theor-appl.v2i2.30664.
- [28] Han B., Hu X., Zhang X., Huang X., An M., Chen X., Zhao D., and Li J. (2022). The fluorescence mechanism of carbon dots based on the separation and identification of small molecular fluorophores. *RSC Advances*, 12(19):11640–11648, doi: 10.1039/D2RA00431C.
- [29] Li P., Xue S., Sun L., Zong L., An L., and Qu D. (2022). Formation and fluorescent mechanism of red emissive carbon dots from o-phenylenediamine and catechol system. *Light: Science & Applications*, 1–11, doi: 10.1038/s41377-022-00984-5.
- [30] Santos N., Santana P.A., Osorio-Roman I., Jara-Gutiérrez C., Villena J., and Ahumada M. (2025). Effect of temperature on the carbonization process of cationic carbon dots: a physicochemical and in vitro study. *RSC Advances*, 15(16):12814–12824, doi: 10.1039/d5ra00062a.
- [31] Faradilla M. and Rizal K. (2023). Phytochemical screening analysis of Guava leaf extract (*Psidium guajava* L.) against the content of Saponins, Tannins, and Flavonoids. *Journal of Natural Sciences and Mathematics Research*, 9(2):117–126, doi: 10.21580/jnsmr.2023.9.2.17835.
- [32] Adhikari A., Chhetri K., Acharya D., and Pant B. (2022). Green Synthesis of Iron Oxide Nanoparticles Using *Psidium guajava* L. Leaves Extract for Degradation of Organic Dyes and Anti-microbial Applications. *Catalysts*, 12(1188), doi: <https://doi.org/10.3390/catal12101188>.
- [33] Agustina E., Amalia W., Damayanti M., Aji A., and Ghifari M.A. (2025). Preliminary Study on Fe(III) Detection Using Nitrogen-Doped Carbon Quantum Dots via HSV-Based Smartphone Fluorescence Analysis. *Indonesian Journal of Chemical Analysis*, 08(02):121–131, doi: 10.20885/ijca.vol8.iss2.art3.
- [34] Ghosh T., Das K.T., Das P., Banerji P., and Das N.C. (2022). Current scenario and recent advancement of doped carbon dots: a short review scientocracy update (2013–2022). *Carbon Letters*, 32(4):953–977, doi: 10.1007/s42823-022-00339-5.
- [35] Lin Y., Lin Y., and Periasamy P. (2019). Parameters affecting the synthesis of carbon dots for

- quantitation of copper ions. *Nanoscale Advances*, 1:2553–2561, doi: 10.1039/C9NA00137A.
- [36] Ermawati D.E.K.A., Yugatama A.D.I., Ramadhani B.R., Pertiwi I., and Novachiria S.R. (2022). Original Article Stability And Antibacterial Activity Test Of Nanosilver Biosynthetic Hydrogel. *International Journal of Applied Pharmaceutics*, 14(2), doi: <https://dx.doi.org/10.22159/ijap.2022v14i2.43584>.
- [37] Jayswal V.K. and Ritcey M.A. (2023). Synthesis of fluorescent carbon nanoparticles by dispersion polymerization of acetylene. *Nanoscale Advances*, 337–343, doi: 10.1039/d2na00619g.
- [38] Arooj M., Venkatesh G., Parambath J.B., Mazen K., Shyama M., Ahmad A.A., Shabnam A., Kanan S., and Mohamed A.A. (2026). Integrating carbon dots to advance measuring aquatic metal ion pollutants: sensing and computational modeling. *Carbon Resources Conversion*, 100420, doi: 10.1016/j.crcon.2026.100420.