

Pengaruh Waktu Hidrotermal terhadap Sifat Optik Nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@CQD}$ (Carbon Quantum Dots)

Putri Azima Rafsanjani, Astuti*

Laboratorium Fisika Material, Departemen Fisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas,
Kampus Limau Manis, Padang, 25163, Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 8 Juli 2025

Direvisi: 15 Oktober 2025

Diterima: 11 November 2025

Kata kunci:

Bioimaging

$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@CQD}$

Fluoresensi

Hidrotermal

Nanokomposit

Keywords:

Bioimaging

$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@CQD}$

Fluorescence

Hydrothermal

Nanocomposite

Penulis Korespondensi:

Astuti

Email: astuti@sci.unand.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan menyintesis nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@CQD}$ menggunakan metode hidrotermal dengan variasi waktu untuk mempelajari pengaruhnya terhadap struktur dan sifat optik material. Nanopartikel Fe_3O_4 diperoleh melalui metode kopresipitasi, sedangkan CQD disintesis dari ekstrak kayu secang (*Caesalpinia sappan* L.) yang bersifat alami, ramah lingkungan, dan berpotensi sebagai material fluoresen. Hasil karakterisasi XRD menunjukkan bahwa Fe_3O_4 memiliki ukuran kristal 22,48 nm, sedangkan penambahan CQD meningkatkan ukuran kristal pada nanokomposit. Analisis FTIR mengonfirmasi keberadaan gugus fungsi khas seperti Fe–O, O–H, C–H, dan C=O yang menandakan keterikatan CQD pada Fe_3O_4 . Uji UV-Vis memperlihatkan $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@CQD}$ memiliki puncak absorbansi pada rentang panjang gelombang 266–1000 nm, sedangkan uji fluoresensi menunjukkan bahwa intensitas emisi meningkat dengan bertambahnya waktu hidrotermal, dengan puncak emisi berada pada panjang gelombang 600–650 nm.

*This study aims to synthesize $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@CQD}$ nanocomposites using a hydrothermal method with time variations to study their effects on the structural and optical properties of the material. Fe_3O_4 nanoparticles were obtained through a coprecipitation method, while CQDs were synthesized from the extract of sappan wood (*Caesalpinia sappan* L.) which is natural, environmentally friendly, and has the potential as a fluorescent material. The results of XRD characterization showed that Fe_3O_4 has a crystal size of 22.476 nm, while the addition of CQDs increased the crystal size of the nanocomposite. FTIR analysis confirmed the presence of typical functional groups such as Fe–O, O–H, C–H, and C=O indicating the presence of CQDs in Fe_3O_4 . UV-Vis test shows that $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@CQD}$ has an absorption peak in the wavelength range of 300–700 nm, while the fluorescence test shows that the emission intensity increases with increasing hydrothermal time, with the emission peak at a wavelength of 600–650 nm.*

Copyright © 2025 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Nanoteknologi merupakan bidang ilmu yang berkembang pesat dalam pengembangan material berukuran nanometer dengan sifat fisis dan kimia yang berbeda dari material *bulk*. Nanopartikel memiliki keunggulan seperti luas permukaan yang besar, kestabilan termal, sifat optik, magnetik, serta biokompatibilitas yang membuatnya banyak diaplikasikan pada bidang biomedis, elektronik, dan katalisis. Salah satu material yang banyak diteliti adalah nanopartikel magnetik Fe₃O₄ karena sifat superparamagnetik, kemudahan sintesis, serta potensinya sebagai agen kontras dalam *bioimaging* (Keshri & Biswas, 2022).

Di sisi lain, carbon quantum dots (CQDs) merupakan nanomaterial karbon dengan ukuran <10 nm yang memiliki sifat fluoresensi, ramah lingkungan, non-toksik, dan biaya produksi relatif rendah (Dhariwal & Rao, 2024). CQD dapat dihasilkan dari berbagai prekursor organik, termasuk sumber alami seperti kayu secang (*Caesalpinia sappan L.*) yang mengandung senyawa bioaktif dengan potensi sebagai fluorofor alami. Kombinasi Fe₃O₄ dan CQD dalam bentuk nanokomposit diharapkan menghasilkan material dengan sifat magnetik dan optik sekaligus, sehingga menarik untuk dikembangkan sebagai material *bioimaging*.

Beberapa penelitian sebelumnya telah melaporkan sintesis Fe₃O₄@CQD dengan menggunakan metode hidrotermal, salah satunya dilakukan oleh Fini et al. (2018) dari ekstrak lemon, anggur, dan asam sitrat sebagai sumber CQD menggunakan metode hidrotermal. Karakterisasi *Photoluminescence* menghasilkan puncak emisi pada panjang gelombang 450 nm, namun masih terdapat keterbatasan seperti aglomerasi partikel dan intensitas fluoresensi yang kurang stabil. Pada penelitian sebelumnya Astuti et al. (2024) menyintesis Fe₃O₄@CQD dengan metode pemanasan sederhana. Pada penelitian tersebut diperoleh puncak emisi 420-460 nm. Waktu reaksi hidrotermal diketahui berpengaruh signifikan terhadap pembentukan struktur kristal, kestabilan gugus fungsi, dan intensitas emisi fluoresensi dari nanomaterial yang dihasilkan.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini berfokus pada sintesis nanokomposit Fe₃O₄@CQD yang berasal dari kayu secang (*Caesalpinia sappan L.*) dengan memvariasikan waktu hidrotermal untuk mengetahui pengaruhnya terhadap struktur kristal, serta sifat optik material. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan material nanokomposit magnetik-luminisens untuk aplikasi *bioimaging* dan penelitian biomedis.

II. METODE

2.1 Sintesis Fe₃O₄

Sintesis nanopartikel Fe₃O₄ menggunakan metode kopresipitasi. Sebanyak 2,02725 g FeCl₃.6H₂O (Fe(II)) dan 1,0425 g FeSO₄.7H₂O (Fe(III)) dilarutkan dalam 30 mL aquades, larutan NH₄OH sebanyak 30 mL diteteskan secara perlahan ke dalam larutan hingga mencapai pH 11, kemudian larutan dipanaskan di atas *hot plate* pada suhu 60°C kemudian dan terbentuk endapan hitam sambil tetap diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 3 jam. Proses pengendapan Fe₃O₄ dilakukan dengan bantuan magnet permanen. Endapan dicuci menggunakan aquades sebanyak tiga kali kemudian endapan dikeringkan menggunakan furnace pada suhu 1500°C selama 5 jam. Endapan yang sudah kering selanjutnya digerus hingga menjadi serbuk Fe₃O₄.

2.2 Sintesis CQD

CQD disintesis dengan metode hidrotermal. Tahap pertama untuk mensintesis CQD adalah menghaluskan kayu secang hingga berbentuk serbuk, kemudian 2 gram serbuk kayu secang dilarutkan ke dalam 30 mL alkohol 96% dalam kondisi pengadukan selama 30 menit. Larutan disaring menggunakan kertas saring sehingga menghasilkan ekstrak kayu secang. Larutan ekstrak kayu secang dipindahkan dan dipanaskan dalam autoklaf untuk proses hidrotermal menggunakan oven pada suhu 150°C selama 8 jam.

2.3 Sintesis Fe₃O₄@CQD

Sintesis Fe₃O₄@CQD dilakukan dengan melarutkan sebanyak 0,4 g serbuk Fe₃O₄ dengan 20 ml larutan CQD kemudian diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 5 menit, kemudian larutan dimasukkan ke dalam teflon autoclave untuk proses hidrotermal dilakukan menggunakan oven pada

suhu 150°C selama 2 jam. Larutan dikeluarkan dari *autoclave*, selanjutnya larutan disentrifugasi selama 20 menit untuk memisahkan endapan dan cairan. Endapan hasil sentrifugasi dikeringkan menggunakan furnace pada suhu 50°C selama 2 jam. Endapan yang sudah kering selanjutnya digerus hingga menjadi serbuk Fe₃O₄. Sintesis sampel selanjutnya dilakukan dengan cara yang sama menggunakan variasi waktu selama 1 jam dan 30 menit.

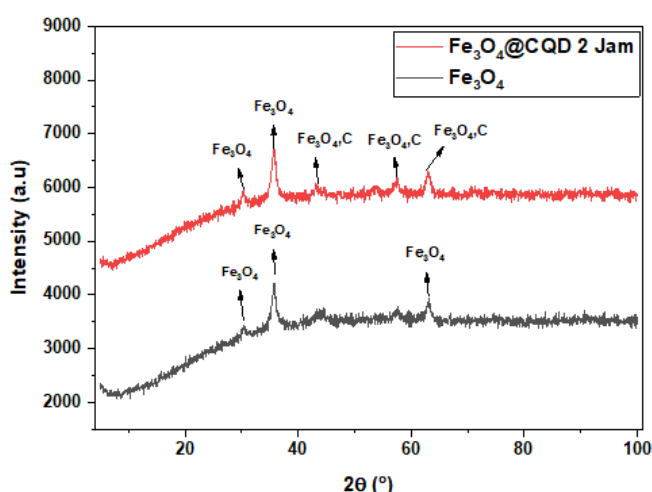
Ukuran kristal pada sampel nanokomposit Fe₃O₄@CQD dihitung menggunakan Persamaan Debye Scherrer yang didasarkan pada pelebaran puncak difraksi sinar-X. Secara matematis persamaan Debye Scherrer ditulis pada Persamaan 1.

$$D = \frac{K\lambda}{B \cos \theta} \quad (1)$$

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Analisis Struktur dan ukuran Kristal Nanokomposit Fe₃O₄@CQD

Karakterisasi XRD bertujuan untuk mengetahui struktur dan ukuran kristal nanopartikel berdasarkan grafik difraktogram seperti pada Gambar 1. Pola difraksi yang diperoleh dari hasil karakterisasi dibandingkan dengan pola difraksi yang terdapat pada data *International for Diffraction Database* (ICDD).



Gambar 1 Garafik hasil uji XRD Fe₃O₄ dan Fe₃O₄@ CQD variasi waktu hidrotermal 2 jam

Berdasarkan Gambar 1, Sampel Fe₃O₄ memiliki puncak difraksi paling tinggi pada sudut = 35,71°. Puncak difraksi hasil XRD dari sintesis Fe₃O₄ menunjukkan kemiripan dengan database ICDD (International Center For Diffraction Data) dengan kode referensi 01-075-0449 memiliki Struktur kristal yang dihasilkan yaitu *cubic spinel* dengan parameter kisi $a = b = c = 8,32000 \text{ \AA}$ dan $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$. Hal ini menunjukkan bahwa nanopartikel Fe₃O₄ yang terbentuk adalah Fe₃O₄ murni tanpa pengotor. Nanokomposit Fe₃O₄@CQD yang di hidrotermal selama 2 jam menunjukkan puncak difraksi $2\theta = 35,64^\circ$. Dibandingkan dengan hasil XRD Fe₃O₄ murni menunjukkan sedikit perubahan sudut pada puncak difraksi. Senyawa yang terbentuk dari hasil karakterisasi Fe₃O₄@CQD (2 jam) adalah senyawa Fe₃O₄ dan C. Pola XRD yang menunjukkan adanya puncak karbon yaitu pada sudut $2\theta = 41,3^\circ$, $2\theta = 57,6^\circ$, $2\theta = 63^\circ$. Sudut yang mengindikasikan adanya CQD yaitu berada pada $2\theta = 41,3^\circ$ dengan bidang *hkl* (100). Hal ini menunjukkan domain grafitik beraturan di dalam CQD. (Wu et al., 2017).

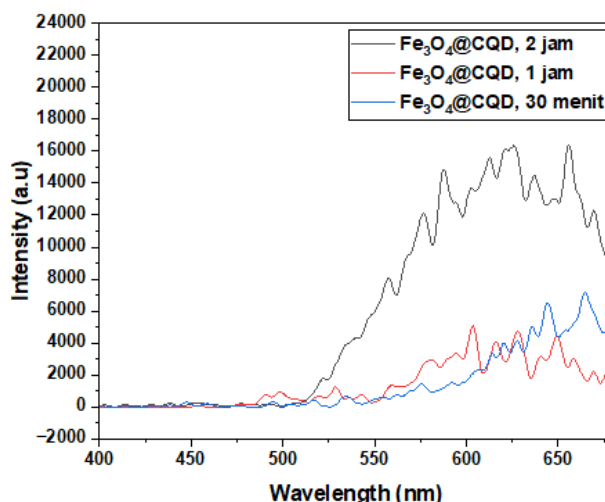
Tabel 1 Ukuran Kristal

Sampel	$\lambda(\text{nm})$	$B(^\circ)$	$\cos \theta$	$D(\text{nm})$
Fe ₃ O ₄	0,154	0,01131	17,855	22,48
Fe ₃ O ₄ .@CQD	0,154	0,00906	17,821	29,65

Tabel 1 menunjukkan bahwa Hasil ukuran kristal $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CQD}$ yang di hidrotermal selama 2 jam semakin besar ukuran kristal nanopartikel $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CQD}$. Hal ini menunjukkan penambahan CQD dapat meningkatkan ukuran kristal karena terbentuknya material selubung pada nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CQD}$ dimana CQD menutupi nanopartikel Fe_3O_4 sehingga mengakibatkan terjadinya perubahan ukuran kristal. (Novita & Astuti., 2023).

3.2 Analisis Hasil Uji Spektrokopi UV Fluoresensi

Uji Spektrokopi UV Fluoresensi ini dilakukan agar dapat melihat intensitas emisi, sampel yang di uji pada Spektrokopi UV Fluoresensi yaitu $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CQD}$ yang dihidrotermal selama 30 menit, 1 jam dan 2 jam.



Gambar 2 Grafik hasil Uji Spektrokopi UV Fluoresensi

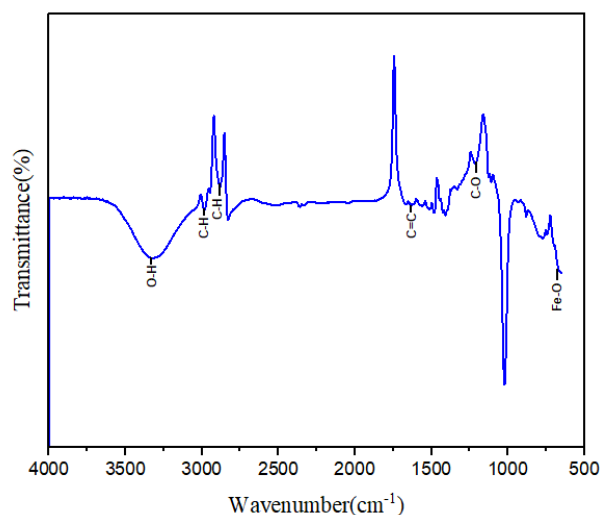
Berdasarkan hasil uji Spektrokopi UV fluoresensi, intensitas emisi fluoresensi dari nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CQD}$ mulai meningkat pada panjang gelombang 500 nm, emisi maksimum berada pada panjang gelombang sekitar 600-650 nm (cahaya *orange-merah*). Pada $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CQD}$ yang dihidrotermal selama 30 menit menunjukkan intensitas emisi yang rendah, lalu saat $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CQD}$ dihidrotermal selama 1 jam intensitas emisi mulai meningkat, dan pada saat proses hidrotermal yang dilakukan pada $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CQD}$ selama 2 jam intensitas emisi lebih tinggi ini dikarenakan proses sintesis lebih sempurna dimana jumlah CQD yang terbentuk lebih banyak, sehingga emisi meningkat. Peningkatan intensitas fluoresensi disebabkan oleh CQDs pada permukaan Fe_3O_4 . Ukuran CQD mempengaruhi sifat optiknya, dimana semakin kecil ukuran *Carbon Quantum Dots* (CQDs), semakin besar celah energi (*bandgap*) dan emisi bergeser ke panjang gelombang yang lebih pendek (biru), jika CQD yang lebih besar punya *bandgap* lebih kecil maka emisi bergeser ke panjang gelombang lebih panjang (merah) (Sousa et al., 2021).

Hasil ini menunjukkan waktu hidrotermal mempengaruhi pembentukan dan kuantitas CQD, lebih lama waktu hidrotermal lebih banyak CQD yang terbentuk dan lebih stabil menempel pada Fe_3O_4 , semakin lama waktu hidrotermal emisi semakin kuat (Saafie et al., 2023). Selain itu karakterisasi spektrokopi UV fluoresen menunjukkan munculnya beberapa puncak emisi pada sampel $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CQDs}$. Hal ini terjadi karena keberadaan berbagai pusat emisi yang berasal dari struktur inti karbon, permukaan nanopartikel, serta cacat permukaan. Selain itu, keberadaan gugus fungsi seperti O-H, dan C-O pada permukaan CQD menciptakan jalur rekombinasi yang berbeda, sehingga menghasilkan lebih dari satu puncak emisi. Oleh karena itu, munculnya banyak puncak fluoresensi pada spektrum ini merupakan indikasi bahwa material memiliki struktur permukaan yang kompleks dan aktif secara optik (Li et al., 2022).

3.3 Analisis Gugus fungsi Hasil FTIR

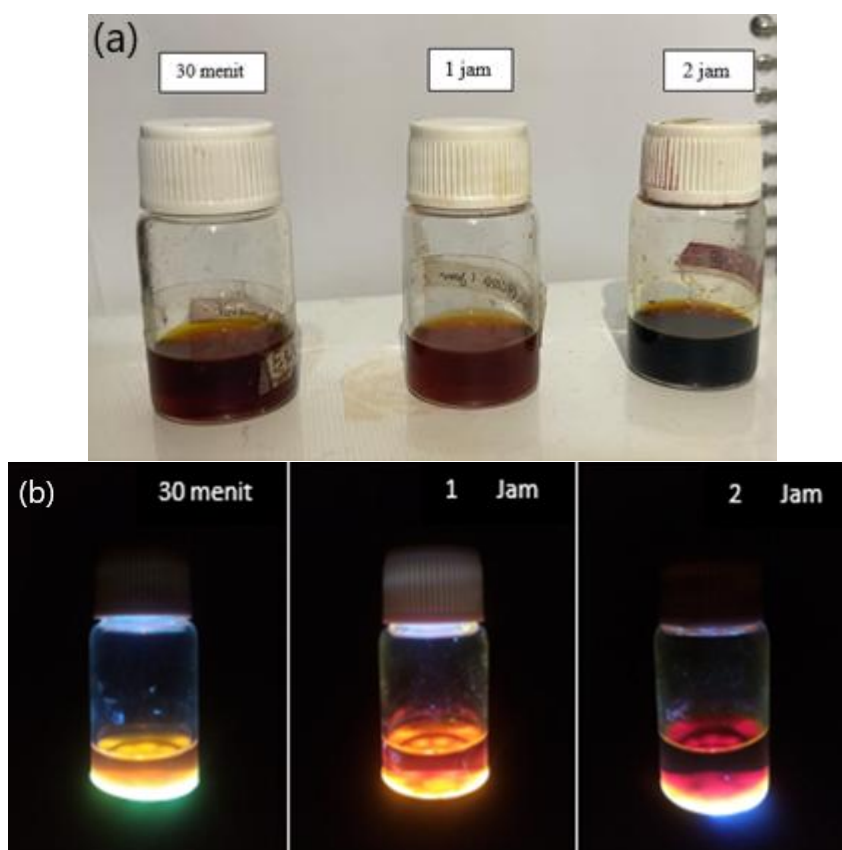
Pada hasil karakterisasi FTIR nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CQD}$ yang di hidrotermal selama 2 jam terdapat beberapa gugus fungsi. Berdasarkan gambar 3 nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CQD}$ yang di hidrotermal selama 2 jam menunjukkan bilangan gelombang 3320 cm^{-1} memiliki gugus fungsi O-H (hidroksil).

Puncak serapan pada bilangan gelombang 2982 cm^{-1} dan 2882 cm^{-1} memiliki gugus fungsi C-H, gugus fungsi C=C memiliki bilangan gelombang 1631 cm^{-1} , dan C-O memiliki bilangan gelombang 1216 cm^{-1} . Hal ini mengindikasikan telah terbentuknya CQD dengan metode hidrotermal, dimana C=C merupakan gugus fungsi terpenting dalam material CQD (J. J. Xu et al., 2023). Pada puncak serapan 650 cm^{-1} menunjukkan terbentuknya gugus fungsi Fe-O dimana gugus fungsi Fe-O merupakan karakteristik khas dari Fe_2O_3 (Syihabuddin, 2024).



Gambar 3 Grafik hasil uji FTIR

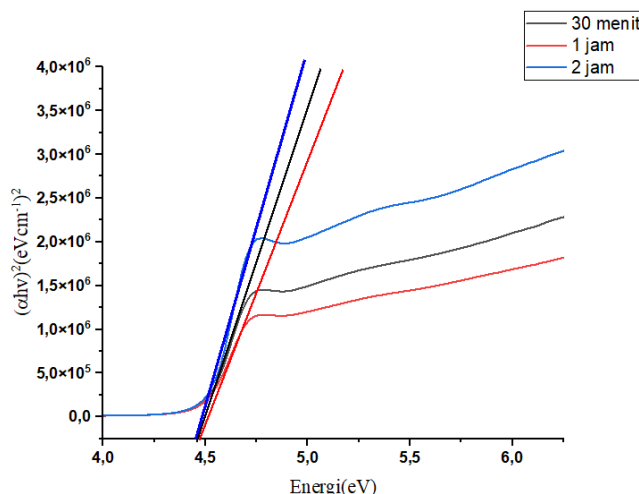
3.4 Analisis sifat optik $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CQD}$



Gambar 4 Larutan nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CQD}$ (a) Dibawah cahaya tampak dan (b) Dikenai sinar UV

Hasil larutan sintesis nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CQD}$ yang waktu sintesis hidrotermalnya divariasikan yaitu 30 menit, 1 jam dan 2 jam bewarna agak gelap dikarenakan adanya Fe_3O_4 dalam larutan tersebut dan adanya pendaran cahaya saat diberikan sinar UV mengindikasikan bahwa terdapat

CQD pada larutan tersebut. Hal ini terjadi karena CQD mempunyai sifat luminisens ketika disinari cahaya di sekitar panjang gelombang 330-460 nm (Roy et al., 2015). Serapan terhadap cahaya dari nanokomposit Fe₃O₄@CQD dikarakterisasi menggunakan spektrofotometer UV-Vis untuk mengetahui puncak absorbansi. Hasil pengukuran celah pita energi nanokomposit Fe₃O₄@CQD terlihat seperti pada Gambar 5.



Gambar 5 Nilai celah pita energi Fe₃O₄@CQD

Hasil uji UV Vis menunjukkan bahwa nanokomposit Fe₃O₄@CQD memiliki spektrum absorbansi pada daerah UV yaitu pada rentang panjang gelombang 266-1000 nm, puncak absorbansi nanokomposit Fe₃O₄@CQD pada variasi waktu hidrotermal 30 menit memiliki puncak absorbansi pada gelombang 340 nm, sedangkan pada variasi waktu 1 jam puncak absorbansi nya pada gelombang 345 nm, pada variasi waktu 2 jam puncak absorbansi terdapat pada gelombang 336 nm. Puncak absorbansi pada grafik UV-Vis tersebut menunjukkan bahwa semua sampel mengalami transisi elektronik (eksitasi) akibat menyerap energi dari panjang gelombang UV. Penyerapan tersebut terjadi karena energi dari sinar UV pada panjang gelombang tertentu sama dengan energi eksitasi dari elektron sampel. Transisi elektronik yang terjadi merupakan eksitasi elektron pada *Highest Occupied Molecular Orbital* (HOMO) ke tingkat energi *Lowest Unoccupied Molecular Orbital* (LUMO) (Aderne et al., 2022).

Intensitas absorbansi Fe₃O₄@CQD menunjukkan pada variasi waktu 1 jam terjadi interaksi optimal antara Fe₃O₄ dan CQD sehingga terbentuk lebih banyak penyerapan cahaya. Pada variasi waktu 2 jam intensitas menurun, kemungkinan terjadi agregasi atau saturasi CQD sehingga intensitas absorbansi sedikit menurun (Kumar et al., 2022). Berdasarkan Gambar 5 (a) nilai celah pita energi nanopartikel Fe₃O₄@CQD pada variasi waktu 30 menit, 1 jam dan 2 jam berturut-turut yaitu 4,48 eV, 4,46 eV, 4,41 eV. Nilai bandgap dari Fe₃O₄@CQDs yang diperoleh >4 eV menunjukkan bahwa sifat optiknya didominasi oleh lapisan *Carbon Quantum Dots* (CQDs), bukan oleh inti Fe₃O₄, Dimana CQD berukuran nano memiliki bandgap lebar antara 4–6 eV akibat efek *quantum confinement* (Li et al., 2023). Nilai celah pita energi terkecil dimiliki oleh Fe₃O₄@CQD dengan variasi waktu 2 jam. Lamanya waktu hidrotermal menyebabkan terjadinya perubahan nilai celah pita energi namun tidak merubah nilai celah pita energi secara signifikan.

IV. KESIMPULAN

Nanokomposit Fe₃O₄@CQD berhasil disintesis menggunakan metode hidrotermal dengan variasi waktu reaksi. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa ukuran kristal Fe₃O₄@CQD 29,65 nm lebih besar dibandingkan dengan ukuran kristal dari Fe₃O₄ yaitu 22,48 karena penambahan CQD dapat menutupi nanopartikel Fe₃O₄ sehingga mengakibatkan terjadinya perubahan ukuran kristal. Waktu yang digunakan saat proses hidrotermal mempengaruhi ukuran kristal dan intensitas fluoresensi material. Nanokomposit dengan waktu hidrotermal 2 jam menghasilkan emisi paling kuat pada 600–650 nm yang menampilkan warna pendaran jingga-merah. Celah pita energi Fe₃O₄@CQD diperoleh pada variasi waktu hidrotermal 30 menit, 1 jam dan 2 jam berturut-turut yaitu 4,48 eV, 4,46 eV, 4,41 eV.

Peningkatan waktu hidrotermal. Berdasarkan hasil karakterisasi material magnetik luminisen Fe₃O₄ @ CQD berpotensi besar untuk dikembangkan dalam aplikasi *bioimaging*.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, M. (2009). *Pengantar Nanosains*. Intitut Teknologi Bandung(ITB).
- Aderne, R. E., Borges, B., Avila, H. C., Kieseritzky, F. Von, Hellberg, J., Koehler, M., Cremona, M., Roman, L. S., Araujo, C. M., Rocco, L. M., & Marchiori, C. F. N. (2022). On the energy gap determination of organic optoelectronic materials : the case of porphyrin. *Materials Advances*, 1791–1803. <https://doi.org/10.1039/d1ma00652e>
- Astuti, Arief S, Muldarisnur M, Zulhadjri. Green Synthesis of Fe₃O₄@CDs Nanocomposites and its Performance on Optical and Magnetic Properties. *Evergreen*. 2024;11(2):673–81.
- Dhariwal, J., & Rao, G. K. (2024). Sustainability of carbon quantum dots as an innovative and eco friendly solution for metal ion sensing and monitoring. *RSC Sustainability*, 11–36. <https://doi.org/10.1039/d3su00375b>
- Fatimah, S., Isnaeni, & Tahir, D. (2017). Sintesis dan Karakterisasi Fotoluminisens Carbon Dots Berbahan Dasar Organik dan Limbah Organik. *Positron*, 7(2), 37–41.
- Fini, S. A. F., Niasari, M. S., & Ghanbari, D. (2018). Hydrothermal green synthesis of magnetic Fe(3)O(4)-carbon dots by lemon and grape fruit extracts and as a photoluminescence sensor for detecting of E. coli bacteria. *Spectrochimica Acta. Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 203, 481–493. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.06.021>
- Hasrudin, A., Abidin, Z., Hidayati, N., & Prajaputra, V. (2020). Hydrothermal synthesis of multi-color fluorescent carbon dots from sappan wood (caesalpinia sappan) as an acid-base indicator. *Revista de Chimie*, 71(8), 106–112. <https://doi.org/10.37358/RC.20.8.8285>
- Keshri, S., & Biswas, S. (2022). Synthesis , physical properties , and biomedical applications of magnetic nanoparticles : a review. *Progress in Biomaterials*, 11(4), 347–372. <https://doi.org/10.1007/s40204-022-00204-8>
- Koutsogiannis, P., Thomou, E., Stamatis, H., Goumis, D., & Rudolf, P. (2020). Advances in fluorescent carbon dots for biomedical applications. *Advances in Physics: X*, 5(May). <https://doi.org/10.1080/23746149.2020.1758592>
- Kumar, P., Dua, S., Kaur, R., Kumar, M., & Bhatt, G. (2022). A review on advancements in carbon quantum dots and their application in photovoltaics Pawan. *RSC Advances*, 11(11), 4714–4759. <https://doi.org/10.1039/d1ra08452f>
- Lee, S., Park, C. S., & Yoon, H. (2022). Nanoparticulate Photoluminescent Probes for Bioimaging: Small Molecules and Polymers. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(9). <https://doi.org/10.3390/ijms23094949>
- Li, P., Xue, S., Sun, L., Zong, X., An, L., & Qu, D. (2022). Formation and fluorescent mechanism of red emissive carbon dots from o -phenylenediamine and catechol system. *Light: Science & Applications*, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41377-022-00984-5>
- Li, Y., Zhang, X., Chen, J., Liu, Q., Wang, S., & Zhao, H. (2023). Tunable optical bandgap and surface functionality of carbon quantum dots for optoelectronic applications. *Green Chemistry*, 25(3), 1324–1338. <https://doi.org/10.1039/D2GC03160D>
- Mursal, I. L. (2018). Karakterisasi XRD dan SEM Pada Material Nanopartikel Serta Peran Material Nanopartikel Dalam Drug Delivery System. *Jurnal Sains dan Ilmu Farmasi*, 3, 214–221. <https://doi.org/10.36805/jpx.v3i2.491>
- Novita, D., & Astuti. (2023). Sintesis dan Karakterisasi Sifat Optik Nanokomposit Fe₃O₄ @ CQD (Carbon Quantum Dots). *Jurnal Fisika Unand*, 12(2), 311–316. <https://doi.org/10.25077/jfu.12.2.311-316.2023>
- Prasad, S., Mandal, I., Singh, S., Paul, A., Mandal, B., Venkatramani, R., & Swaminathan, R. (2017). Chemical Science Near UV-Visible electronic absorption originating from charged amino acids in a monomeric protein . *Chemical Science*, 8, 5416–5433. <https://doi.org/10.1039/C7SC00880E>

- Roy, P., Chen, P.-C., Periasamy, A. P., Chen, Y.-N., & Chang, H.-T. (2015). Photoluminescent carbon nanodots: synthesis, physicochemical properties and analytical applications. *Materials Today*, 18(8), 447–458. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.04.005>
- Saafie, N., Sambudi, N. S., Dzul, M., & Wirzal, H. (2023). Effect of Hydrothermal Conditions on Kenaf-Based Carbon Quantum Dots Properties and Photocatalytic Degradation. *separations*.
- Sambudi, N. S., Mulia, M. G., Khayrani, A. C., Isnaeni, Raviadaran, R., Aziz, F., Permana, D. D., Suwandi, R., & Lischer, K. (2025). Production of Carbon Quantum Dots Based on Oil Palm Fronds for Polyethylene and Polyethylene Terephthalate Microplastics Detection. *International Journal of Technology*, 16(1), 233–242. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v16i1.7376>
- Sousa, H. B. A., Martins, C. S. M., & Prior, J. A. V. (2021). You don't learn that in school: An updated practical guide to carbon quantum dots. *Nanomaterials*, 11(3), 1–88. <https://doi.org/10.3390/nano11030611>
- Syihabuddin, D. M., & Munasir, M. (2024). Green Synthesis Nanopartikel Fe₃O₄ Dengan Bioreduktor Ekstrak Daun Mimba (*Azadirachta Indica*): Aplikasi Sebagai Material Fotokatalis Degradasi Methylene Blue. *Inovasi Fisika Indonesia*, 13(3), 118–123. <https://doi.org/10.26740/ifi.v13n3.p118-123>
- Wu, P., Li, W., Wu, Q., Liu, Y., & Liu, S. (2017). Hydrothermal synthesis of nitrogen-doped carbon quantum dots from microcrystalline cellulose for the detection of Fe³⁺ ions in an acidic environment. *RSC Advances*, 7(70), 44144–44153. <https://doi.org/10.1039/c7ra08400e>
- Xu, J. J., Lu, Y. N., Tao, F. F., Liang, P. F., & Zhang, P. A. (2023). ZnO Nanoparticles Modified by Carbon Quantum Dots for the Photocatalytic Removal of Synthetic Pigment Pollutants. *ACS Omega*, 8(8), 7845–7857. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07591>
- Zhang, Z., Fang, Y., Zhuo, L., Yuan, H., & Zhang, L. (2022). Reduced graphene oxide wrapped Fe₃O₄@TiO₂ yolk-shell nanostructures as a magnetic recyclable photocatalytic antibacterial agent. *Journal of Alloys and Compounds*, 904, 164001. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164001>