Jurnal Fisika Unand (JFU)
Vol. 15, No. 3, Mei 2026, hal. 323 – 330
ISSN: 2302-8491 (Print); 2686-2433 (Online)
https://doi.org/10.25077/jfu.15.3.323-330.2026

Open Access

Sintesis dan Karakterisasi Struktur dan Sifat Fluoresensi Nanokomposit Fe_3O_4/CQD@ZIF-8

Chika Yandora, Astuti*, Dwi Puryanti
Laboratorium Fisika Material, Departemen Fisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Andalas,
Kampus Unand Limau Manis,Padang, 25163, Indonesia.

Info Artikel

Histori Artikel:
Diajukan: 25 Januari 2026
Direvisi: 13 April 2026
Diterima: 30 Mei 2026

Kata kunci:
CQD
Fe_3O_4
Magnetik-luminisensi
Pelapisan
ZIF-8

ABSTRAK

Perkembangan nanoteknologi mendorong pengembangan material multifungsional, salah satunya nanokomposit magnetik-luminisensi yang menggabungkan sifat magnetik dan fluoresensi dalam satu sistem. Material berpotensi dalam aplikasi biomedis, khususnya *bioimaging*. Nanopartikel Fe_3O_4 banyak digunakan sebagai material magnetik karena bersifat biokompatibel dan toksisitas rendah, sedangkan Carbon Quantum Dot (CQD) digunakan sebagai material luminisensi karena memiliki fluoresensi yang kuat, fotostabilitas yang tinggi, dan bersifat non-toksik. Namun, nanokomposit Fe_3O_4/CQD memiliki kekurangan berupa aglomerasi partikel serta efek quenching. Untuk mengatasi masalah tersebut, dilakukan enkapsulasi menggunakan *Zeolitic Imidazolate Framework*-8 (ZIF-8) yang memiliki sifat biokompatibel, biodegradable, dan memiliki struktur berpori. Dalam penelitian ini disintesis nanokomposit Fe_3O_4/CQD@ZIF-8 melalui metode *in situ self-assembly* pada suhu ruang. Hasil XRD menunjukkan bahwa nanokomposit Fe_3O_4/CQD memiliki ukuran kristal 16,7 nm sedangkan ukuran kristalit nanokomposit Fe_3O_4/CQD setelah dilapisi menggunaka ZIF-8 sebesar 25 nm. Analisis FTIR mengonfirmasi mengonfirmasi keberadaan gugus fungsi khas seperti Fe-O, C-N, C=N, Zn-N, dan O-H. Uji fluoeresensi memperlihatkan peningkatan intensitas emisi pada rentang 550–600 nm. Hasil ini menunjukkan bahwa pelapisan ZIF-8 mampu mengurangi interaksi langsung dan meningkatkan stabilitas nanokomposit untuk aplikasi bioimaging.

Keywords:
CQD
Encapsulation
Fe_3O_4
Magnetc-luminescent
ZIF-8

Penulis Korespondensi:
Astuti
Email: astuti@sci.unand.ac.id

Advances in nanotechnology are driving the development of multifunctional materials, one of which is magnetic-luminescent nanocomposites that combine magnetic and fluorescent properties in a single system. These materials hold great potential for biomedical applications, particularly in bioimaging. Fe_3O_4 nanoparticles are widely used as magnetic materials due to their biocompatibility and low toxicity, while Carbon Quantum Dots (CQDs) are used as luminescent materials because they exhibit strong fluorescence, high photostability, and are non-toxic. However, Fe_3O_4/CQD nanocomposites suffer from particle agglomeration and quenching effects. To address these issues, encapsulation was performed using Zeolitic Imidazolate Framework-8 (ZIF-8), which possesses biocompatible, biodegradable properties, and high surface area and porosity. In this study, Fe_3O_4/CQD@ZIF-8 nanocomposites were synthesized. Coating with ZIF-8 is expected to act as a protective layer that has the potential to reduce agglomeration and minimize the quenching effect. The crystalline structure and functional groups of the material were characterized using X-ray Diffraction (XRD) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), while its optical properties were analyzed using fluorescence spectroscopy.

Copyright © 2026 Author(s).

I. PENDAHULUAN

Dalam beberapa dekade terakhir, kemajuan nanoteknologi telah membuka banyak peluang untuk pengembangan material multifungsional yang menggabungkan dua atau lebih sifat suatu material dalam satu sistem. Salah satu material multifungsional yang banyak dikembangkan adalah material nanokomposit magnetik-luminisensi (Ganguly and Margel 2023). Material nanokomposit magnetik-luminisensi merupakan material yang menggabungkan sifat magnetik dan sifat fluoresensi dalm satu sistem, sehingga berpotensi diaplikasikan pada bidang biomedis, seperti bioimaging, untuk deteksi dini kanker dan terapi kanker (Rajabzadeh et al. 2025).

Material magnetik-luminisensi berbasis Fe_3O_4 merupakan salah satu material yang banyak dikembangkan karena memiliki toksisitas yang rendah dan bersifat biokompatibel, sehingga relatif aman digunakan untuk aplikasi biomedis dibandingkan dengan material magnetik-luminisensi berbasis gadolinium (Gd_2O_3) yang memiliki toksisitas yang lebih tinggi (Blomqvist et al. 2022). Untuk memberikan sifat luminisensi, salah satu material luminisensi yang berpotensi untuk dikembangkan adalah Carbon Quantum Dot (CQD) yang dapat disintesis dari bahan-bahan alam. CQD memiliki ukuran partikel kuran dari 10 nm, fluoresensi yang kuat, fotostabilitas yang tinggi, non-toksisitas, dan biokompabilitas yang sangat baik (Salvi et al. 2024). Sifat unggul ini menjadikan CQD sebagai alternatif yang menjanjikan dalam aplikasi bioimaging berbasis material magnetik.

Penelitian sebelumnya telah berhasil mengembangkan nanokomposit magnetik-luminisensi Fe_3O_4/CQD serta mengkaji pengaruh metode hidrotermal terhadap sifat optik fluoresensinya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Fe_3O_4/CQD dengan waktu reaksi 2 jam menghasilkan intensitas fluoresensi paling kuat pada rentang panjang gelombang 600-650 nm, yang menampilkan warna pendaran jingga-merah (Rafsanjani and Astuti 2025). Akan tetapi, material Fe_3O_4/CQD masih memliki beberapa keterbatasan. Salah satu permasalahan utama adalah rendahnya stabilitas dispersi dalam pelarut air, karena nanopartikel Fe_3O_4 cenderung mengalami aglomerasi akibat interaksi dipol magnetik antar partikel, energi permukaan yang tinggi akibat ukuran partikel yang sangat kecil, dan adanya gaya van der Waals antar nanopartikel (Herbei et al. 2025). Selain masalah aglomerasi, terjadinya *fluoresensi quenching* akibat interaksi langsung antara inti magnetik dan material luminisensi yang menyebabkan penurunan intensitas emisi cahaya akibat transfer energi non-radiatif, sehingga menurunkan performa optik material. Oleh karena itu, diperlukan upaya modifikasi permukaan nanokomposit Fe_3O_4/CQD dengan cara melapisi permukaan dengan sejenis material biodegradable dan biokompatibel yaitu material kerangka Zeolitic Imadozalte-8 (ZIF-8).

Kerangka imidazolat zeolitik-8 (ZIF-8) adalah subkelas *metal-organic frameworks* (MOF). Enkapsulasi material magnetik dengan ZIF-8 dilaporkan dapat digunakan sebagai zat kontras dalam bioimaging (Lin et al. 2019). ZIF-8 mencakup banyak sifat, seperti struktur berpori, biodegradabilitas, biokompatibel, efisiensi pemuatan tinggi, ukuran pori yang dapat disesuaikan, luas permukaan spesifik yang besar, keragaman topologi, dan fungsionalitas yang mudah (Xue et al. 2019). Struktur berpori dapat bertindak sebagai penghalang fisik di antara nanopartikel Fe_3O_4 dan CQD, sehingga dapat mengurangi interaksi langsung antara komponen magnetik dan luminisensi.

Pada penelitian ini disintesis nanokomposit magnetik-luminisensi Fe_3O_4/CQD@ZIF-8 melalui *in-situ self-assembly*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis struktur dari nanokomposit Fe_3O_4/CQD yang dilapisi dengan ZIF-8 serta sifat optiknya. Struktur kristalin dan gugus fungsi dari material dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), sedangan sifat optik dianalisis menggunakan spektroskopi fluoresensi. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat memberikan konstribusi terhadap pengembangan material nanokomposit magnetik-luminisensi untuk aplikasi bioimaging.

II. METODE

2.1 Sintesis Fe_3O_4

Nanopartikel Fe_3O_4 disintesis menggunakan metode kopresipitasi. Sebanyak 2,03 g $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ dan 1,04 g $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ dilarutkan ke dalam 30 ml air suling (aquades). Larutan kemudian diaduk menggunakan *magnetic stirrer* pada suhu 60℃. Selanjutnya, sebanyak 30 ml NH_4OH ditambahkan secara perlahan ke dalam larutan menggunakan pipet tetes sambil terus diaduk hingga mencapai pH larutan 11. Setelah pH larutan tercapai, proses pengadukan dilanjutkan selama 3 jam pada suhu tetap

60℃. Endapan Fe_3O_4 yang terbentuk kemudian dipisahkan menggunakan medan magnet permanen. Endapan Fe_3O_4 dicuci sebanyak 3 kali menggunakan aquades untuk menghilangkan sisa amonia. setelah proses pencucian, endapan Fe_3O_4 dikeringkan menggunakan furnace pada suhu 150˚C selama 5 jam. Endapan yang sudah kering selanjutnya digerus hingga menjadi serbuk Fe_3O_4.

2.2 Sintesis CQD

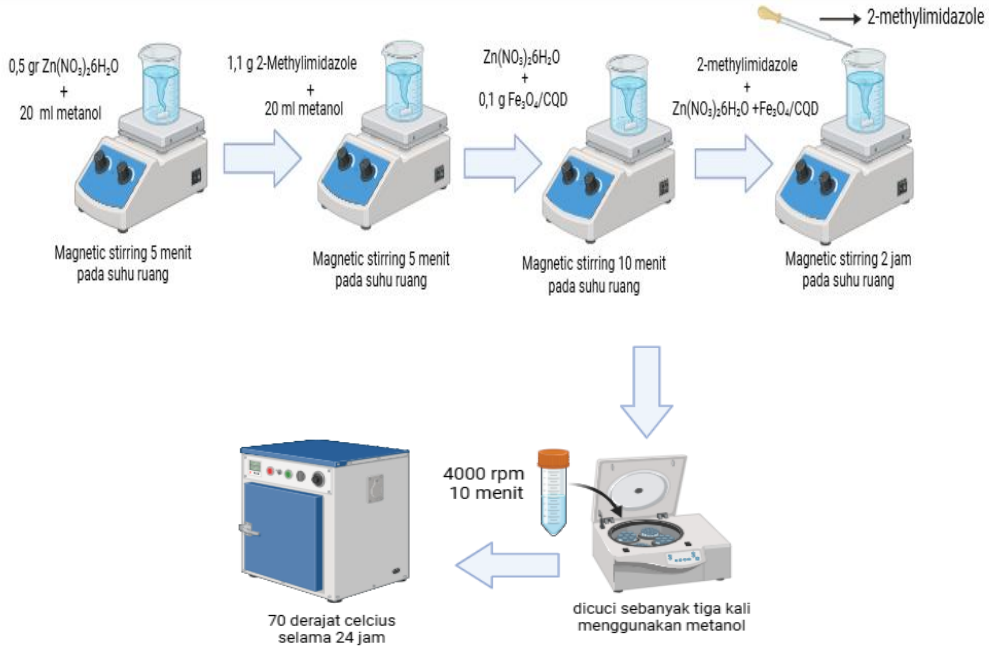
Sintesis CQD dilakukan menggunakan metode solvotermal. Sebanyak 0,2 g serbuk kayu secang dilarutkan ke dalam 30 ml alkohol 96% dan diaduk selama 30 menit pada suhu ruang. Larutan kemudian disaring menggunakan kertas saring untuk memperoleh ekstrak kayu secang. Larutan ekstrak kayu secang yang diperoleh, dimasukkan ke dalam wadah teflon autoklaf dan dipanaskan menggunakan oven pada suhu 150℃ selama 8 jam untuk proses solvotermal.

2.3 Sintesis Nanokomposit Fe_3O_4/CQD

Sintesis nanokomposit Fe_3O_4/CQD dilakukan dengan menggunakan metode sonikasi dengan frekuensi ultrasonic 42kHz. Sebanyak 0,4 g Fe_3O_4 didispersikan ke dalam 20 ml CQD, kemudian disonikasi selama 10 menit. Endapan nanokomposit Fe_3O_4/CQD dipisahkan menggunakan medan magnet permanen. Endapan yang diperoleh selanjutnya dikeringkan menggunakan oven pada suhu 80℃ selama 2 jam.

2.4 Sintesis pelapisan Nanokomposit Fe_3O_4/CQD dengan ZIF-8

Pelapisan nanokomposit Fe_3O_4/CQD dengan ZIF-8 dilakukan dengan menggunakan metode *in-situ self assembly* pada suhu ruang. Sebanyak 0,5 g $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ dilarutkan ke dalam 20 ml metanol dan diaduk hingga homogen. Secara terpisah, 1,1 g 2-methylimidazole dilarutkan ke dalam 20 ml metanol dan diaduk hingga homogen. Selanjutnya sebanyak 0,1 g Fe_3O_4/CQD ditambahkan ke dalam larutan $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ kemudian campuran diaduk selama 10 menit. Larutan 2-methylimidazole ditambahkan secara perlahan ke dalam campuran larutan Fe_3O_4/CQD dan $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ menggunakan pipet tetes sambil terus diaduk. Setelah penambahan larutan 2-methylimidazole selesai, proses pengadukan dilanjutkan selama 2 jam pada suhu ruang. Endapan Fe_3O_4/CQD yang sudah dilapisi ZIF-8 diperoleh dengan proses sentrifugasi pada kecepatan 4000 rpm selama 10 menit. Endapan selanjutnya dicuci sebanyak tiga kali menggunakan metanol. Endapan yang diperoleh dikeringkan menggunakan oven pada suhu 70℃ selama 24 jam. Endapan yang sudah dikeringkan kemudian digerus sehingga membentuk serbuk nanokomposit Fe_3O_4/CQD@ZIF-8. Skema pelapisan nanokomposit Fe_3O_4/CQD dengan ZIF-8 ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Skema pelapisan nanokomposit Fe_3O_4/CQD dengan ZIF-8

Ukuran rata-rata nanopartikel ZIF-8 dihitung menggunakan persamaan *Debye Scherrer*, yang menghubungkan *Full Width at Hall Maximum* (FWHM) dari puncak XRD dengan ukuran nanopartikel melalui rumus *Debye-Scherrer* ditulis oleh persamaan 1.

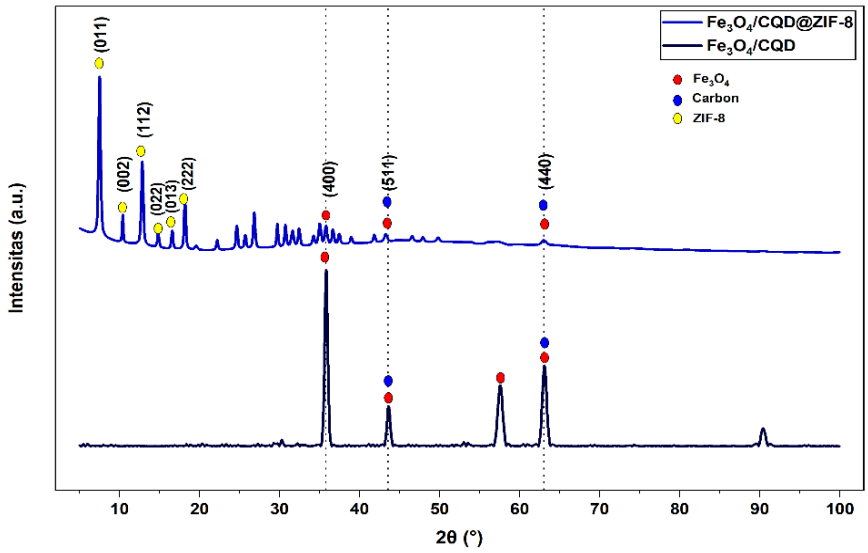
$$D = \frac{K\lambda}{B\cos\theta} \quad (1)$$

dengan :
D : ukuran kristal (nm)
λ : panjang gelombang sinar-X
K : shape factor (0,9 - 1)
B : FWHM (*Full Width at Hall Maximum*) (°)
$\cos\theta$: sudut antara sinar datang dengan bidang normal

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Analisis Struktur Kristal Nanokomposit Fe_3O_4/CQD@ZIF-8

Analisis pola XRD pelapisan nanokomposit Fe_3O_4/CQD@ZIF-8 dilakukan dengan membandingkan pola difraksi XRD antara sampel nanokomposit Fe_3O_4/CQD dan Fe_3O_4/CQD@ZIF-8. Pola difraksi yang diperoleh dari hasil pengujian dapat dilihat pada gambar 3. Analisis pola XRD akan dilakukan dengan membandingkan pola difraksi hasil dari pengujian dengan pola difraksi yang terdapat pada data *Internasional for Diffraction Database* (ICDD).



Gambar 2 Grafik hasil uji XRD pelapisan nanokomposit Fe_3O_4/CQD@ZIF-8

Berdasarkan pola difraksi XRD pada gambar 2, nanokomposit Fe_3O_4/CQD menunjukkan puncak difraksi yang tajam dan intens, yang mengindikasikan tingkat kristalinitas yang baik. Sampel Fe_3O_4/CQD menunjukkan puncak pada sudut 2θ = 35,80°, 43,58°, 57,52°, 63,03° dengan bidang *hkl* (400), (511), (440) , yang merupakan karakteristik struktur spinel kubik dari Fe_3O_4 (JCPS No.19-0629). Keberadaan Carbon Quantum Dot (CQD) dalam nanokomposit ditunjukkan oleh munculnya puncak pada sudut 2θ = 43,58° dengan bidang *hkl* (100) yang berkaitan dengan karbon grafit. Namun puncal tersebut juga berimpit dengan bidang hkl (400) dari Fe_3O_4, sehingga dapat dianggap sebagai puncak tumpang tindih (overlapping peak) (Zaca-Moran et al. 2024). Ukuran kristal dihitung menggunakan persamaan *scherrer* yang ditulis pada persamaan 1. Berdasarkan persamaan tersebut, ukuran rata-rata kristalit Fe_3O_4/CQD diperoleh sebesar 16,7 nm.

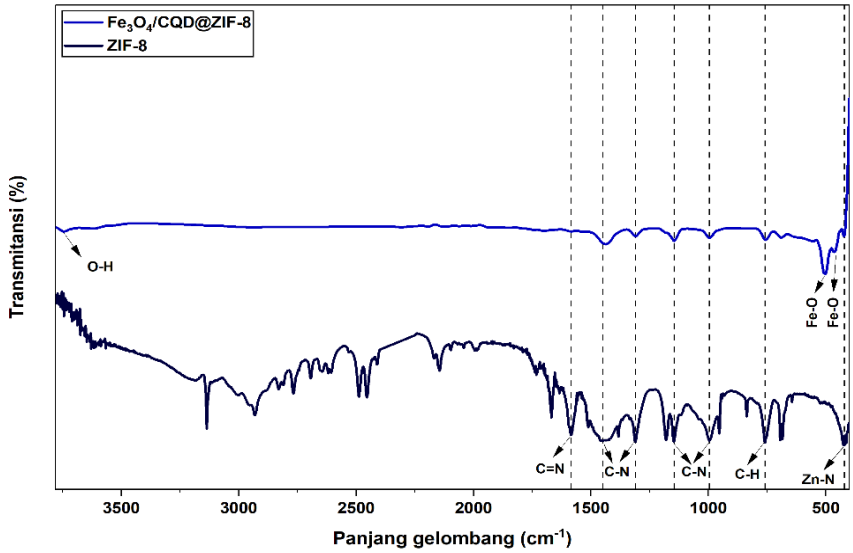
Sampel Fe_3O_4/CQD yang dilapisi dengan ZIF-8 menunjukkan terjadinya penurunan intensitas puncak Fe_3O_4. serta munculnya puncak-puncak baru pada sudut 2θ = 7,27°, 10,31°, 12,65°, 14,63°, 16,38°, 17,96°. Puncak ini merupakan puncak khas karakteristik struktur kristalin dari kerangka logam

organik ZIF-8 (Li et al., 2022). Penurunan intensitas puncak Fe_3O_4 menunjukkan bahwa lapisan ZIF-8 berhasil menutupi permukaan Fe_3O_4/CQD, sehingga difraksi dari inti magnetik berkurang. Selain itu keberadaan karbon juga masih terdeteksi pada sekitar $2\theta = 43{,}23°$.

Dengan demikian, analisis XRD mengonfirmasi bahwa sintesis pelapisan nanokomposit Fe_3O_4/CQD@ZIF-8 melalui metode *in-situ self assembly* berhasil dilakukan. Ukuran kristal nanokomposit setelah dilakukan pelapisan berdasarkan persamaan *scherrer* adalah 25 nm. Hal ini menunjukkan ukuran kristal nanokomposit Fe_3O_4/CQD setelah dilapisi semakin besar, karena terbentuknya material selubung pada dimana ZIF-8 menutupi nanokomposit Fe_3O_4/CQD sehingga mengakibatkan terjadiya perubahan ukuran kristalit.

3.2 Analisis Gugus Fungsi Nanokomposit Fe_3O_4/CQD@ZIF-8

Karakterisasi FTIR dilakukan untuk mengetahui gugus fungsi pada nanokomposit yang dilapisi dengan ZIF-8. Pelapisan nanokomposit Fe_3O_4/CQD dengan ZIF-8 yang berhasil disintesis menunjukkan adanya puncak-puncak transmisi yang berkaitan dengan energi vibrasi Fe_3O_4, CQD, dan ZIF-8 yang ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3 Pola FTIR ZIF-8 dan nanokomposit

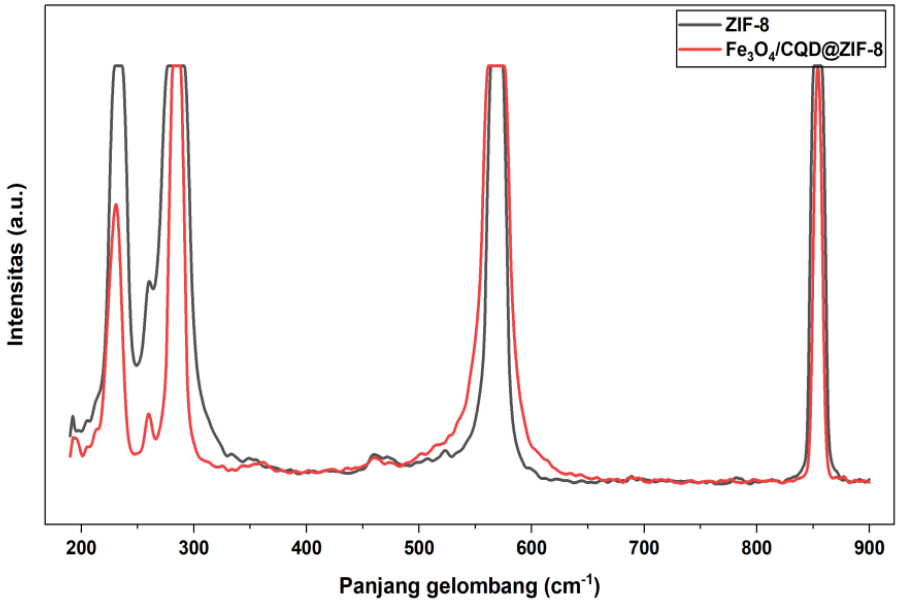
ZIF-8 yang berhasil disintesis menunjukkan beberapa puncak serapan karakteristik pada spektrum FTIR. Puncak pada 420 cm^{-1} yang menunjukkan adanya *stretching vibrations* Zn-N yang menandakan terbenuknya ikatan koordinasi antara ion Zn^+ dengan atom nitrogen dari ligan 2-methylimidazole. Puncak pada 758,04 cm^{-1} dikaitkan dengan *bending vibration* C-H dari cicin imidazole. Puncak serapan 995,3 cm^{-1} dan 1145,74 cm^{-1} menunjukkan *bending vibration* C-N pda struktur imidazole. Puncak serapan pada 1584,55 cm^{-1} berkaitan dengan *bending vibration* C=N dari cicin imidazole. Puncak-puncak serapan tersebut sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh (Aulia et al. 2020). Munculnya puncak-puncak ini mengindikasikan bahwa ligan 2-methylimidazole telah berhasil berkoordinasi dengan ion Zn^{2+} membentuk kerangka kristalin ZIF-8.

Puncak serapan karakteristik setelah dilakukan pelapisan nanokomposit Fe_3O_4/CQD dengan ZIF-8 terdapat puncak serapan khas dari ZIF-8 dan puncak serapan dari Fe-O. Keberadaan gugus fungsi Fe-O dikonfirmasi oleh munculnya pita serapan kuat pada rentang 462 cm^{-1} dan 501 cm^{-1}, yang masing-masing berkaitan dengan getaran regangan Fe-O pada situs tetrahedral dan oktahedral dalam struktur spinel magnetit Fe_3O_4 (Jain and Gulati 2023). Munculnya dua pita ini menunjukkan bahwa fase Fe_3O_4 tetap terjaga dengan baik meskipun dilapisi oleh ZIF-8.

Keberadaan gugus fungsi karbon dari CQD ditunjuk oleh pita serapan pada 1584,55 cm^{-1} yang berpotensi mengalami tumpang tindih dengan vibrasi C=N dari ZIF-8. Selain itu, pita pada 995,3 cm^{-1} dan 1145,74 cm^{-1} juga dapat berasal dari kontribusi CQD (Shen et al. 2025). Pita serapan 3745 cm^{-1} menunjukkan gugus fungsi O-H. Hal ini menunjukkan adanya struktur karbon yang berperan dalam sifat fluoresensi material.

3.3 Analisis Sifat Optik Fluoresensi Nanokomposit Fe_3O_4/CQD@ZIF-8

Karakterisasi sifat optik dilakukan menggunakan spektroskopi UV-Fluoresensi untuk mengevaluasi perubahan karakteristik emisi material setelah proses pelapisan.



Gambar 4 Spektrum UV-Fluoresensi nanokomposit Fe_3O_4/CQD@ZIF-8

Berdasarkan spektrum UV-Fluoresensi yang diperoleh, terlihat bahwa pada daerah panjang gelombang 200 nm – 300 nm, intensitas emisi ZIF-8 murni lebih tinggi dibandingkan nanokomposit Fe_3O_4/CQD@ZIF-8. Hal ini menunjukkan bahwa ligan organik pada ZIF-8 lebih menyerap kuat energi UV melalui transisi elektronik $\pi - \pi^*$. Puncak emisi yang muncul pada 500 nm-600 nm menunjukkan karakteristik khas dari CQD yang berasal dari emisi akibat *defect surface states* dan keberadaan gugus fungsi seperti C=O dan C-N (Kumar, Kumar, and Gathania 2022). Pada rentang ini, puncak terlihat terpotong karena sampel CQD terlalu pekat sehingga intensitas fluoresensinya sangat tinggi dan tidak dapat terdeteksi oleh spektrofotometer UV-fluoresensi.

Pada daerah emisi utama sekitar 550 nm-600 nm, menunjukkan sampel Fe_3O_4/CQD@ZIF-8 memiliki intensitas puncak yang sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan intensitas puncak pada ZIF-8. Selain itu terlihat adanya pelebaran puncak emisi pada sampel Fe_3O_4/CQD@ZIF-8. Hal ini disebabkan karena pada nanokomposit terjadi adanya interaksi antara Fe_3O_4, CQD, dan ZIF-8 yang menyebabkan variasi energi emisi menjadi lebih luas. Hasil ini menunjukkan bahwa nanokomposit Fe_3O_4/CQD yang dilapisi menggunakan kerangka logam organik ZIF-8 tetap mempertahankan sifat optiknya meskipun sudah dilakukan pelapisan dalam matriks ZIF-8. Peningkatan intensitas fluoresensi pada sampel Fe_3O_4/CQD@ZIF-8 menunjukkan bahwa pelapisan menggunakan ZIF-8 mampu mengurangi interaksi secara langsung antara inti magnetik dengan CQD.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, nanokomposit magnetik-luminisensi Fe_3O_4/CQD@ZIF-8 berhasil disintesis melalui metode *in-situ self assembly* pada suhu ruang. Hasil karakterisasi XRD menunjukkan bahwa fase kristal Fe_3O_4 tetap terjaga setelah proses pelapisan, yang ditandai dengan munculnya puncak difraksi khas pada bidang (311), serta adanya puncak tambahan pada sudut $2\theta < 20°$, yang mengkonfirmasi terbentuknya struktur kristalin ZIF-8. Ukuran kristalit nanokomposit Fe_3O_4/CQD sebesar 16,7 nm dan mengalami peningkatan setelah pelapisan yaitu sebesar 25 nm, yang menunjukkan terbentuknya pelapisan ZIF-8 pada permukaan nanokomposit. Hasil analisis FTIR mengkonfirmasi keberadaan gugus fungsi dari Fe_3O_4, carbon. dan ZIF-8, yaitu Fe-O, C-N, C=N, Zn-N, dan O-H yang menunjukkan keberhasilan sintesis dan terbentuknya interaksi antar komponen dalam sintesis nanokomposit. Karakteristik sifat optik menggunakan spektroskopi Uv-fluoresensi menunjukkan bahwa nanokomposit tetap mempertahankan sifat fluoresensinya dan mampu mengurangi interaksi langsung

antara komponen magnetik dan luminisensi. Dengan demikian, nanokomposit Fe_3O_4/CQD@ZIF-8 berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut dalam aplikasi bioimaging.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dibiayai oleh UNIVERSITAS ANDALAS sesuai dengan Kontrak Penelitian Skema Penelitian Skripsi Sarjana Batch I Nomor: 200/UN16.19/PT.01.03/PSS/2025, Tahun Anggaran 2025.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan.

PERNYATAAN PENDANAAN

Penelitian ini tidak memperoleh pendanaan khusus.

PERNYATAAN PENGGUNAAN AI GENERATIF DAN TEKNOLOGI BERBASIS AI

GPT hanya digunakan untuk mengoreksi kesalahan tata bahasa dan tipografi. Penulis bertanggung jawab penuh atas isi dan integritas publikasi.

DAFTAR PUSTAKA

Aulia, Wulan, Ahnaf Ahnaf, Mochammad Yusuf Irianto, Ratna Ediati, Rendy Muhamad Iqbal, Rahadian Abdul Rachman, and Ulva Tri Ita Martia. 2020. "Synthesis and Characterization of Zeolitic Imidazolate Framework-8 (ZIF-8)/Al2O3 Composite." *IPTEK The Journal for Technology and Science* 31(1):18. doi: 10.12962/j20882033.v31i1.5511.

Blomqvist, Lennart, Gunnar F. Nordberg, Valeria M. Nurchi, and Jan O. Aaseth. 2022. "Gadolinium in Medical Imaging—Usefulness, Toxic Reactions and Possible Countermeasures—A Review." *Biomolecules* 12(6):1–11. doi: 10.3390/biom12060742.

Ganguly, Sayan, and Shlomo Margel. 2023. "Bioimaging Probes Based on Magneto-Fluorescent Nanoparticles." *Pharmaceutics* 15(2). doi: 10.3390/pharmaceutics15020686.

Herbei, Elena Emanuela, Daniela Laura Buruiana, Alina Crina Muresan, Viorica Ghisman, Nicoleta Lucica Bogatu, Vasile Basliu, Claudiu Ionut Vasile, and Lucian Barbu-Tudoran. 2025. "Tailored Magnetic Fe3O4-Based Core–Shell Nanoparticles Coated with TiO2 and SiO2 via Co-Precipitation: Structure–Property Correlation for Medical Imaging Applications." *Diagnostics* 15(15):1–19. doi: 10.3390/diagnostics15151912.

Jain, Richa, and Sudha Gulati. 2023. "Influence of Fe2+ Substitution on FTIR and Raman Spectra of Mn Ferrite Nanoparticles." *Vibrational Spectroscopy* 126(March):103540. doi: 10.1016/j.vibspec.2023.103540.

Kumar, Avinash, Ishant Kumar, and Arvind K. Gathania. 2022. "Synthesis, Characterization and Potential Sensing Application of Carbon Dots Synthesized via the Hydrothermal Treatment of Cow Milk." *Scientific Reports* 12(1):1–12. doi: 10.1038/s41598-022-26906-4.

Li, Jiacheng, Lisha Liao, Yannan Jia, Tian Tian, and Shiwei Gao. 2022. "Magnetic Fe 3 O 4 / ZIF-8 Optimization by Box-Behnken Design and Its Cd (II) -Adsorption Properties and Mechanism." *Arabian Journal of Chemistry* 15(10):104119. doi: 10.1016/j.arabjc.2022.104119.

Lin, Jiaomin, Pengyan Xin, Lu An, Yanjun Xu, Cheng Tao, Qiwei Tian, Zhiguo Zhou, Bing Hu, and Shiping Yang. 2019. "Imaging Contrast Agent for Sensitive Tumor Imaging in Vivo †." 478–81. doi: 10.1039/c8cc08943d.

Mohd, Wan, Ebtisyam Mustaqim, Mohd Daniyal, Yap Wing, Muhamad Zamri Kariming, Ferry Anggoro, Ardy Nugroho, Nurul Hidayat, Huda Abdullah, Ahmad Taufiq, Faten Bashar, and Kamal Eddin. 2025. "Enhanced Surface Plasmon Resonance Detection of Ascorbic Acid Using Carbon Quantum Dots Thin Film." *Plasmonics* 20(12):11319–30. doi: 10.1007/s11468-025-03194-y.

Rafsanjani, Putri Azima, and Astuti Astuti. 2025. "Pengaruh Waktu Hidrotermal Terhadap Sifat Optik Nanokomposit Fe3O4@CQD (Carbon Quantum Dots)." *Jurnal Fisika Unand* 14(6):561–68. doi: 10.25077/jfu.14.6.561-568.2025.

Rajabzadeh, Parnian, Pooneh Zoorazma, Maryam Abbasi, and Seyed Ataollah Sadat Shandiz. 2025. "Preparation of Iron Oxide/Palladium Nanoparticles Modified with Carbon Quantum Dots (Pd@CQD@Fe3O4): Insight to Anti-Cancer Effect and ROS Generation." *Scientific Reports* 15(1):1–16. doi: 10.1038/s41598-025-02386-0.

Salvi, Anand, Saarthak Kharbanda, Preeti Thakur, Manish Shandilya, and Atul Thakur. 2024. "Biomedical Application of Carbon Quantum Dots: A Review." *Carbon Trends* 17(September):100407. doi: 10.1016/j.cartre.2024.100407.

Shen, Fangzhou, Zhaoyang Lu, Kangli Yan, Kang Luo, Shuchen Pei, and Pu Xiang. 2025. "Synthesis and Properties of Carbon Quantum Dots as an Antimicrobial Agent and Detection of Ciprofloxacin." 1–10.

Xue, Zhongbo, Mengyao Zhu, Yuze Dong, and Tong Feng. 2019. "An Integrated Targeting Drug Delivery System Based on the Hybridization of Graphdiyne and MOFs for Visualized Cancer Therapy." *Roya* (24):2–24. doi: 10.1039/C9NR02017A.

Zaca-Moran, O., F. Díaz-Monge, A. Rodríguez-Juárez, C. L. Gómez-Muñoz, P. Zaca-Moran, O. Secundino-Sánchez, and J. Díaz-Reyes. 2024. "Synthesis and Characterization of Fluorescent Carbon Dots Obtained from Citrus x Sinensis by an Eco-Friendly Method." *Results in Chemistry* 11(June). doi: 10.1016/j.rechem.2024.101788.