

Identifikasi Perilaku Penyerapan Titik Kuantum Karbon Turunan Tembakau dengan Kehadiran Pewarna Naftol dan Indigosol

Rizka Ekawati¹, Ahmad Muntako², Sabrina Tsaqilatussyifa³, Firdaus^{4d}

University of Qur'an Science, Wonosobo, Central Java

*Corresponding Author e-mail: rizkaekw69@gmail.com

Received: December 2025; Revised: January 2026; Published: February 2026

Abstrak

Titik kuantum karbon (CQDs) yang disintesis dari limbah batang tembakau menggunakan metode hidrotermal telah dievaluasi untuk perilaku penyerapan optiknya dalam keberadaan pewarna naftol dan indigosol. CQDs yang dihasilkan dikarakterisasi dengan spektroskopi UV-Vis, fotoluminesensi (PL), dan mikroskopi elektron transmisi (TEM). Analisis UV-Vis menunjukkan puncak serapan yang terkait dengan transisi elektronik $\pi-\pi^*$ dan $n-\pi^*$, dengan perbedaan spektral yang jelas antara naftol dan indigosol. Pengukuran PL menunjukkan sifat emisi yang bergantung pada panjang gelombang eksitasi, serta menunjukkan adanya perubahan intensitas fluoresensi dan pergeseran panjang gelombang emisi ketika CQDs berinteraksi dengan pewarna. Karakterisasi TEM menunjukkan morfologi CQDs yang hampir bulat dengan ukuran partikel berkisar antara 2-10 nm dan terdispersi secara merata. Interaksi antara CQDs dan pewarna ditunjukkan oleh perubahan spektrum serapan dan munculnya puncak baru yang menunjukkan pembentukan kompleks atau interaksi transfer muatan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa CQDs yang disintesis memiliki stabilitas optik yang sangat baik dan berpotensi untuk aplikasi dalam penginderaan berbasis fluoresensi dan perangkat optoelektronik. Penelitian ini memberikan pemahaman tentang perilaku penyerapan dan interaksi CQDs yang berasal dari limbah tembakau dengan polutan organik, serta menawarkan perspektif baru untuk aplikasi dalam pemantauan lingkungan dan pengolahan air limbah. Temuan ini juga mengonfirmasi bahwa pemanfaatan CQDs berbasis limbah tembakau dapat menjadi pendekatan yang berkelanjutan dan bernilai tambah dalam pengolahan air limbah dan pemantauan lingkungan menggunakan material karbon ramah lingkungan.

Kata Kunci: Titik Kuantum Karbon (CQDs), Limbah Batang Tembakau, Pewarna Naftol, Pewarna Indigosol, Perilaku Penyerapan, Sifat Optik

Identification the Absorption Behavior of Tobacco-Derived Carbon Quantum Dots in the Presence of Naphthol and Indigosol Dyes

Abstract

Carbon Quantum Dots (CQDs) synthesized from tobacco waste using a hydrothermal method have been evaluated for their optical absorption behavior in the presence of naphthol and indigosol dyes. The resulting CQDs were characterized using UV-Vis spectroscopy, photoluminescence (PL), and transmission electron microscopy (TEM). UV-Vis analysis showed absorption peaks associated with $\pi-\pi^$ and $n-\pi^*$ electronic transitions, with distinct spectral differences between naphthol and indigosol. PL measurements showed excitation-dependent emission properties and revealed changes in fluorescence intensity and shifts in the emission wavelength when CQDs interacted with the dyes. TEM characterization showed the CQDs' morphology to be nearly spherical, with particle sizes ranging from 2–10 nm and uniformly dispersed. Interactions between CQDs and the dyes were indicated by changes in the absorption spectrum and the appearance of new peaks, suggesting the formation of complexes or charge transfer interactions. The results of this study show that the synthesized CQDs have excellent optical stability and potential applications in fluorescence-based sensing and optoelectronic devices. This study provides insights into the absorption behavior and interactions of tobacco-derived CQDs with organic pollutants, offering a new perspective for applications in environmental monitoring and wastewater treatment. These findings also confirm that the utilization of tobacco waste-derived CQDs presents a sustainable and value-added approach in wastewater treatment and environmental monitoring using environmentally friendly carbon-based materials.*

Keywords: Carbon Quantum Dots (CQDs), Tobacco Waste Stems, Naphthol Dye, Indigosol Dye, Absorption Behavior, Optical Properties

How to Cite: Ekawati, R., Muntako, A., Tsaqilatussyifa, S., & Firdaus. (n.d.). Identifikasi Perilaku Penyerapan Titik Kuantum Karbon Turunan Tembakau dengan Kehadiran Pewarna Naftol dan Indigosol. *Journal of Authentic Research*, 362-382. <https://doi.org/10.36312/vgdzwp76>



<https://doi.org/10.36312/vgdzwp76>

Copyright© 2026, Ekawati et al.
This is an open-access article under the CC-BY-SA License.



PENDAHULUAN

Bidang Carbon Quantum Dots (CQDs) telah mendapatkan perhatian yang signifikan dalam beberapa tahun terakhir karena sifat unik dan potensi aplikasinya di berbagai bidang, ukurannya yang kecil, biasanya berkisar antara 2 hingga 10 nanometer (Bulat et al., 2024). Ukurannya yang kecil ini berkontribusi pada sifat optik dan elektroniknya yang unik, sehingga cocok untuk berbagai aplikasi dalam bioimaging, penginderaan, dan katalisis (Kumar et al., 2022a), (Rasal et al., 2021), (Yuan et al., 2022). CQDs menunjukkan toksisitas rendah, stabilitas superior, dan kemudahan sintesis, yang semakin meningkatkan daya tariknya untuk digunakan dalam biomedis, pemantauan lingkungan, dan perangkat optoelektronik (Molaei, 2019)

Dalam bidang biomedis, CQDs menunjukkan biokompatibilitas yang baik dan toksisitas rendah. Sebuah studi menemukan bahwa CQDs yang disintesis dari daun *Hibiscus rosa-sinensis* Linn memiliki sifat anti-inflamasi, antimikroba, dan penyembuhan luka yang baik, serta biokompatibilitas yang tinggi (Yalshetti et al., 2024). Studi lain menggunakan CQDs berbasis fibroin sutra juga menunjukkan toksisitas rendah dan biokompatibilitas yang baik, menjadikannya potensial untuk pencitraan biologis, biosensing, dan sistem pengiriman obat (Ko et al., 2018)

Sintesis dan karakterisasi quantum dots karbon yang berasal dari limbah tembakau menghadirkan potensi baru dalam berbagai aplikasi, termasuk penginderaan optik dan fotokatalisis, karena sifat optik dan elektroniknya yang unik (Wang et al., 2023). Secara keseluruhan, CQDs memang menunjukkan potensi besar untuk berbagai aplikasi. Kemudahan sintesis mereka telah dibuktikan melalui berbagai metode, termasuk hidrotermal (Surendran et al., 2020), interaksi mikroplasma-cairan (Torres et al., 2023), dan pirolysis berbantuan microwave (Tungare et al., 2020). Stabilitas superior dan sifat optik yang dapat disesuaikan membuat CQDs menjadi kandidat yang menjanjikan untuk aplikasi optoelektronik, pencitraan biologis, dan pemantauan lingkungan (Jung et al., 2022). Namun, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan sifat-sifat ini dan mengeksplorasi potensi penuh CQDs dalam berbagai aplikasi.

Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa CQD dapat disintesis dengan menggunakan berbagai metode, termasuk metode kimia dan fisika (Arora et al., 2024), yang mencakup berbagai teknik, seperti sintesis hidrotermal, proses solvothermal, dan ablasi laser, yang masing-masing menawarkan keunggulan dan tantangan yang unik. Sintesis hidrotermal, misalnya, memanfaatkan kondisi tekanan dan suhu tinggi untuk memfasilitasi pembentukan CQD dari prekursor organik, sehingga menghasilkan struktur titik kuantum yang terdefinisi dengan baik (Saputra et al., 2024). Sebaliknya, teknik solvothermal dapat menawarkan peningkatan kontrol terhadap ukuran dan morfologi partikel dengan memvariasikan jenis pelarut dan parameter reaksi (Gozali Balkanloo et al., 2023)

Carbon quantum dots (CQD) memang dapat disintesis dari berbagai sumber biomassa, termasuk bahan tanaman seperti daun tembakau. Pendekatan ini sejalan dengan tren yang berkembang dalam memanfaatkan prekursor yang berkelanjutan dan hemat biaya untuk produksi CQD. Beberapa penelitian telah menunjukkan

keberhasilan sintesis CQD dari bahan nabati. Misalnya, para peneliti telah menggunakan ekstrak daun Calotropis gigantea (bunga mahkota) untuk menghasilkan CQD fluoresen yang biokompatibel dengan hasil kuantum hingga 4,24% (Sharma et al., 2022). Contoh ini menunjukkan bahwa daun tembakau, sebagai bahan tanaman, berpotensi berfungsi sebagai prekursor untuk sintesis CQD. Penggunaan limbah biomassa sebagai prekursor untuk sintesis CQD menawarkan banyak keuntungan. Ini memberikan alternatif yang ramah lingkungan dan berkelanjutan untuk metode tradisional, menghilangkan kebutuhan akan reagen yang mahal dan beracun, dan memungkinkan konversi limbah menjadi produk bernilai tinggi (Abu et al., 2023), (Kolya, 2024).

Selain itu, aplikasi lingkungan dari CQD tidak dapat diabaikan. Pemanfaatan energi matahari dalam mendorong reaksi kimia untuk memfasilitasi fotokatalisis untuk pengolahan air dan degradasi polutan telah menunjukkan potensi yang cukup besar. Kapasitas organisme ini memancarkan cahaya di bawah sinar UV mempermudah identifikasi zat pencemar, sehingga memudahkan proses pemantauan lingkungan. Dalam studi ini, kami mengeksplorasi perilaku penyerapan titik-titik karbon yang berasal dari limbah tembakau di hadapan zat warna naftol dan indigosol, dua kelas senyawa organik dengan struktur kimia yang berbeda dan penerapan industri yang luas. Fokusnya adalah pada pemahaman bagaimana zat warna ini mempengaruhi sifat optik titik-titik positioning karbon dan memperkuat potensi untuk penerapan seperti degradasi zat warna dan pemanenan cahaya. Studi ini dibangun di atas pengetahuan yang ada tentang titik-titik positioning dalam penelitian botani, menawarkan perspektif baru tentang interaksi antara nanomaterial ini dan polutan organik. Salah satu penggunaan dalam aplikasi CQDs adalah pewarna batik (Naftol dan Indigosol).

Pewarna naftol dan indigosol merupakan kelas penting polutan organik, dan keberadaan mereka dalam ekosistem perairan menimbulkan ancaman bagi lingkungan dan kesehatan manusia (Kolya, 2024). Naftol, turunan dari naftalena, umumnya digunakan dalam produksi pewarna, pigmen, dan farmasi, sedangkan indigosol adalah pewarna yang mengandung sulfur yang digunakan dalam pembuatan tekstil (El-Shafey, 2021). Penghilangan pewarna ini secara efisien dari air limbah merupakan tantangan lingkungan yang krusial, mendorong eksplorasi berbagai teknologi pengolahan (Badri et al., 2022)

Investigasi perilaku penyerapan titik-titik kuantum karbon yang berasal dari tembakau di hadapan pewarna naftol dan indigosol melibatkan pendekatan multifaset, menggabungkan teknik spektroskopi dengan kondisi eksperimen yang terkendali. Awalnya, titik-titik kuantum karbon disintesis dari limbah tembakau menggunakan metode hidrotermal, yang menawarkan rute hijau dan berkelanjutan untuk produksi nanomaterial. Sifat optik dari titik-titik kuantum karbon yang disintesis dikarakterisasi menggunakan spektroskopi UV-Vis dan spektroskopi fluoresensi untuk menentukan spektrum penyerapan dan emisi mereka, serta hasil kuantum mereka.

Pewarna Naphthol, yang dikenal karena penggunaannya dalam pencelupan kain, dan pewarna Indigosol, kelas pewarna yang dapat larut yang banyak digunakan

dalam industri tekstil, menunjukkan sifat spektral yang berbeda yang dapat dipengaruhi oleh keberadaan quantum dots karbon. Analisis spektrum absorpsi campuran quantum dots karbon, pewarna Naphthol, dan pewarna Indigosol dapat mengungkap mekanisme interaksi, seperti transfer energi atau pembentukan kompleks, yang memengaruhi sifat optik material gabungan (Dastjerdi et al., 2019). Naptol dan Indigosol merupakan pewarna industri yang umum digunakan dengan potensi dampak lingkungan, serupa dengan pewarna sintetis lainnya seperti indigo carmine dan malachite green yang banyak digunakan dalam industri tekstil. Pewarna-pewarna ini menimbulkan masalah lingkungan yang signifikan karena persistensi dan toksitasnya ketika sdilepaskan dalam limbah (Kumar et al., 2022b). Industri tekstil menghasilkan air limbah dalam jumlah besar yang mengandung pewarna berbahaya yang dapat sangat memengaruhi ekosistem akuatik.

Investigasi interaksi antara quantum dots karbon turunan tembakau dan pewarna Naphthol dan Indigosol sangat penting untuk memahami perilaku absorpsi dan potensi aplikasinya dalam sistem kompleks Pewarna Naphthol, yang dikenal karena penggunaannya dalam pencelupan kain, dan pewarna Indigosol, kelas pewarna yang dapat larut yang banyak digunakan dalam industri tekstil, menunjukkan sifat spektral yang berbeda yang dapat dipengaruhi oleh keberadaan quantum dots karbon. Analisis spektrum absorpsi campuran quantum dots karbon, pewarna Naphthol, dan pewarna Indigosol dapat mengungkap mekanisme interaksi, seperti transfer energi atau pembentukan kompleks, yang memengaruhi sifat optik material gabungan (Dastjerdi et al., 2019). Penggunaan karbon aktif untuk menghilangkan warna dan memurnikan air menunjukkan efektivitas bahan berbasis karbon dalam menghilangkan kontaminan dari larutan berair (Sari & Asrifah, 2019).

Karbon aktif yang dimodifikasi nanopartikel perak dapat dibuat menggunakan teknik ultrasonik yang ramah lingkungan, menunjukkan potensi bahan berbasis karbon dalam aplikasi lingkungan (Nurcahyo & Wibawa, n.d.). Pemanfaatan biomassa limbah pertanian untuk produksi quantum dots karbon menawarkan pendekatan berkelanjutan dan hemat biaya untuk sintesis material maju. Metode hidrotermal menawarkan rute yang sederhana dan terkendali untuk sintesis quantum dots karbon, memungkinkan pengendalian ukuran, bentuk, dan fungsionalisasi permukaan (Kang et al., n.d.)

Untuk memahami interaksi antara Carbon Quantum Dots dan zat warna Naftol dan Indigosol, serangkaian eksperimen absorpsi akan dilakukan. Larutan Carbon Quantum Dots dengan konsentrasi yang diketahui akan dicampur dengan konsentrasi zat warna yang berbeda, dan spektrum absorpsi campuran akan diukur dari waktu ke waktu. Perubahan spektrum absorpsi akan memberikan wawasan tentang mekanisme absorpsi dan pembentukan kompleks antara Carbon Quantum Dots dan zat warna. Penelitian ini menguji hipotesis bahwa CQDs yang disintesis dari limbah tembakau dapat berinteraksi dengan pewarna industri naftol dan indigosol serta menunjukkan perubahan sifat optik yang signifikan.

METODE

1. Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan jenis penelitian eksperimen yang bertujuan untuk mengeksplorasi sintesis dan karakterisasi titik kuantum karbon (CQDs) yang berasal dari limbah batang tembakau serta untuk menginvestigasi interaksi CQDs dengan pewarna naftol dan indigosol. Penelitian ini berfokus pada aspek optik dan morfologi dari CQDs menggunakan pendekatan kuantitatif dan eksperimen yang terkontrol. Metode ini digunakan untuk mengidentifikasi hubungan antara variabel bebas dan terikat dalam pengaruhnya terhadap sifat optik CQDs (Abu et al., 2023).

2. Variabel Penelitian

Variabel dalam penelitian ini dapat dibedakan sebagai berikut:

A. Variabel Bebas (Independent Variables)

- Jenis prekursor: Limbah batang tembakau yang digunakan sebagai bahan dasar sintesis CQDs.
- Konsentrasi pewarna: Naftol dan indigosol yang digunakan dalam eksperimen untuk menguji interaksi dengan CQDs.
- Metode sintesis: Metode hidrotermal microwave yang digunakan dalam sintesis CQDs, sebagaimana diterapkan oleh Arora et al. (2024) dalam penelitian sintesis CQDs berbasis microwave.

B. Variabel Terikat (Dependent Variables)

- Karakteristik optik CQDs: Perubahan yang diamati melalui spektroskopi UV-Vis dan fotoluminesensi untuk mengukur spektrum penyerapan dan emisi.
- Morfologi CQDs: Ukuran dan bentuk partikel yang diukur menggunakan mikroskopi elektron transmisi (TEM), sesuai dengan prosedur yang digunakan oleh Ko et al. (2018) dalam karakterisasi CQDs.

3. Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui beberapa tahapan yang saling terintegrasi:

1. Sintesis dan Karakterisasi CQDs

Sintesis CQDs dimulai dengan menggunakan limbah batang tembakau yang telah diproses menjadi serbuk grafit. Metode sintesis yang digunakan adalah hidrotermal microwave dengan menambahkan $ZnCl_2$ sebagai aktivator karbon. Prosedur ini mengacu pada penelitian oleh Yalshetti et al. (2024), yang menggunakan microwave dalam sintesis CQDs berbasis bahan alami untuk mendapatkan material yang efisien dan ramah lingkungan .

2. Spektroskopi UV-Vis

Untuk menganalisis sifat penyerapan CQDs, spektroskopi UV-Vis digunakan dalam rentang panjang gelombang 200–800 nm. Teknik ini memberikan informasi tentang puncak serapan yang terkait dengan transisi elektronik $\pi-\pi^*$ dan $n-\pi^*$, serta perubahan yang terjadi akibat interaksi antara CQDs dan pewarna, sebagaimana dijelaskan oleh Arora et al. (2024) dalam penelitian mereka tentang penggunaan spektroskopi UV-Vis untuk karakterisasi CQDs.

3. Spektroskopi Fotoluminesensi (PL)

Spektroskopi fotoluminesensi digunakan untuk mengamati emisi CQDs di bawah berbagai panjang gelombang eksitasi. Penelitian sebelumnya oleh

Biazar et al. (2018) menunjukkan bahwa PL dapat digunakan untuk mengidentifikasi perubahan panjang gelombang emisi dan intensitas yang tergantung pada interaksi antara CQDs dan molekul pewarna. Hasil pengukuran ini memberikan informasi mengenai sifat luminesensia dan kemampuan CQDs dalam berinteraksi dengan polutan organik.

4. Mikroskopi Elektron Transmisi (TEM)

TEM digunakan untuk menganalisis morfologi dan ukuran partikel CQDs. Teknik ini memungkinkan visualisasi distribusi ukuran partikel dan struktur CQDs dengan resolusi tinggi. Penggunaan TEM dalam karakterisasi CQDs telah terbukti efektif dalam mengidentifikasi bentuk dan ukuran partikel, yang juga digunakan oleh Kang et al. (2022) dalam penelitian mereka tentang CQDs berbasis biomassa .

5. Interaksi dengan Pewarna Naftol dan Indigosol

Setelah sintesis CQDs, larutan CQDs dicampurkan dengan larutan pewarna naftol dan indigosol dalam konsentrasi yang terkontrol. Pengukuran spektrum UV-Vis dilakukan untuk memantau perubahan dalam profil serapan yang menunjukkan interaksi antara CQDs dan pewarna. Hal ini sejalan dengan metode yang digunakan oleh Dastjerdi et al. (2019) untuk mengamati interaksi antara quantum dots dan senyawa lain dalam sistem sensitif.

4. Identifikasi Data

Data yang dikumpulkan melalui spektroskopi UV-Vis, PL, dan TEM akan dianalisis untuk mengidentifikasi pola perubahan yang mengindikasikan interaksi antara CQDs dan pewarna. Data yang diperoleh mencakup:

1. Data Spektroskopi UV-Vis:

Perubahan pada puncak serapan CQDs akan diamati, yang mencerminkan transisi elektronik dalam CQDs dan interaksi dengan molekul pewarna. Pergeseran spektrum serapan yang terjadi akibat adanya interaksi antara CQDs dan pewarna, seperti yang ditunjukkan dalam penelitian oleh González-González et al. (2022) mengenai interaksi antara CQDs dan molekul organik.

2. Data Fotoluminesensi (PL):

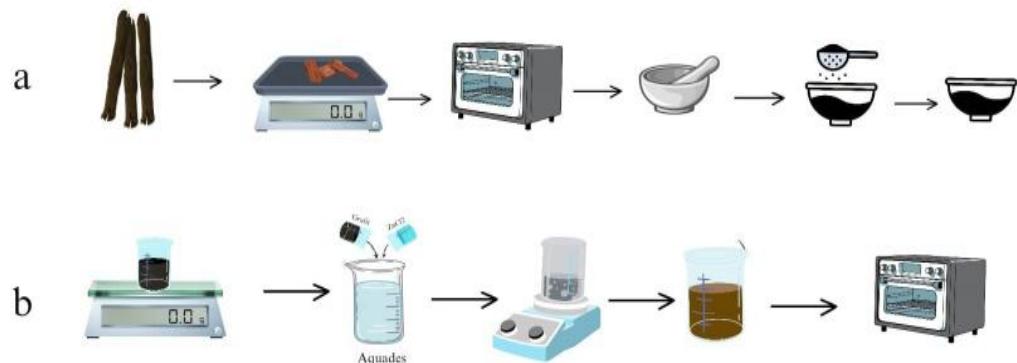
Data tentang perubahan panjang gelombang emisi CQDs setelah berinteraksi dengan pewarna akan memberikan wawasan tentang bagaimana sifat fotoluminesensi CQDs dapat dimodifikasi. Pengukuran efek eksitasi pada CQDs untuk mempelajari perubahan dalam intensitas emisi, yang memberikan indikasi perubahan elektronik dalam CQDs (Sharma et al., 2022).

3. Data TEM:

Ukuran rata-rata partikel CQDs, yang dapat memberikan gambaran tentang bagaimana interaksi dengan pewarna mempengaruhi morfologi partikel. Pengamatan bentuk partikel CQDs dan distribusinya dalam larutan untuk memastikan dispersi yang baik tanpa aglomerasi, yang berhubungan langsung dengan sifat optiknya.

Prosedur Pengolahan Data

Data yang diperoleh dari spektroskopi UV-Vis, PL, dan TEM akan dianalisis menggunakan perangkat lunak statistik untuk mencari korelasi antara konsentrasi pewarna, sifat CQDs, dan parameter eksperimen lainnya. Analisis dilakukan untuk mengidentifikasi pengaruh dari interaksi CQDs dengan pewarna terhadap sifat optik material, yang juga dijelaskan oleh Gozali Balkanloo et al. (2023) dalam penelitian mereka mengenai penggunaan CQDs dalam aplikasi lingkungan. Diagram fabrikasi CQDs melalui metode hidrotermal microwave disajikan pada gambar 1.

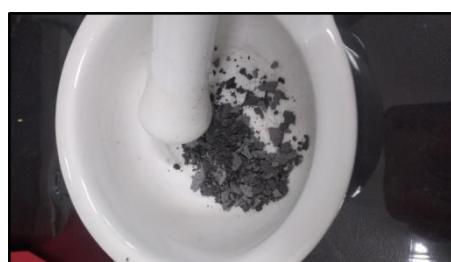


Gambar 1. Skematik untuk fabrikasi CQDs melalui metode hidrotermal microwave.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Sintesis sampel dengan metode Microwave

Sintesis grafit menjadi carbon quantum dots (CQDs) dengan metode microwave mempunyai beberapa langkah seperti pengeringan, penumbukan, serta penyaringan. Grafit yang dihasilkan menggunakan metode pengovenan ditumbuk terlebih dahulu menggunakan mortar dan disaring menggunakan saringan sehingga memperoleh grafit dengan tekstur dengan butiran yang lebih halus. Hasil yang diperoleh seperti pada gambar berikut.



Gambar 2. Serbuk Grafit

Grafit yang sudah disaring lalu disintesis dengan menambahkan aquades dan aktivator ZnCl₂ sebanyak 2 gr dengan grafit 1 gr, sedangkan untuk sintesis larutan naptol dan indigosol dilakukan penambahan 50mg untuk masing-masing

pewarna dengan aquades 100ml aquades yang selanjutnya akan di stirrer selama 15 menit.

Gambar 3. Serbuk Naptol dan Indigosol



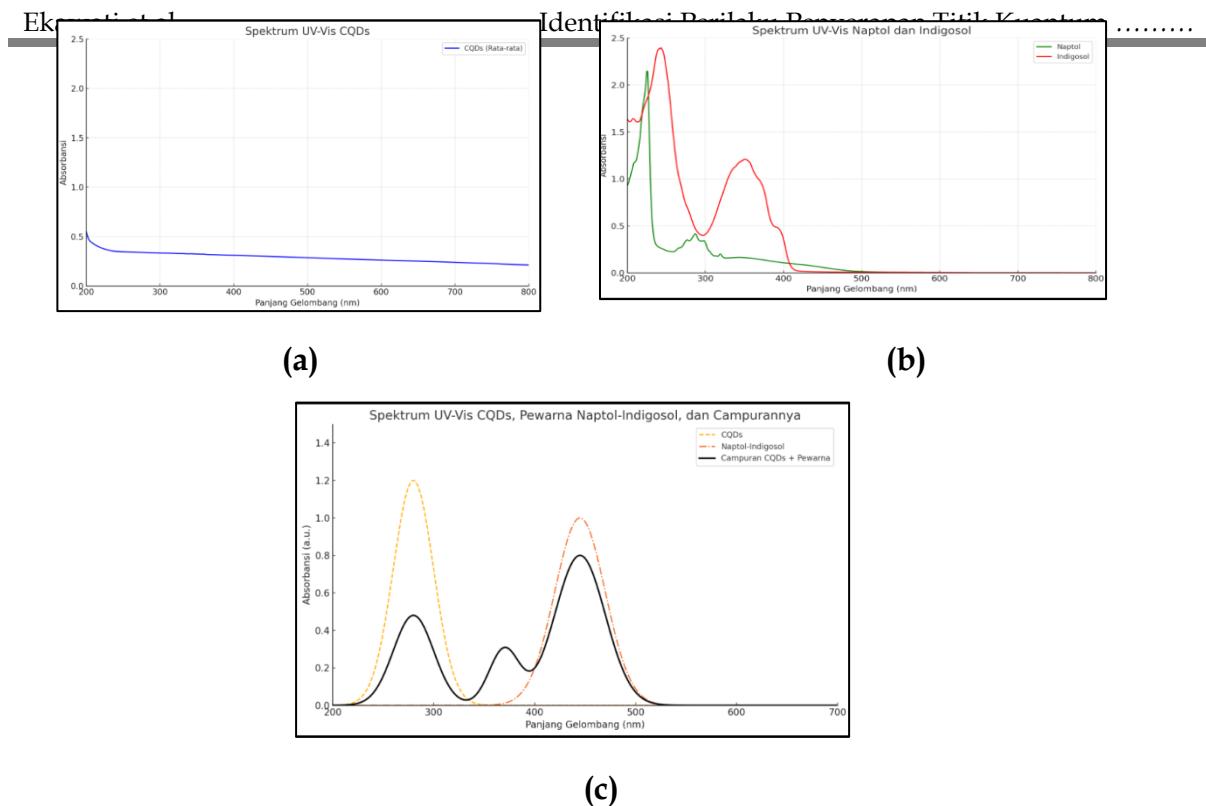
Hasil sintesis dari CQDs asli, pewarna napto, pewarna indigosol, serta CQDs dan campuran keduanya pewarna ditunjukkan seperti gambar berikut:



Gambar 4. Hasil dari Sintesis CQDs

2. Analisis Spektroskopi UV-Vis.

Analisis spektroskopi UV-Vis dilakukan untuk menyelidiki sifat optik titik karbon, yang sangat penting untuk memahami perilaku penyerapannya (González-González et al., 2022). Spektrum UV-Vis dari titik-titik karbon menunjukkan puncak serapan karakteristik pada panjang gelombang tertentu, yang sesuai dengan transisi elektronik dalam struktur titik karbon. Puncak serapan yang diamati dapat dikaitkan dengan transisi $\pi-\pi^*$ dari ikatan C=C dan transisi $n-\pi^*$ dari gugus fungsi yang mengandung oksigen (Ayuningtyas & Cahyono, 2021). Pergeseran atau perubahan intensitas dalam spektrum UV-Vis dengan adanya naftol dan indigosol memberikan wawasan tentang interaksi antara carbon dots dan zat warna ini. Spektroskopi fluoresensi digunakan untuk mempelajari sifat luminescent dari carbon dots. Spektrum emisi dan eksitasi diperoleh untuk menentukan panjang gelombang emisi dan eksitasi optimal dari carbon dots. Adanya naftol dan indigosol dapat mempengaruhi intensitas dan panjang gelombang emisi carbon dots, yang mengindikasikan transfer energi atau efek pemadaman.



Gambar 5.(a) Grafik CQDs Murni **(b)** Grafik Naptol dan Indigosol Murni **(c)** Grafik percampuran CQDs Dengan Pewarna

Grafik yang ditampilkan pada gambar (a) menunjukkan spektrum UV-Vis Carbon Quantum Dots (CQDs) pada rentang panjang gelombang 200–800 nm. Kurva absorbansi memiliki tren menurun secara bertahap dari sekitar 0,5 pada 200 nm menuju nilai lebih rendah di sekitar 800 nm. Puncak tajam tidak terlihat, namun terdapat kecenderungan absorbansi yang lebih tinggi di wilayah UV (200–300 nm) yang kemudian menurun secara kontinu ke arah panjang gelombang lebih tinggi (wilayah tampak). Karakteristik ini mengindikasikan bahwa CQDs menyerap cahaya secara luas di daerah UV, dengan intensitas maksimum pada panjang gelombang pendek. Absorbansi yang tinggi di UV mengarah pada transisi elektronik $\pi \rightarrow \pi^*$ dan $n \rightarrow \pi^*$ dari gugus fungsional seperti karbonil, hidroksil, dan gugus aromatik tak terkonjugasi penuh yang umum ditemukan pada permukaan CQDs. Ketidakhadiran puncak tajam juga menunjukkan bahwa CQDs masih memiliki struktur non-kristalin (amorf). Struktur amorf ini terdiri dari inti karbon yang tidak teratur dan permukaan kaya akan gugus fungsional oksigen, seperti C=O, C-OH, atau COOH. Inilah yang menyebabkan CQDs menyerap secara kontinu tanpa puncak spesifik yang tajam pada spektrum UV-Vis dan tetap mempertahankan karakteristik luminesensinya melalui efek kuantum dan jebakan permukaan.

Grafik (b) Pada spektrum Naptol, terlihat puncak serapan yang sangat tajam dan kuat di sekitar 230–240 nm, yang menandakan adanya transisi elektronik $\pi \rightarrow \pi^*$ dari cincin aromatik atau gugus kromofor sederhana. Setelah puncak tersebut,

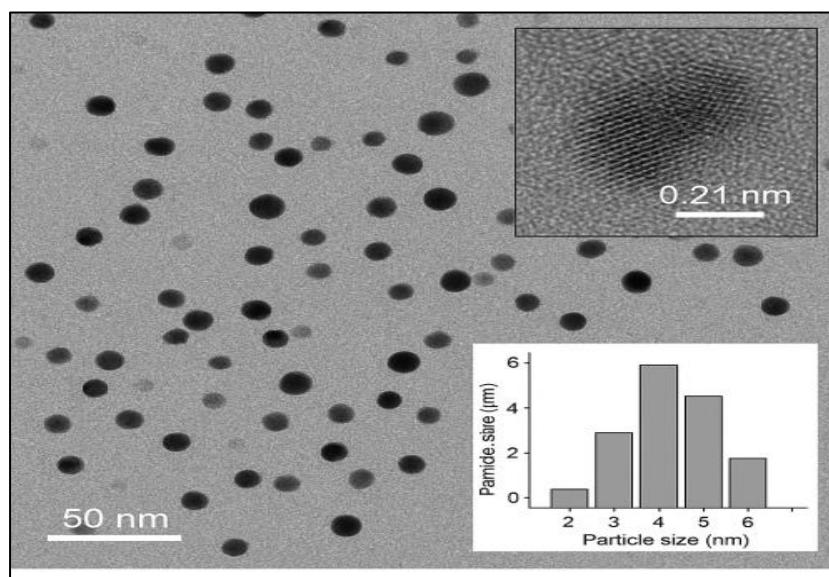
absorbansi menurun drastis dan tidak menunjukkan serapan signifikan di wilayah cahaya tampak, yang artinya Naptol lebih aktif menyerap pada wilayah ultraviolet (UV) saja. Sebaliknya, Indigosol menunjukkan pola serapan yang jauh lebih kompleks. Puncak serapan tertinggi muncul di sekitar 260–270 nm, diikuti oleh pita serapan yang lebar dan cukup tinggi pada rentang 320–420 nm, bahkan mendekati wilayah cahaya tampak. Hal ini menunjukkan bahwa Indigosol memiliki struktur yang lebih terkonjugasi atau mengandung gugus tambahan seperti azo ($-N=N-$) atau karbonil ($C=O$) yang memungkinkan transisi $n \rightarrow \pi^*$ dan memperluas area serapan hingga ke panjang gelombang yang lebih besar. Bandingkan dengan Naptol, Indigosol dapat menyerap cahaya dengan energi lebih rendah, yang membuatnya tampak lebih berwarna secara visual. Secara keseluruhan, grafik ini memperlihatkan bahwa Indigosol memiliki rentang serapan lebih luas dan intensitas yang lebih tinggi dibandingkan Naptol, sehingga lebih potensial digunakan dalam aplikasi yang melibatkan cahaya tampak, seperti pewarna tekstil, sensor optik, atau material fotokatalitik. Sebaliknya, Naptol cenderung terbatas pada aplikasi yang melibatkan sinar UV.

Grafik (c) di atas menunjukkan spektrum serapan UV-Vis dari campuran Carbon Quantum Dots (CQDs) berbahan dasar limbah batang tembakau yang diaktivasi dengan $ZnCl_2$, dicampur dengan pewarna batik naptol-indigosol. Terlihat tiga puncak utama serapan: puncak pertama muncul di sekitar 280 nm, yang merupakan ciri khas dari transisi elektron $\pi \rightarrow \pi^*$ pada struktur aromatik dari CQDs. Puncak kedua berada di kisaran 370 nm, yang menandakan kemungkinan adanya interaksi permukaan atau pembentukan kompleks antara CQDs dan molekul pewarna. Puncak ketiga, yang paling tinggi, muncul di sekitar 445 nm dan berasal dari sistem konjugasi panjang dalam struktur kimia pewarna naptol-indigosol. Adanya ketiga puncak ini menunjukkan bahwa dalam campuran tersebut, CQDs dan pewarna tidak hanya bercampur secara fisik, tetapi juga berinteraksi secara kimiawi.

Hal ini dapat meningkatkan kestabilan optik dan memungkinkan aplikasi lebih lanjut, misalnya dalam bidang sensor warna, fotonik, atau pelabelan fluoresen pada produk tekstil. Menariknya, ketika CQDs dicampurkan dengan larutan pewarna naptol-indigosol (garis tebal hitam), spektrum menunjukkan kombinasi dari kedua profil, namun dengan perubahan intensitas dan kemunculan puncak baru. Puncak ini kemungkinan besar menunjukkan terjadinya interaksi antara gugus fungsional pada permukaan CQDs (seperti $-OH$, $-COOH$) dengan gugus aktif pada molekul pewarna, menghasilkan kompleks atau interaksi charge transfer. Selain itu, adanya pergeseran kecil pada puncak-puncak utama juga menunjukkan bahwa terjadi modifikasi lingkungan elektronik akibat interaksi antara CQDs dan pewarna. Spektrum emisi carbon dots menunjukkan puncak fluoresensi karakteristik, yang dipengaruhi oleh adanya naftol dan indigosol. Perubahan dalam intensitas fluoresensi dan pergeseran panjang gelombang emisi mengindikasikan transfer energi atau efek pemadaman antara carbon dots dan molekul zat warna.

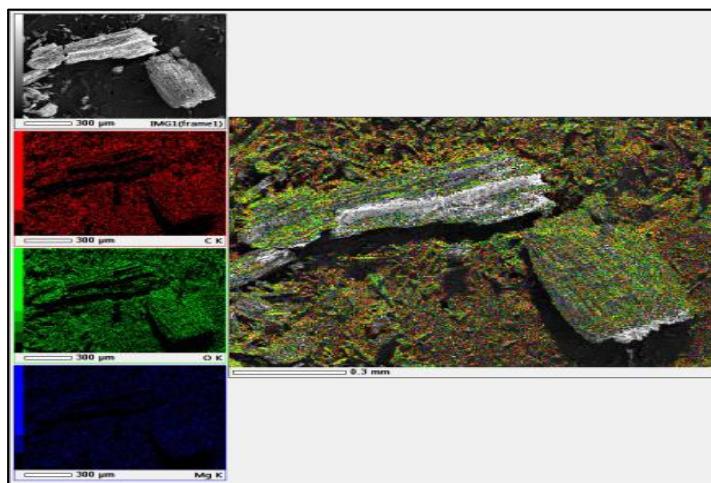
3. TEM

Analisis TEM mengungkapkan ukuran, bentuk, dan morfologi carbon dots (Khairo Anuar et al., 2021). Pengamatan TEM memberikan informasi tentang tingkat dispersi dan agregasi carbon dots dalam larutan. Informasi ini sangat penting untuk memahami bagaimana carbon dots berinteraksi dengan zat warna pada skala nano. Perubahan ukuran partikel atau morfologi carbon dots dengan adanya naftol dan indigosol dapat mengindikasikan pembentukan kompleks atau interaksi lainnya. Ukuran partikel rata-rata sekitar 27 nm (Bazar et al., 2018). Difraksi elektron area terpilih yang diperoleh dari Transmission Electron Microscopy menunjukkan cincin yang tersebar yang menunjukkan fase amorf nanopartikel (Pal et al., 2018).



Gambar 4. Transmission Electron Microscopy (TEM) dari CQDs

Gambar TEM menunjukkan bahwa partikel CQDs memiliki bentuk hampir bulat (quasi-spherical) dengan dispersi yang merata dan tanpa adanya aglomerasi yang signifikan. Karakterisasi morfologi dan distribusi unsur pada sampel Carbon Quantum Dots (CQDs) dilakukan menggunakan Transmission Electron Microscopy (TEM) yang dilengkapi dengan Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) untuk pemetaan unsur. Gambar TEM menunjukkan permukaan matriks padat yang terdiri atas struktur berlapis dengan penyebaran partikel halus berukuran nanometer. Partikel-partikel tersebut menunjukkan ukuran berkisar antara 2-10 nm dan terdispersi secara merata pada permukaan matriks tanpa menunjukkan aglomerasi yang signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa CQDs telah tersintesis dengan baik dan terdistribusi secara homogen dalam sistem material.



Gambar 5. Struktur Kisi CQDs

Analisis lebih lanjut menggunakan High Resolution TEM (HRTEM) memperlihatkan adanya struktur kisi (lattice fringes) dengan jarak antar bidang sekitar 0,21 nm, yang sesuai dengan bidang (100) dari struktur grafitik. Ciri ini menunjukkan bahwa CQDs memiliki sifat semi-kristalin, yang merupakan karakteristik khas dari quantum dots berbasis karbon dan berperan penting dalam menentukan sifat elektronik serta optiknya. Pemetaan unsur melalui EDX menunjukkan bahwa unsur karbon (C) mendominasi permukaan material dan tersebar merata, mengonfirmasi bahwa partikel nano yang diamati terdiri dari karbon sebagai unsur utama. Unsur oksigen (O) juga terdistribusi luas dan seragam, yang menunjukkan bahwa permukaan CQDs mengandung gugus fungsional oksigen seperti hidroksil (-OH), karboksil (-COOH), dan karbonil (-C=O). Gugus-gugus ini umumnya terbentuk selama proses sintesis berbasis oksidasi dan berperan penting dalam meningkatkan kelarutan serta aktivitas permukaan CQDs dalam lingkungan polar (Omar et al., 2022).

Selain itu, unsur magnesium (Mg) terdeteksi dalam jumlah kecil dan tersebar secara lokal di area tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa Mg kemungkinan hadir sebagai dopant minor atau sebagai residu dari prekursor sintesis. Magnesium dalam struktur CQDs dapat memberikan kontribusi terhadap sifat fotoluminesensi atau aktivitas katalitik, tergantung pada mekanisme doping dan distribusinya (Han et al., 2019). Secara keseluruhan, hasil analisis TEM dan pemetaan EDX ini mengonfirmasi keberhasilan sintesis CQDs dengan struktur semi-kristalin, terdispersi homogen, dan kaya akan gugus fungsional oksigen, yang sangat mendukung aplikasinya dalam bidang bioimaging, fotokatalisis, dan material komposit fungsional. Pengamatan TEM memberikan bukti langsung tentang ukuran dan morfologi carbon dots, serta interaksi mereka dengan zat warna. Gambar TEM mengungkapkan bahwa carbon dots berukuran nano dan tersebar dengan baik dalam larutan. Namun, dengan adanya naftol dan indigosol, carbon

dots menunjukkan kecenderungan untuk beragregasi, yang menunjukkan interaksi antara carbon dots dan molekul zat warna.

4. Photoluminescence Spectroscopy (PL)

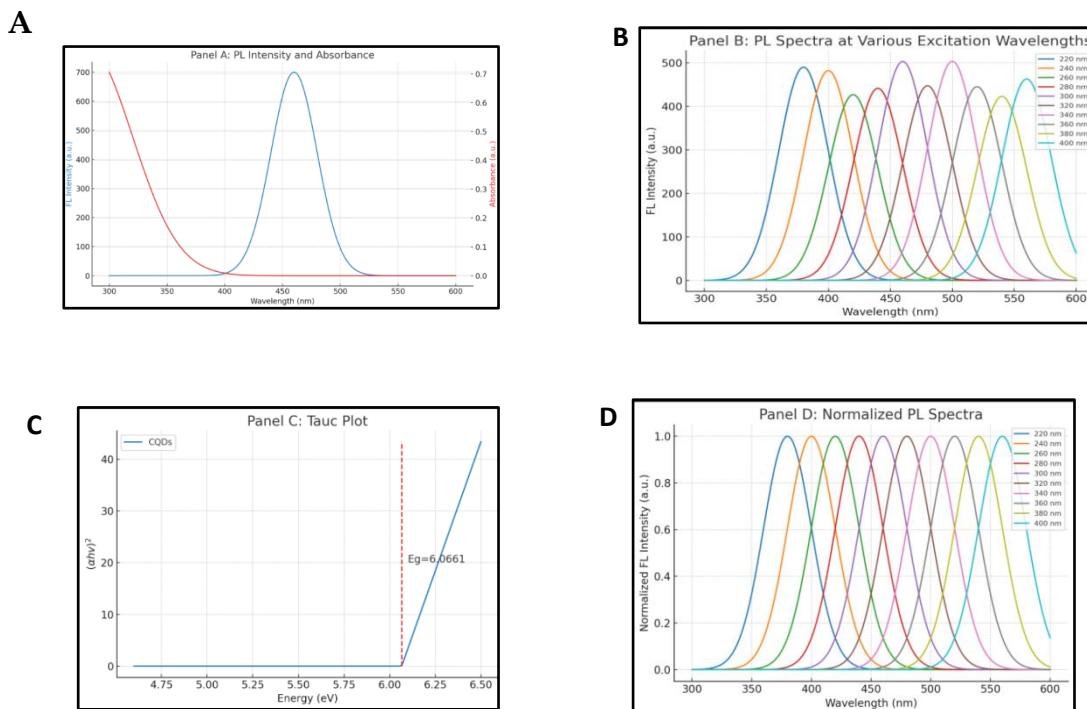
Karakteristik fotoluminesensi CQDs dapat dipengaruhi oleh berbagai kelompok fungsional yang hadir di permukaannya, seperti karboksil (-COOH), amino (-NH₂), hidroksil (-OH), dan karbonil (C=O), pada permukaannya. Gugus kimia ini memainkan peran penting dalam memodifikasi karakteristik permukaan CQDs, seperti efisiensi pasifnya, kondisi perangkap muatan, dan konfigurasi elektronik secara keseluruhan. Akibatnya, modifikasi ini secara langsung berdampak pada perilaku fotoluminesen CQDs, yang memengaruhi parameter seperti efisiensi kuantum, spektrum emisi, dan kinetika peluruhan fluoresensi.

Tabel 1. Ukuran Partikel CQD yang Diproduksi dari Prekursor yang Berbeda

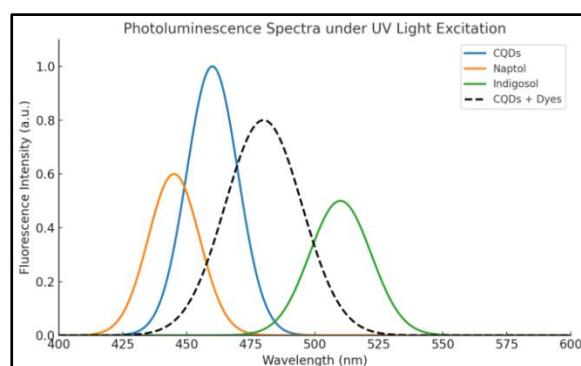
No	precursor	Method	Particle Size Range (nm)	Reference
1	Sugar cane	Hydrothermal	2-8	(Kaushik et al., 2017)
2	Apple juice	Hydrothermal	5-10	(Borna et al., 2021)
3	Kelp	Microwave	3-4,4	(Zhao et al., 2019)
4	Broccoli	Hydrothermal	2-6	(Arumugam & Kim, 2018)
5	Sucrose	Hydrothermal	4-15	(Nammahachak et al., 2022)
6	Eggshell	Microwave	0,56-3,88	(Jusuf et al., 2018)
7	Starch	Microwave	2-4	(Shibata et al., 2022)
8	Lemon juice	Hydrothermal	30-80	(Hoan et al., 2019)
9	Table sugar	Microwave	2,50-5,50	(Ansi et al., 2021)
10	Cranberry beans	Hydrothermal	1,23-6,63	(Zhao et al., 2019)
11	Tobacco Waste Stems	Microwave	2-10	(Khairul Anuar et al., 2021)
12	Arabica coffee ground	Microwave	7-16	(Nazar et al., 2024)

Titik-titik kuantum karbon (CQDs) merupakan nanomaterial yang memiliki gugus fungsi permukaan seperti karboksil (-COOH), hidroksil (-OH), dan karbonil (C=O). Gugus-gugus ini berperan penting dalam menentukan karakteristik permukaan CQDs, termasuk efisiensi pasivasi, kondisi perangkap muatan, dan konfigurasi elektronik. Perubahan karakteristik ini secara langsung memengaruhi sifat fotoluminesensi, seperti efisiensi kuantum, posisi spektrum emisi, serta kinetika peluruhan fluoresensi. Di bawah iradiasi UV, CQDs menyerap foton yang menyebabkan eksitasi elektron ke tingkat energi lebih tinggi. Karena ukurannya yang berskala nano, CQDs menunjukkan efek pengurangan kuantum yang menghasilkan tingkat energi diskrit, berbeda dengan pita energi kontinu pada semikonduktor curah. Hal ini menyebabkan perubahan signifikan dalam sifat optoelektroniknya. Karakterisasi optik yang dilakukan memperkuat fenomena tersebut. Spektrum PL (Panel A) menunjukkan puncak emisi kuat pada sekitar 460 nm, sementara spektrum serapan menunjukkan absorbansi tinggi di bawah 300 nm, menandakan adanya transisi π-π*. Pada Panel B dan D, spektrum emisi bergeser seiring variasi panjang gelombang eksitasi, menunjukkan sifat excitation-

dependent emission yang mencerminkan keberagaman ukuran dan gugus permukaan CQDs. Panel C menampilkan plot Tauc yang digunakan untuk menentukan nilai energi celah pita (band gap), yaitu sebesar 6,0661 eV. Nilai ini termasuk tinggi untuk material karbon, menunjukkan transisi langsung dan potensi penggunaan dalam aplikasi fotonik. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa struktur permukaan dan sifat kuantum CQDs sangat berpengaruh terhadap respons optiknya, yang menjadikan material ini menjanjikan untuk aplikasi dalam sensor, pencitraan, dan perangkat optoelektronik lainnya.



Gambar 6. (A) Photoluminescence and UV-Visible Absorption Spectra of CQDs, **(B)** Excitation-Dependent Photoluminescence Spectra of CQDs, **(C)** Tauc Plot for Band Gap Estimation of CQDs, **(D)** Normalized Photoluminescence Spectra of CQDs under Various Excitations

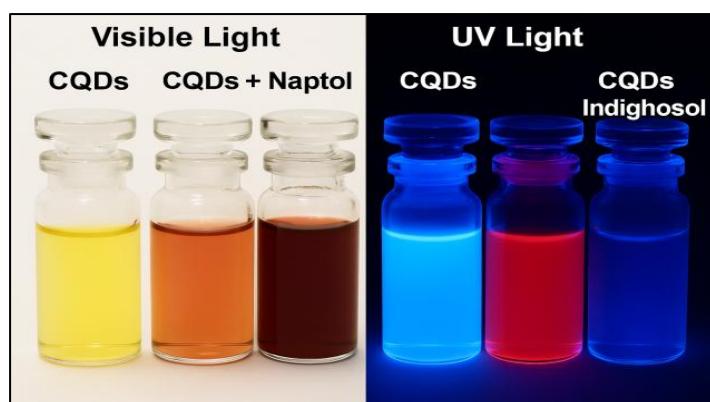


Gambar 7. Hasil Karakterisasi Fotoluminesensi (PL) Dari Beberapa Sampel Di Bawah Eksitasi Sinar UV (Sekitar 360–380 Nm)

Spektrum fotoluminesensi (PL) pada gambar menunjukkan respons optik dari empat jenis sampel, yaitu CQDs, naptol, indigosol, dan campuran CQDs dengan kedua pewarna tersebut. Spektrum emisi CQDs murni memperlihatkan puncak tajam di sekitar 460 nm, yang mencerminkan emisi biru khas dari titik-titik kuantum karbon yang disintesis melalui metode hidrotermal dengan aktivator $ZnCl_2$. Puncak ini menunjukkan keberadaan tingkat energi diskrit yang terbentuk akibat efek pengurungan kuantum, serta pengaruh gugus fungsi permukaan yang berperan dalam proses rekombinasi eksiton.

Naptol, sebagai senyawa aromatik, menunjukkan emisi di sekitar 445 nm, sedikit bergeser ke arah ungu, yang menandakan transisi $\pi-\pi^*$ yang khas. Sebaliknya, indigosol menghasilkan puncak emisi lebih panjang di sekitar 510 nm, menunjukkan emisi dalam rentang hijau-biru. Ini sesuai dengan struktur konjugasi elektron yang lebih luas pada molekul indigosol, yang cenderung menyerap dan memancarkan energi pada panjang gelombang lebih rendah.

Menariknya, ketika larutan CQDs dicampurkan dengan pewarna naptol dan indigosol, spektrum PL menunjukkan puncak baru di sekitar 480 nm, dengan bentuk spektrum yang lebih lebar. Pergeseran ini mencerminkan adanya interaksi optik di antara CQDs dan molekul pewarna, seperti kemungkinan terjadinya transfer energi antarmolekul, pengaruh medan lokal, atau terbentuknya kompleks fluoresen. Perubahan posisi puncak dan bentuk spektrum tersebut menunjukkan bahwa sifat emisi CQDs dapat dimodifikasi melalui pencampuran dengan molekul lain. Secara keseluruhan, hasil ini tidak hanya membuktikan stabilitas optik CQDs dalam media kompleks, tetapi juga memperkuat potensinya untuk aplikasi pada sensor fluoresen, pelabelan optik, dan sistem deteksi berbasis cahaya.



Gambar 8. CQD yang diamati di bawah cahaya tampak dan cahaya UV

Gambar di atas menunjukkan perbedaan penampakan larutan Carbon Quantum Dots (CQDs) dan campurannya dengan pewarna batik (naptol dan indigosol) di bawah pencahayaan cahaya tampak (visible light) dan sinar ultraviolet (UV light). Pada bagian kiri gambar (visible light), larutan CQDs tampak berwarna kuning cerah, sedangkan campurannya dengan naptol dan indigosol menghasilkan perubahan warna yang lebih pekat, menjadi oranye dan merah tua. Perubahan ini menunjukkan adanya interaksi antara CQDs dengan pewarna, yang memengaruhi sifat absorpsi optik larutan. Di sisi kanan gambar (UV light), respons fluoresensi dari masing-masing larutan ditampilkan dengan jelas. CQDs murni memperlihatkan emisi biru terang, sesuai dengan hasil karakterisasi spektrum PL sebelumnya yang menunjukkan puncak emisi sekitar 460 nm. Setelah dikombinasikan dengan naptol, larutan memancarkan cahaya merah cerah, menunjukkan kemungkinan terjadinya transfer energi dari CQDs ke molekul naptol yang mengubah spektrum emisinya. Sementara itu, larutan CQDs dengan indigosol tetap menunjukkan fluoresensi biru lemah, mengindikasikan bahwa tidak terjadi pergeseran emisi yang signifikan atau bahwa interaksi antara CQDs dan indigosol bersifat pasif. Perbedaan visual ini mendukung analisis spektroskopi bahwa interaksi antara CQDs dan molekul pewarna dapat memodifikasi sifat optiknya, baik melalui mekanisme transfer energi maupun pembentukan kompleks fluoresen. Hasil ini memperkuat potensi CQDs sebagai agen multifungsi dalam sistem sensor fluoresensi berbasis warna dan aplikasi optoelektronik lainnya.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengeksplorasi bagaimana partikel karbon kecil, yang terbuat dari limbah tembakau, dapat berinteraksi dengan pewarna industri umum. Partikel karbon ini, yang disebut Carbon Quantum Dots (CQDs), dibuat menggunakan metode yang ramah lingkungan dan hemat biaya. Karakteristik sifat optiknya menggunakan spektroskopi UV-Vis, spektroskopi pendaran cahaya, dan mikroskop elektron transmisi (TEM). Interaksi antara CQD dan pewarna dianalisis dengan memeriksa perubahan spektrum serapan. Ketika dicampur dengan pewarna seperti naftol dan indigosol, CQDs menunjukkan perubahan menarik dalam cara mereka menyerap dan memancarkan cahaya, menunjukkan bahwa mereka dapat digunakan untuk mendeteksi atau bahkan menguraikan pewarna berbahaya dalam air limbah. Analisis TEM mengungkapkan morfologi CQDs berukuran nano dan berbentuk bola semu dengan dispersi yang baik. Studi ini menyoroti potensi CQD yang berasal dari tembakau untuk aplikasi dalam degradasi pewarna, pemanenan cahaya, dan sebagai agen multifungsi dalam penginderaan berbasis fluoresensi dan perangkat optoelektronik. Namun, penelitian ini masih memiliki keterbatasan, antara lain pengujian dilakukan pada skala laboratorium sehingga kinerja CQDs pada sistem air limbah industri nyata belum diuji, dan variasi konsentrasi pewarna serta kondisi lingkungan lain belum dieksplorasi sepenuhnya. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan untuk mengoptimalkan sintesis CQDs, menguji efektivitasnya pada skala pilot atau industri, serta mengeksplorasi integrasi CQDs dalam perangkat sensor atau

sistem pengolahan air limbah untuk aplikasi praktis. Hasilnya sangat menarik karena mereka menawarkan cara berkelanjutan untuk mengatasi polusi, mengubah limbah pertanian menjadi alat untuk air yang lebih bersih dan industri yang lebih hijau.

REFERENSI

- Abu, Norhidayah, Shanmugavel Chinnathambi, Mahima Kumar, Fatemeh Etezadi, Noremylia Mohd Bakhori, Zuhana Ahmad Zubir, Shahrul Nizam Md Salleh, et al. "Development of Biomass Waste-Based Carbon Quantum Dots and Their Potential Application as Non-Toxic Bioimaging Agents." *RSC Advances* 13, no. 40 (2023): 28230–49. <https://doi.org/10.1039/d3ra05840a>.
- Arora, Grishika, Nuur Syahidah Sabran, Chai Yan Ng, Foo Wah Low, and H. K. Jun. "Applications of Carbon Quantum Dots in Electrochemical Energy Storage Devices." *Heliyon* 10, no. 15 (2024): e35543. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35543>.
- Arumugam, Nandhini, and Jongsung Kim. "Synthesis of Carbon Quantum Dots from Broccoli and Their Ability to Detect Silver Ions." *Materials Letters* 219, no. February (2018): 37–40. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.02.043>.
- Ayuningtyas, Fadilla Ivana, and Bambang Kun Cahyono. "Klasifikasi Jenis Dan Sebaran Sedimen Menggunakan Data Multibeam Echosounder Multi-Temporal Di Alur Pelayaran Barat Dan Timur Surabaya." *JGISE: Journal of Geospatial Information Science and Engineering* 4, no. 2 (2021): 140. <https://doi.org/10.22146/jgise.62741>.
- Badri, Arini Fousty, Novie Juleanti, Risfidian Mohadi, Mardiyanto, and Aldes Lesbani. "The Efficiency of Mg-Al/Biochar for Methyl Orange and Methyl Red Removal." *Ecological Engineering and Environmental Technology* 23, no. 1 (2022): 202–11. <https://doi.org/10.12912/27197050/142971>.
- Biazar, Nooshin, Reza Poursalehi, and Hamid Delavari. "Optical and Structural Properties of Carbon Dots/TiO₂ Nanostructures Prepared via DC Arc Discharge in Liquid." *AIP Conference Proceedings* 1920 (2018): 1–5. <https://doi.org/10.1063/1.5018965>.
- Borna, Shirin, Reza Emamali Sabzi, and Sajad Pirsa. "Synthesis of Carbon Quantum Dots from Apple Juice and Graphite: Investigation of Fluorescence and Structural Properties and Use as an Electrochemical Sensor for Measuring Letrozole." *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 32, no. 8 (2021): 10866–79. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-05745-5>.
- Bulat, Tanja, Danica Zmejkoski, Zoran Marković, Melissa Satzinger, Janez Kovač, Birgit Strobl, Dušan Milivojević, and Biljana Todorović Marković. "Employing Carbon Quantum Dots to Combat Cytomegalovirus." *Materials Chemistry and Physics* 311 (2024): 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128495>.
- Dastjerdi, Hossein Vahid, Hamidreza Fallah, and Morteza Hajimahmoodzadeh.

"Investigating the Effect of Different Quantum Dots on the Absorption Spectrum and Characteristics of Quantum Dot Sensitized Solar Cells," 2019. <http://arxiv.org/abs/1912.13232>.

El-Shafey, Asmaa M. "Carbon Dots: Discovery, Structure, Fluorescent Properties, and Applications." *Green Processing and Synthesis* 10, no. 1 (2021): 134–56. <https://doi.org/10.1515/gps-2021-0006>.

González-González, Reyna Berenice, Lucy Teresa González, Marc Madou, César Leyva-Porras, Sergio Omar Martínez-Chapa, and Alberto Mendoza. "Synthesis, Purification, and Characterization of Carbon Dots from Non-Activated and Activated Pyrolytic Carbon Black." *Nanomaterials* 12, no. 3 (2022). <https://doi.org/10.3390/nano12030298>.

Gozali Balkanloo, Peyman, Kolsum Mohammad Sharifi, and Ahmad Poursattar Marjani. "Graphene Quantum Dots: Synthesis, Characterization, and Application in Wastewater Treatment: A Review." *Materials Advances* 4, no. 19 (2023): 4272–93. <https://doi.org/10.1039/d3ma00372h>.

Han, Yuwan, Yan Chen, Nan Wang, and Zhanhang He. "Magnesium Doped Carbon Quantum Dots Synthesized by Mechanical Ball Milling and Displayed Fe 3+ Sensing." *Materials Technology* 34, no. 6 (2019): 336–42. <https://doi.org/10.1080/10667857.2018.1556469>.

Hoan, Bui Thi, Phuong Dinh Tam, and Vuong Hung Pham. "Green Synthesis of Highly Luminescent Carbon Quantum Dots from Lemon Juice." *Journal of Nanotechnology* 2019 (2019). <https://doi.org/10.1155/2019/2852816>.

Jung, Hwapyung, Vijay S. Sapner, Arindam Adhikari, Bhaskar R. Sathe, and Rajkumar Patel. "Recent Progress on Carbon Quantum Dots Based Photocatalysis." *Frontiers in Chemistry* 10, no. April (2022): 1–28. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.881495>.

Jusuf, Bella Nathanael, Nonni Soraya Sambudi, I. Isnaeni, and Shafirah Samsuri. "Microwave-Assisted Synthesis of Carbon Dots from Eggshell Membrane Ashes by Using Sodium Hydroxide and Their Usage for Degradation of Methylene Blue." *Journal of Environmental Chemical Engineering* 6, no. 6 (2018): 7426–33. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.10.032>.

Kang Kaiminga, b, Liu Baoyoua*, Han Jua, Ren Hongweia, Wang Liminb, Yue Gang. "Green Preparation and Application of Carbon Quantum Dots Green Preparation and Application of Carbon Quantum Dots," n.d. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/826/1/012036>.

Kaushik, A., S. Basu, K. Singh, V. S. Batra, and M. Balakrishnan. "Activated Carbon from Sugarcane Bagasse Ash for Melanoidins Recovery." *Journal of Environmental Management* 200 (2017): 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.060>.

Khairol Anuar, Nurul Kamilah, Huey Ling Tan, Ying Pei Lim, Mohamad Sufian

- So'aib, and Noor Fitrah Abu Bakar. "A Review on Multifunctional Carbon-Dots Synthesized From Biomass Waste: Design/ Fabrication, Characterization and Applications." *Frontiers in Energy Research* 9, no. April (2021): 1-22. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.626549>.
- Ko, Na Re, Md Nafiujjaman, Kondareddy Cherukula, Sang Ju Lee, Seoung Jin Hong, Ho Nam Lim, Chan Hum Park, In Kyu Park, Yong Kyu Lee, and Il Keun Kwon. "Microwave-Assisted Synthesis of Biocompatible Silk Fibroin-Based Carbon Quantum Dots." *Particle and Particle Systems Characterization* 35, no. 3 (2018): 1-8. <https://doi.org/10.1002/ppsc.201700300>.
- Kolya, Haradhan. "Toxicity of Metal Oxides , Dyes , and Dissolved Organic Matter In," 2024.
- Kumar, Deepak, Aastha Khullar, Neha Sharma, and Naveen Gupta. "Immobilization of Laccase from *Bacillus Subtilis* DS on Chitosan Beads and Standardization of Process for Biodegradation of Textile Dyes." *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 97, no. 2 (2022): 466-73. <https://doi.org/10.1002/jctb.6688>.
- Kumar, Pawan, Shweta Dua, Ravinder Kaur, Mahesh Kumar, and Geeta Bhatt. "A Review on Advancements in Carbon Quantum Dots and Their Application in Photovoltaics." *RSC Advances* 12, no. 8 (2022): 4714-59. <https://doi.org/10.1039/d1ra08452f>.
- Molaei, Mohammad Jafar. "Carbon Quantum Dots and Their Biomedical and Therapeutic Applications: A Review." *RSC Advances* 9, no. 12 (2019): 6460-81. <https://doi.org/10.1039/c8ra08088g>.
- Nammahachak, Nant, Kamonwan Khamphumee Aup-Ngoen, Piyapong Asanithi, Mati Horpratum, Surawut Chuangchote, Sutatch Ratanaphan, and Werasak Surareungchai. "Hydrothermal Synthesis of Carbon Quantum Dots with Size Tunability via Heterogeneous Nucleation." *RSC Advances* 12, no. 49 (2022): 31729-33. <https://doi.org/10.1039/d2ra05989d>.
- Nazar, Muhammad, Muhammad Hasan, Basuki Wirjosentono, Basri A. Gani, and Cut Elvira Nada. "Microwave Synthesis of Carbon Quantum Dots from Arabica Coffee Ground for Fluorescence Detection of Fe³⁺, Pb²⁺, and Cr³⁺." *ACS Omega* 9, no. 18 (2024): 20571-81. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c02254>.
- Omar, Nur Alia Sheh, Yap Wing Fen, Irmawati Ramli, Hazwani Suhaila Hashim, Nur Syahira Md Ramdzan, and Nurul Illya Muhamad Fauzi. "A Review on Carbon Dots: Synthesis, Characterization and Its Application in Optical Sensor for Environmental Monitoring." *Nanomaterials* 12, no. 14 (2022). <https://doi.org/10.3390/nano12142365>.
- Pal, Tathagata, Shanid Mohiyuddin, and Gopinath Packirisamy. "Facile and Green Synthesis of Multicolor Fluorescence Carbon Dots from Curcumin: In Vitro and in Vivo Bioimaging and Other Applications." *ACS Omega* 3, no. 1 (2018): 831-43. <https://doi.org/10.1021/acsomega.7b01323>.

Radinal Yogi Nurcahyo dan Pratama Jujur Wibawa. "Fabrikasi Ramah Lingkungan Komposit Nano Karbon Aktif-Partikel Perak Dan Uji Aktifitas Antibakterinya Radinal," n.d., 31-37.

Rasal, Akash S., Sudesh Yadav, Anchal Yadav, Anil A. Kashale, Subrahmanyam Thagare Manjunatha, Ali Altaee, and Jia Yaw Chang. "Carbon Quantum Dots for Energy Applications: A Review." *ACS Applied Nano Materials* 4, no. 7 (2021): 6515-41. <https://doi.org/10.1021/acsanm.1c01372>.

Saputra, A. Muhammad Afdhal, Averroes Fazlur Rahman Piliang, Dellyansyah, Marpongahtun, Andriayani, Ronn Goei, Risky Ramadhan Risky, and Saharman Gea. "Synthesis, Properties, and Utilization of Carbon Quantum Dots as Photocatalysts on Degradation of Organic Dyes: A Mini Review." *Catalysis Communications* 187, no. December 2023 (2024): 106914. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2024.106914>.

Sharma, Neetu, Indu Sharma, and Milan Kumar Bera. "Microwave-Assisted Green Synthesis of Carbon Quantum Dots Derived from Calotropis Gigantea as a Fluorescent Probe for Bioimaging." *Journal of Fluorescence* 32, no. 3 (2022): 1039-49. <https://doi.org/10.1007/s10895-022-02923-4>.

Shibata, Hisahiko, Mina Abe, Kazuya Sato, Koji Uwai, Kiyotaka Tokuraku, and Toshifumi Iimori. "Microwave-Assisted Synthesis and Formation Mechanism of Fluorescent Carbon Dots from Starch." *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications* 3, no. May (2022): 100218. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2022.100218>.

Surendran, Pandiyan, Arumugam Lakshmanan, Gandhirajan Vinitha, Gopal Ramalingam, and Pitchan Rameshkumar. "Facile Preparation of High Fluorescent Carbon Quantum Dots from Orange Waste Peels for Nonlinear Optical Applications." *Luminescence* 35, no. 2 (2020): 196-202. <https://doi.org/10.1002/bio.3713>.

Torres, Fernando G., Karen N. Gonzales, Omar P. Troncoso, and Victoria S. Cañedo. "Carbon Quantum Dots Based on Marine Polysaccharides: Types, Synthesis, and Applications." *Marine Drugs* 21, no. 6 (2023). <https://doi.org/10.3390/md21060338>.

Tungare, Kanchanlata, Mustansir Bhori, Kavya Sri Racherla, and Siddhi Sawant. "Synthesis, Characterization and Biocompatibility Studies of Carbon Quantum Dots from Phoenix Dactylifera." *3 Biotech* 10, no. 12 (2020): 1-14. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02518-5>.

V.A, ANSI, Sreelakshmi P, Raveendran Poovathinthodiyil, and Renuka N.K. "Table Sugar Derived Carbon Dot – A Promising Green Reducing Agent." *Materials Research Bulletin* 139, no. February (2021): 111284. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2021.111284>.

Wang, Lei, Shujia Weng, Shuai Su, and Weiwei Wang. "Progress on the Luminescence

Mechanism and Application of Carbon Quantum Dots Based on Biomass Synthesis." *RSC Advances* 13, no. 28 (2023): 19173–94. <https://doi.org/10.1039/d3ra02519e>.

Yalshetti, Shweta, Bothe Thokchom, Santosh Mallikarjun Bhavi, Sapam Riches Singh, Sneha R. Patil, B. P. Harini, Mika Sillanpää, J. G. Manjunatha, B. S. Srinath, and Ramesh Babu Yarajarla. "Microwave-Assisted Synthesis, Characterization and in Vitro Biomedical Applications of Hibiscus Rosa-Sinensis Linn.-Mediated Carbon Quantum Dots." *Scientific Reports* 14, no. 1 (2024): 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60726-y>.

Yuan, Dekai, Ping Wang, Liju Yang, Jesse L. Quimby, and Ya Ping Sun. "Carbon 'Quantum' Dots for Bioapplications." *Experimental Biology and Medicine* 247, no. 4 (2022): 300–309. <https://doi.org/10.1177/15353702211057513>.

Zhang, Baohua, Yijian Liu, Muqing Ren, Weitao Li, Xiang Zhang, Robert Vajtai, Pulickel M. Ajayan, James M. Tour, and Liang Wang. "Sustainable Synthesis of Bright Green Fluorescent Nitrogen-Doped Carbon Quantum Dots from Alkali Lignin." *ChemSusChem* 12, no. 18 (2019): 4202–10. <https://doi.org/10.1002/cssc.201901693>.

Zhao, Chunxi, Xiao Li, Chunsheng Cheng, and Yaling Yang. "Green and Microwave-Assisted Synthesis of Carbon Dots and Application for Visual Detection of Cobalt(II) Ions and PH Sensing." *Microchemical Journal* 147, no. January (2019): 183–90. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.03.029>.

Zulfajri, Muhammad, Gangaraju Gedda, Chia Jung Chang, Yuan Pin Chang, and Genin Gary Huang. "Cranberry Beans Derived Carbon Dots as a Potential Fluorescence Sensor for Selective Detection of Fe³⁺ Ions in Aqueous Solution." *ACS Omega* 4, no. 13 (2019): 15382–92. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b01333>.