

Sintesis Dan Sifat Optik *Graphene Quantum DOTS* Dengan Metode Elektrokimia

Evelyna Ikhza Wafiyah¹, Isnaeni Isnaeni², Deski Beri³

¹³Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Negeri Padang

²Pusat Riset Fotonik, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Gedung 442 KST BJ
Habibie, Setu, Tangerang Selatan, Banten, 15314

Email: evelynaiwafiyah@gmail.com deski.beri@fmipa.unp.ac.id

Abstrak

Penelitian ini mengeksplorasi sintesis dan analisis sifat optik Graphene Quantum Dots (GQDs) menggunakan metode elektrokimia untuk mempelajari potensi aplikasinya dalam teknologi optoelektronik dan bioimaging. GQDs merupakan nanomaterial dengan ukuran kuantum yang menunjukkan potensi besar dalam aplikasi elektronik dan optoelektronik karena sifat optik yang unik. Metode elektrokimia dipilih karena kemampuannya menghasilkan GQDs dengan distribusi ukuran yang seragam. Proses sintesis dilakukan dengan menggunakan batang pensil 2B sebagai elektrod dalam larutan elektrolit NaOH dan asam sitrat di bawah pengaruh tegangan listrik. Variasi konsentrasi asam sitrat diterapkan untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap sifat optik GQDs yang dihasilkan. Karakterisasi dilakukan menggunakan spektroskopi UV-Vis, fotoluminesensi (PL), dan *Time-Resolved Photoluminescence* (TRPL). Hasil karakterisasi UV-Vis menunjukkan puncak absorpsi pada panjang gelombang sekitar 212 nm hingga 250 nm, mengindikasikan keberhasilan pembentukan GQDs, serta adanya peningkatan intensitas penyerapan dengan meningkatnya konsentrasi asam sitrat. Spektrum PL menunjukkan emisi cahaya yang kuat dengan perbedaan intensitas yang signifikan, namun dengan puncak emisi yang berada pada panjang gelombang yang hampir sama untuk setiap variasi konsentrasi. Analisis TRPL mengungkapkan bahwa waktu hidup eksitasi luminesensi tidak terpengaruh oleh variasi konsentrasi asam sitrat, dengan semua sampel menunjukkan waktu peluruhan yang seragam. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa metode elektrokimia dapat menghasilkan GQDs dengan sifat optik yang diinginkan dan kontrol yang baik terhadap karakteristik optik nanomaterial tersebut. Penelitian ini memberikan wawasan penting mengenai kontrol sifat optik GQDs melalui variasi konsentrasi prekursor, yang berpotensi untuk aplikasi dalam bidang optoelektronik dan bioimaging, serta memberikan kontribusi penting terhadap pemahaman sifat optik GQDs dan pengembangan lebih lanjut dari aplikasi berbasis nanomaterial ini.

Kata Kunci : *Graphene Quantum Dots, Elektrokimia, Sifat Optik, UV-Vis, Photoluminescence, Time-Resolved Photoluminescence.*

Abstract

This research explores the synthesis and analysis of the optical properties of Graphene Quantum Dots (GQDs) using electrochemical methods to study their potential applications in optoelectronics and bioimaging technologies. GQDs are quantum-sized nanomaterials that show great potential in electronic and optoelectronic applications due to their unique optical properties. The electrochemical method was chosen for its ability to produce GQDs with uniform size distribution. The synthesis process was carried out using a 2B pencil rod as electrodes in NaOH and citric acid electrolyte

solutions under the influence of electric voltage. Variations in citric acid concentration were applied to evaluate its effect on the optical properties of the resulting QDs. Characterization was performed using UV-Vis spectroscopy, photoluminescence (PL), and Time-Resolved Photoluminescence (TRPL). UV-Vis characterization results showed absorption peaks at wavelengths around 212 nm to 250 nm, indicating the successful formation of QDs, as well as an increase in absorption intensity with increasing citric acid concentration. PL spectra showed strong light emission with significant differences in intensity, but with emission peaks at almost the same wavelength for each concentration variation. TRPL analysis revealed that the luminescence excitation lifetimes were not affected by variations in citric acid concentration, with all samples exhibiting uniform decay times. The results of this study demonstrate that electrochemical methods can produce QDs with desirable optical properties and good control of the optical characteristics of such nanomaterials. This study provides important insights into the control of the optical properties of QDs through variations in precursor concentration, which has potential for applications in the fields of optoelectronics and bioimaging, and makes an important contribution to the understanding of the optical properties of QDs and the further development of these nanomaterial-based applications.

Keywords : *Graphene Quantum Dots ; Electrochemical ; UV-Vis ; Photoluminescence ; Time-Resolved Photoluminescence.*

PENDAHULUAN

Kemajuan material nano berstruktur telah menarik perhatian signifikan di berbagai bidang penelitian, termasuk biomedis, percetakan, dan optoelektronik. Salah satu material yang mendapat sorotan khusus adalah graphene quantum dots (GQD), turunan dari graphene dengan dimensi nol. Selama dekade terakhir, GQD menjadi fokus utama dalam pembuatan biosensor elektrokimia dan optik. GQD, yang merupakan bagian dari titik-titik karbon neon (CD) dengan struktur graphene, memiliki berbagai sifat unggul seperti kekuatan mekanik tinggi, elastisitas, stabilitas termal, luas permukaan yang besar, dan konduktivitas listrik yang baik. Selain itu, GQD menawarkan keunggulan tambahan seperti kelarutan tinggi dalam air, celah pita yang dapat disesuaikan, dan kemudahan fungsionalisasi permukaan berkat efek pengurangan tepi dan kuantum (Kalkal et al. 2021).

Nanomaterial adalah material yang memiliki setidaknya satu dimensi dalam kisaran 1-100 nm (De Mello Donegá 2014). Nanomaterial umumnya diklasifikasikan berdasarkan dimensi, morfologi, komposisi, keseragaman, dan aglomerasi. Konsep dimensi sangat penting dalam klasifikasi nanomaterial. Nanomaterial nol dimensi (0-D) memiliki semua dimensinya dalam ukuran yang sangat kecil, yaitu kurang dari 100 nm (misalnya nanopartikel). Nanopartikel satu dimensi (1-D) memiliki dua dimensi dalam skala nanometer dan satu dimensi yang sangat signifikan dibandingkan dua dimensi lainnya, biasanya memiliki panjang beberapa mikrometer (>100 nm). Pada nanomaterial 2-D, hanya satu dimensi yang berada dalam skala nanometer, sedangkan dua dimensi lainnya secara signifikan lebih besar. Nanomaterial tiga dimensi (3-D), atau nanocrystal, memiliki semua dimensinya di luar rentang nanometer dan sering kali disebut sebagai bulk karena semua dimensinya lebih dari 100 nm (Goyal 2017).

Quantum dots (QDs) adalah nanokristal semikonduktor yang sangat kecil dengan 100 hingga 10.000 atom, berkisar antara 1,5 hingga 10 nm. Sifat optik QDs unik karena perubahan energi celah pita akibat efek konfinemen kuantum. Ketika cahaya diserap, terbentuk pasangan elektron-lubang yang disebut "eksiton," dan saat rekombinasi, energi dilepaskan sebagai foton. Efek konfinemen kuantum terjadi ketika ukuran partikel lebih kecil dari radius Bohr. QDs dengan ukuran lebih kecil memiliki

energi celah pita yang lebih besar, menghasilkan foton dengan energi lebih tinggi. QDs telah berhasil disintesis dengan beragam emisi, mulai dari ultraviolet dekat hingga inframerah (Maxwell et al. 2019).

Grafen adalah lapisan atom karbon tunggal dua dimensi (2D) dengan sifat elektronik, termal, mekanik, dan kimia yang unik. Sifat-sifat grafen ini banyak dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi seperti sel surya, superkapasitor, biosensor, dan lainnya. Meskipun grafen telah diaplikasikan di berbagai bidang, grafen tidak memiliki celah pita sehingga pendaran optiknya tidak ada. Namun, celah pita grafen dapat disetel dengan mengubah lembaran grafen 2D menjadi graphene quantum dots (GQDs) 0D yang berukuran lebih kecil dari 10 nm. GQDs ini menunjukkan fenomena yang berbeda seperti kurungan kuantum dan efek tepi (Ahirwar, Mallick, and Bahadur 2017; Kalita et al. 2020; Shehab, Ebrahim, and Soliman 2017).

Graphene Quantum Dots (GQDs) adalah nanomaterial berbasis karbon nol dimensi yang terdiri dari lembaran nanografen (Jovanović et al. 2020). GQDs memiliki banyak keunggulan dibandingkan grafen, termasuk kelarutan yang lebih tinggi dalam air, kemampuan penyetelan celah pita, serta kemudahan dalam fungsionalisasi permukaan berkat efek tepi dan efek kurungan kuantum. Selain itu, GQDs dikenal karena biokompatibilitas yang sangat baik dan berbagai gugus fungsi di permukaannya yang berperan sebagai situs aktif di tepi atau bidang dasar. Kelembaman kimia, toksisitas rendah, aktivitas fluoresen tinggi, stabilitas fotoluminesensi, dan pencangkakan permukaan yang superior membuat GQDs cocok untuk berbagai perangkat optoelektronik, sensor, dan bioimaging (Kalkal et al. 2021; Shehab et al. 2017; Tian et al. 2018).

GQDs memiliki sifat pendaran yang luar biasa, terutama terkait dengan kondisi permukaan atau efek tepi. Kondisi permukaan ini memungkinkan perilaku photoluminescence (PL) GQDs yang bergantung pada eksitasi. Sifat-sifat ini sering kali terkait dengan keberadaan gugus fungsi kaya oksigen dalam struktur GQDs. Dibandingkan dengan carbon quantum dots (CDs), GQDs memiliki struktur yang berbeda dengan CDs berbentuk bulat dan terbuat dari atom karbon sp² terhibridisasi dengan ukuran kurang dari 15 nm. Hal ini menjadikan GQDs sebagai material yang menarik dalam berbagai aplikasi nanoteknologi, terutama dalam hal karakteristik struktural dan optik yang unik (Ahirwar et al. 2017; Danial et al. 2021; Jovanović et al. 2020).

GQD menunjukkan fluoresensi berwarna yang beragam ketika terpapar oleh cahaya UV, menghasilkan fluoresensi merah, kuning, hijau, biru, dan sebagainya. Sifat optik GQD dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk ukuran, pH larutan koloid, dan ketebalan struktur. Panjang gelombang eksitasi dapat menyebabkan pergeseran atau tidak ada pergeseran pada puncak emisi, tergantung pada keberadaan situs zigzag bebas dan struktur konjugasi elektron. Konversi antara orbital molekuler terendah yang tidak terisi (LUMO) dan orbital molekuler tertinggi yang diisi (HOMO) tercermin dalam spektrum fluoresensi. GQD menunjukkan fluoresensi kuat pada pH basa, sementara mengalami pemadaman fluoresensi pada pH asam, yang dapat diatributkan pada deprotonasi dan protonasi situs zigzag bebas. Penggunaan polietilena glikol (PEG) sebagai pasivasi pada GQD menghasilkan intensitas fluoresensi maksimum pada pH 7. Ketebalan GQD juga mempengaruhi intensitas fluoresensi, dengan multilapis GQD dapat mengakibatkan pemadaman pada lapisan teratas. Luminesensi upconversion GQD, meskipun belum sepenuhnya dieksplorasi, menunjukkan adanya fluoresensi hijau yang diupkan saat dieksitasi dengan laser 900 nm (Kalkal et al. 2021).

Sintesis GQD dapat dilakukan melalui dua pendekatan utama: top-down dan bottom-up. Metode top-down biasanya melibatkan pemotongan bahan seperti serat karbon, lembaran graphene, elektroda graphene, bubuk grafit, atau bahan tanaman seperti daun mangga menjadi GQD melalui proses oksidasi, pengelupasan kimiawi, sintesis hidrotermal, sintesis elektrokimia, sintesis berbantuan UV, dan sintesis

gelombang mikro. Meskipun banyak teknik top-down memerlukan bahan kimia yang kuat dan protokol sintesis yang rumit, teknik bottom-up umumnya memerlukan peralatan khusus dan proses yang memakan waktu. Oleh karena itu, diperlukan metode sintesis GQD yang sederhana, efisien, dan ekonomis untuk memfasilitasi aplikasi luas dari material ini (Ahirwar et al. 2017).

Dalam penelitian ini, kami memperkenalkan pendekatan baru untuk sintesis GQD yang sederhana dan efisien dengan menggunakan batang grafit pensil 2B dan pengelupasan kulit secara elektrokimia, menggunakan elektrolit yang merupakan kombinasi asam lemah dan alkali hidroksida yang kuat. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan kontribusi pada pengetahuan yang berkembang tentang GQD dengan mengeksplorasi aspek sintesis dan karakterisasi GQD melalui metode elektrolisis. Pendekatan baru ini diharapkan dapat memberikan metode alternatif yang lebih sederhana dan ekonomis dalam produksi GQD, serta membuka peluang baru untuk aplikasi dalam berbagai bidang, khususnya dalam pembuatan biosensor optik dan elektrokimia..

METODE

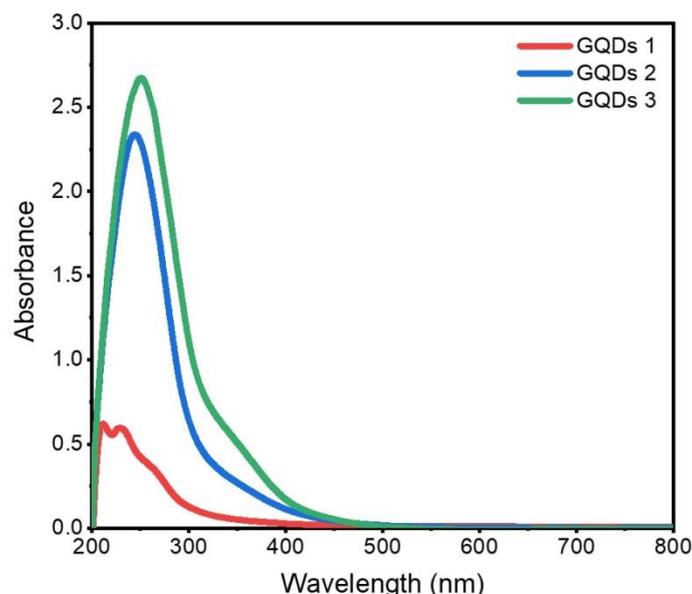
Sintesis *Graphene Quantum Dots* (GQDs) menggunakan metode elektrokimia, di mana pensil 2B digunakan sebagai katoda dan anoda yang ditempatkan dengan jarak sekitar 1 cm satu sama lain. Larutan elektrolit yang digunakan terdiri dari NaOH 0,15 M dan variasi konsentrasi asam sitrat (0,025 M; 0,05 M; 0,075 M) yang dilarutkan dalam 50 mL etanol 96%. Elektroda dihubungkan ke catu daya DC dengan arus sekitar 45mA selama 4 jam pada suhu ruang. Hasil dari proses ini adalah larutan berwarna kuning transparan, yang menunjukkan bahwa GQDs telah berhasil disintesis. Setelah proses sintesis, larutan GQDs yang dihasilkan kemudian dikarakterisasi dengan spektroskopi UV-Vis, PL, dan TRPL untuk menentukan sifat optiknya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

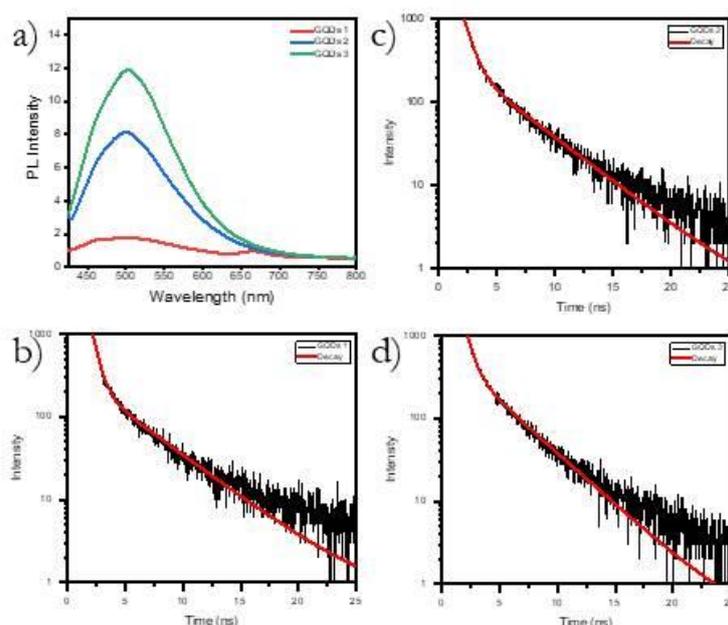
Hasil

Sintesis GQDs yang dilakukan selama 2 jam dengan metode elektrokimia menghasilkan larutan GQDs berwarna kuning transparan pada cahaya normal. Pada penelitian ini, larutan GQDs yang dihasilkan diberi kode sesuai dengan konsentrasi asam sitrat yang digunakan, yaitu GQDs 1 (asam sitrat 0,025 M), GQDs 2 (asam sitrat 0,05 M), dan GQDs 3 (asam sitrat 0,075 M).

Spektroskopi UV-Vis merupakan alat dasar yang digunakan untuk identifikasi kuantitatif berbagai analit, senyawa organik dengan konjugasi tinggi, dan titik-titik kuantum yang aktif secara optik. Teknik ini sering digunakan untuk mempelajari panjang gelombang eksitasi GQDs. Spektrum UV-Vis GQD biasanya menunjukkan dua jenis puncak: puncak di bawah 300 nm yang terkait dengan transisi $\pi \rightarrow \pi^*$ akibat struktur aromatik C=C, dan puncak antara 300 dan 390 nm yang dikaitkan dengan transisi elektron dari $n \rightarrow \pi^*$ yang disebabkan oleh gugus yang mengandung oksigen pada permukaan GQD (Kundu and Pillai 2020; Liu et al. 2018). Namun, pada penelitian ini tidak ditemukan adanya puncak absorbansi di atas 300 nm karena kepekatan larutan GQDs sehingga puncak yang menonjol hanya pada panjang gelombang di bawah 300 nm. Pada Gambar 1, terlihat bahwa GQDs 1 menunjukkan puncak absorbansi pada panjang gelombang 212 nm dan 230 nm, GQDs 2 pada 243 nm, dan GQDs 3 pada 250 nm. Pergeseran yang terjadi pada puncak absorbansi dengan variasi konsentrasi asam sitrat tidak terlalu signifikan, akan tetapi peningkatan absorbansi sangat signifikan terjadi pada variasi GQDs 2.



Gambar 1. Hasil karakterisasi UV-Vis GQDs 1 - GQDs 3



Gambar 2. Hasil karakterisasi PL GQDs 1 - GQDs 3 (a) dan TRPL GQDs 1 - GQDs 3 (b-d)

Karakterisasi PL GQDs dilakukan dengan eksitasi 405 nm. Pada Gambar 2 (a), GQDs 1 hingga GQDs 3 memperlihatkan puncak emisi pada panjang gelombang yang sama yaitu pada 500 nm dengan perbedaan intensitas yang cukup signifikan. Namun, pada GQDs 1 terlihat puncak emisi lainnya pada 666 nm yang mana pada panjang gelombang ini memiliki pendaran berwarna merah. Faktor-faktor seperti pengurangan kuantum dan keadaan permukaan memainkan peran penting dalam mengubah celah pita GQDs dan mendefinisikan distribusi energi mereka (Yang, Martinez, and Chiang 2017). Sama halnya dengan TRPL yang ditunjukkan pada Gambar 2 (b-d), kurva waktu peluruhan tersebut menggunakan persamaan peluruhan eksponensial ganda berikut :

$$y = A_1 \exp(-x/\tau_1) + A_2 \exp(-x/\tau_2) + y_0$$

sedangkan rata-rata waktu peluruhan dihitung dengan rumus berikut :

$$\tau_{Average} = \sum_{n=1}^2 \frac{A_n \tau_n^2}{A_n \tau_n}$$

(Isnaeni et al. 2023)

Berdasarkan persamaan tersebut, diketahui masa pakai elektron ketiga variasi GQDs adalah sama yaitu 4 ns. Masa pakai fluoresensi dalam rentang nanodetik menunjukkan bahwa ketiga variasi memiliki sifat keadaan tunggal (Ge et al. 2014; Zhu et al. 2015).

Pembahasan

Penelitian ini mempelajari karakteristik optik dan elektronik dari Graphene Quantum Dots (GQDs) yang disintesis menggunakan metode elektrokimia dengan variasi konsentrasi asam sitrat dan NaOH sebagai elektrolit. Berdasarkan hasil karakterisasi UV-Vis, PL, dan TRPL, ditemukan variasi yang signifikan dalam sifat optik GQDs yang dihasilkan dari tiga konsentrasi asam sitrat yang berbeda.

Hasil karakterisasi UV-Vis menunjukkan bahwa GQDs 1 memiliki dua puncak absorbansi terpisah pada 212 nm dan 230 nm. Hal ini mengindikasikan adanya dua jenis transisi elektronik yang berbeda, kemungkinan besar disebabkan oleh variasi ukuran partikel atau ketidakseragaman struktur dalam GQDs1. Sebaliknya, GQDs 2 menampilkan satu puncak absorbansi pada 243 nm, menunjukkan ukuran partikel yang lebih seragam dan struktur yang lebih teratur. GQDs 3 menunjukkan puncak absorbansi tertinggi pada 250 nm, yang menandakan partikel yang lebih besar atau konsentrasi gugus fungsi yang lebih tinggi.

Dalam karakterisasi photoluminescence (PL), GQDs1 menunjukkan spektrum emisi yang melebar dengan dua puncak pada 500 nm dan 666 nm, menunjukkan heterogenitas dalam ukuran partikel dan lingkungan elektroniknya. Sementara itu, GQDs2 dan GQDs3 memiliki puncak emisi pada 500 nm, namun dengan intensitas yang berbeda. GQDs2 menunjukkan intensitas yang lebih tinggi dibandingkan GQDs3, yang menunjukkan efisiensi kuantum yang lebih baik pada GQDs2.

Hasil time-resolved photoluminescence (TRPL) menunjukkan bahwa ketiga variasi GQDs memiliki waktu peluruhan yang sama, yaitu 4 nanodetik (ns). Kesamaan ini menunjukkan bahwa mekanisme peluruhan luminesensi yang dominan dalam ketiga variasi GQDs serupa, meskipun terdapat perbedaan dalam spektrum absorbansi dan intensitas PL. Hal ini menunjukkan bahwa dinamika dasar dari eksitasi dan rekombinasi eksiton dalam GQDs tetap konstan meskipun ada variasi dalam sintesis. Keseragaman dalam waktu peluruhan menunjukkan bahwa variasi asam sitrat dalam sintesis tidak secara signifikan mempengaruhi *trap states* atau *defect states* yang dapat memperpanjang waktu peluruhan. Ini berarti bahwa meskipun terdapat perbedaan dalam spektrum absorbansi dan intensitas PL, dinamika dasar eksitasi dan rekombinasi eksiton dalam GQDs tetap konsisten. Hasil ini memberikan dasar yang kuat untuk optimasi lebih lanjut dalam aplikasi GQDs, karena menunjukkan bahwa parameter sintesis dapat dimodifikasi tanpa mengubah secara signifikan waktu peluruhan eksiton yang penting untuk aplikasi optik dan elektronik.

Ketiga hasil karakterisasi ini memberikan gambaran komprehensif tentang bagaimana variasi konsentrasi asam sitrat mempengaruhi sifat optik dan elektronik GQDs. Variasi dalam puncak absorbansi dan intensitas PL menunjukkan perbedaan dalam ukuran partikel dan efisiensi kuantum, sementara kesamaan dalam waktu peluruhan TRPL menunjukkan bahwa dinamika eksiton dasar tetap konstan. Pemahaman ini penting untuk mengoptimalkan proses sintesis GQDs agar sesuai dengan aplikasi spesifik seperti bioimaging, sensor, dan perangkat optoelektronik, di mana sifat optik dan elektronik yang konsisten dan dapat dikendalikan sangat diperlukan.

SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi konsentrasi asam sitrat dalam proses sintesis GQDs secara signifikan mempengaruhi sifat optik dan elektronik dari GQDs yang dihasilkan. Karakterisasi UV-Vis mengindikasikan bahwa GQDs dengan konsentrasi asam sitrat yang lebih tinggi memiliki puncak absorpsi yang lebih tinggi, menunjukkan ukuran partikel yang lebih besar atau konsentrasi gugus fungsi yang lebih tinggi. Analisis photoluminescence (PL) mengungkapkan bahwa GQDs dengan konsentrasi asam sitrat rendah memiliki spektrum emisi yang lebih lebar, sementara GQDs dengan konsentrasi lebih tinggi menunjukkan emisi yang lebih seragam tetapi dengan intensitas yang bervariasi. Keseragaman waktu peluruhan dalam karakterisasi TRPL menunjukkan bahwa meskipun terdapat perbedaan dalam spektrum absorpsi dan intensitas PL, dinamika dasar eksitasi dan rekombinasi eksiton tetap konstan. Hasil ini memberikan wawasan penting untuk optimasi proses sintesis GQDs, yang memungkinkan pengendalian sifat optik dan elektronik untuk aplikasi spesifik seperti bioimaging, sensor, dan perangkat optoelektronik.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahirwar, Satyaprakash, Sudhanshu Mallick, and Dharendra Bahadur. 2017. "Electrochemical Method to Prepare Graphene Quantum Dots and Graphene Oxide Quantum Dots." *ACS Omega* 2(11):8343–53. doi: 10.1021/acsomega.7b01539.
- Danial, Wan Hazman, Noriliya Aina Norhisham, Ahmad Fakhrurrazi Ahmad Noorden, Zaiton Abdul Majid, Kazunari Matsumura, and Anwar Iqbal. 2021. "A Short Review on Electrochemical Exfoliation of Graphene and Graphene Quantum Dots." *Carbon Letters* 31(3):371–88. doi: 10.1007/s42823-020-00212-3.
- Ge, Jiechao, Minhuan Lan, Bingjiang Zhou, Weimin Liu, Liang Guo, Hui Wang, Qingyan Jia, Guangle Niu, Xing Huang, Hangyue Zhou, Xiangmin Meng, Pengfei Wang, Chun Sing Lee, Wenjun Zhang, and Xiaodong Han. 2014. "A Graphene Quantum Dot Photodynamic Therapy Agent with High Singlet Oxygen Generation." *Nature Communications* 5:1–8. doi: 10.1038/ncomms5596.
- Goyal, Rajendra Kumar. 2017. *Nanomaterials and Nanocomposites*.
- Isnaeni, Isnaeni, Vivi Purwandari, Permono Adi Putro, and Hammam Magma Adiwidya. 2023. "Optical Properties of Sodium-Doped Carbon Dots Made of Urea and Trisodium Citrate." *TIME in Physics* 1(1):1–9. doi: 10.11594/timeinphys.2023.v1i1p1-9.
- Jovanović, Svetlana, Slađana Dorončić, Dragana Jovanović, Gabriele Ciasca, Milica Budimir, Aurelio Bonasera, Michelangelo Scopelliti, Olivera Marković, and Biljana Todorović Marković. 2020. "Gamma Irradiation of Graphene Quantum Dots with Ethylenediamine: Antioxidant for Ion Sensing." *Ceramics International* 46(15):23611–22. doi: 10.1016/j.ceramint.2020.06.133.
- Kalita, Hemen, Vinay S. Palaparthi, Maryam Shojaei Baghini, and M. Aslam. 2020. "Electrochemical Synthesis of Graphene Quantum Dots from Graphene Oxide at Room Temperature and Its Soil Moisture Sensing Properties." *Carbon* 165:9–17. doi: 10.1016/j.carbon.2020.04.021.
- Kalkal, Ashish, Sachin Kadian, Rangadhar Pradhan, Gaurav Manik, and Gopinath Packirisamy. 2021. "Recent Advances in Graphene Quantum Dot-Based Optical and Electrochemical (Bio)Analytical Sensors." *Materials Advances* 2(17):5513–41. doi: 10.1039/d1ma00251a.
- Kundu, Sumana, and Vijayamohanan K. Pillai. 2020. "Synthesis and Characterization of Graphene Quantum Dots." *Physical Sciences Reviews* 5(4):1–35. doi: 10.1515/psr-2019-0013.
- Liu, Quanrun, Jingjie Zhang, He He, Guangxu Huang, Baolin Xing, Jianbo Jia, and Chuanxiang Zhang. 2018. "Green Preparation of High Yield Fluorescent Graphene Quantum Dots from Coal-Tar-Pitch by Mild Oxidation." *Nanomaterials*

8(10). doi: 10.3390/nano8100844.

- Maxwell, Tyler, Maria Gabriela Nogueira Campos, Stephen Smith, Mitsushita Doomra, Zon Thwin, and Swadeshmukul Santra. 2019. *Quantum Dots*. Elsevier Inc.
- De Mello Donegá, Celso. 2014. *Nanoparticles: Workhorses of Nanoscience*. Vol. 9783662448.
- Shehab, Mona, Shaker Ebrahim, and Moataz Soliman. 2017. "Graphene Quantum Dots Prepared from Glucose as Optical Sensor for Glucose." *Journal of Luminescence* 184:110–16. doi: 10.1016/j.jlumin.2016.12.006.
- Tian, P., L. Tang, K. S. Teng, and S. P. Lau. 2018. "Graphene Quantum Dots from Chemistry to Applications." *Materials Today Chemistry* 10:221–58. doi: 10.1016/j.mtchem.2018.09.007.
- Yang, Jih Siang, Dean Aidan Martinez, and Wei Hung Chiang. 2017. *Synthesis, Characterization and Applications of Graphene Quantum Dots*. Vol. 83.
- Zhu, Shoujun, Jieren Shao, Yubin Song, Xiaohuan Zhao, Jianglin Du, Lei Wang, Haiyu Wang, Kai Zhang, Junhu Zhang, and Bai Yang. 2015. "Investigating the Surface State of Graphene Quantum Dots." *Nanoscale* 7(17):7927–33. doi: 10.1039/C5NR01178G.