p-ISSN : 2302-4216
e-ISSN : 2830-1765
Inovasi Fisika Indonesia
https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/inovasi-fisika-indonesia
Published by:
Program Studi Fisika
Jurusan Fisika FMIPA
Universitas Negeri Surabaya
Kampus Unesa Ketintang Jl. Ketintang Gd. C3 Lt. 1
Surabaya - Indonesia
jifi@unesa.ac.id

Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI) Volume 15 Nomor 3 Tahun 2026, hal 480-492

SINTESIS CARBON DOTS DARI AMPAS KOPI DENGAN MENGGUNAKAN METODE HIDROTERMAL

[1)]Nathasa Aulia Dea Vinca, [2)]Diah Hari Kusumawati

[1)] Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: nathasaaulia.22010@mhs.unesa.ac.id
[2)] Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: diahkusumawati@unesa.ac.id

Abstrak

Carbon Dots (C-Dots) merupakan nanomaterial karbon yang memiliki sifat optik menarik, seperti kemampuan menyerap cahaya ultraviolet dan menghasilkan emisi fluoresensi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi massa ampas kopi sebagai prekursor terhadap karakteristik optik C-Dots yang disintesis menggunakan metode hidrotermal. Sintesis dilakukan menggunakan variasi massa ampas kopi 2 g, 4 g, dan 6 g pada suhu 160°C selama 6 jam. Karakterisasi dilakukan menggunakan spektrofotometer UV-Visible (UV-Vis) dan *Photoluminescence* (PL). Hasil karakterisasi UV-Vis menunjukkan pita serapan pada rentang 348–355 nm yang berkaitan dengan transisi elektronik π→π* dan n→π*. Nilai absorbansi tertinggi diperoleh pada sampel CDAK-6 sebesar 3,294 a.u. pada panjang gelombang 348 nm. Analisis energi gap menunjukkan nilai sebesar 2,90 eV, 2,73 eV, dan 3,10 eV masing-masing untuk sampel CDAK-2, CDAK-4, dan CDAK-6. Karakterisasi PL menunjukkan bahwa seluruh sampel menghasilkan emisi fluoresensi pada daerah cahaya biru dengan panjang gelombang emisi 473–479 nm, dengan intensitas emisi tertinggi diperoleh pada sampel CDAK-4. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi massa ampas kopi memengaruhi karakteristik optik Carbon Dots, dengan sampel CDAK-4 menunjukkan karakteristik energi gap dan intensitas emisi fluoresensi yang paling menonjol. Karakteristik tersebut menunjukkan potensi C-Dots berbahan dasar ampas kopi untuk dikembangkan sebagai material fluoresen dalam aplikasi sensor optik dan optoelektronik.

Kata Kunci: Carbon Dots, ampas kopi, hidrotermal, UV-Vis, *photoluminescence*.

Abstract

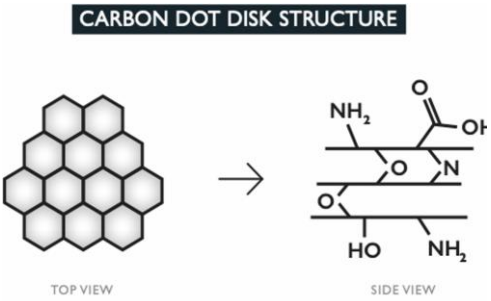
Carbon Dots (C-Dots) are carbon-based nanomaterials with attractive optical properties, including ultraviolet light absorption and fluorescence emission. This study aimed to investigate the effect of spent coffee grounds mass variation as a precursor on the optical characteristics of C-Dots synthesized using the hydrothermal method. C-Dots were synthesized using 2 g, 4 g, and 6 g of spent coffee grounds at 160°C for 6 h. The synthesized samples were characterized using UV–Visible (UV–Vis) spectroscopy and Photoluminescence (PL) spectroscopy. The UV–Vis spectra exhibited absorption bands in the range of 348–355 nm associated with π→π and n→π* electronic transitions. The highest absorbance of 3.294 a.u. was obtained for the CDAK-6 sample at 348 nm. Band gap analysis yielded values of 2.90, 2.73, and 3.10 eV for CDAK-2, CDAK-4, and CDAK-6, respectively. PL characterization showed blue fluorescence emission with emission peaks at 473–479 nm for all samples, while the highest fluorescence intensity was observed for the CDAK-4 sample. The results indicate that variations in coffee grounds mass affect the optical properties of Carbon Dots, with sample CDAK-4 exhibiting the most notable characteristics in terms of band gap energy and fluorescence emission intensity. These characteristics indicate the potential of coffee grounds-derived C-Dots for further development as fluorescent materials in optical sensor and optoelectronic applications.*

***Keywords**: Carbon Dots, spent coffee grounds, hydrothermal, UV–Vis, photoluminescence.*

p-ISSN : 2302-4216
e-ISSN : 2830-1765
Inovasi Fisika Indonesia
https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/inovasi-fisika-indonesia
Published by:
Program Studi Fisika
Jurusan Fisika FMIPA
Universitas Negeri Surabaya
Kampus Unesa Ketintang Jl. Ketintang Gd. C3 Lt. 1
Surabaya - Indonesia
jifi@unesa.ac.id

I. PENDAHULUAN

Karbon merupakan unsur non-logam yang mampu tersusun dalam beragam bentuk alotrop, masing-masing dengan karakteristik fisik dan kimia yang berbeda, sehingga menjadikan karbon sebagai salah satu material dasar yang penting dalam pengembangan ilmu material modern (Krueger, 2010). Istilah karbon atau *carbon,* berasal dari bahasa Latin "*carbo*" yang berarti arang. Karbon dikenal dalam beragam bentuk, baik dalam struktur polimorfik maupun dalam kondisi amorf. Salah satu jenis nanomaterial karbon yang menunjukkan sifat fluoresensi khas dan mulai mendapat perhatian luas dalam perkembangan ilmu material modern adalah karbon nanodots (C-Dots). C-Dots pertama kali teridentifikasi secara tidak sengaja pada proses pemurnian karbon nanotube berdinding tunggal, yang kemudian membuka peluang penelitian lebih lanjut terkait sifat optik dan strukturnya. Hal tersebut disebabkan oleh kemampuan C-Dots dalam menghasilkan fotoluminesensi yang tinggi (Sugiarti dan Darmawan, 2015). Pemanfaatan limbah biomassa sebagai prekursor alternatif dalam sintesis C-Dots semakin mendapat perhatian, karena bahan tersebut tersedia melimpah, bersifat tidak beracun, berbiaya rendah, serta dapat diperbarui (Xie *et al*., 2019).

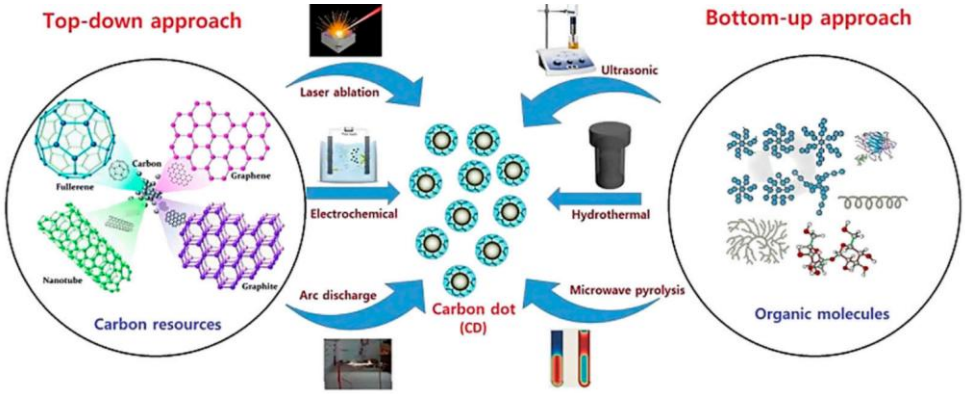


Gambar 1. Morfologi dan struktur carbon dots (CDs): tampilan atas dan samping dari morfologi berbentuk cakram yang tersusun atas lembaran karbon aromatik mirip grafena

Salah satu limbah biomassa yang mendapat perhatian adalah ampas kopi (*coffee grounds*), yakni material sisa yang dihasilkan dari proses ekstraksi bubuk kopi menggunakan air panas atau uap pada saat penyeduhan. Ampas kopi merupakan limbah padat yang berasal dari sisa bubuk kopi setelah proses penyeduhan atau pengolahan biji kopi, yang mengandung unsur hara seperti nitrogen, kalium, dan magnesium. Penelitian Park dan Yang (2022) menunjukkan bahwa C-Dots berbasis ampas kopi memiliki emisi fluoresensi pada sekitar 460 nm, ukuran partikel yang relatif seragam pada kisaran 6–7 nm, serta nilai quantum yield sebesar 11%. Temuan serupa juga dilaporkan oleh (Keenan et al., 2019) Zhou et al. (2025), yang menegaskan potensi biomassa kopi sebagai bahan baku carbon dots untuk berbagai aplikasi lanjutan. Perbedaan pendekatan sintesis pada berbagai penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode yang digunakan berperan penting dalam menentukan karakteristik C-Dots, di mana metode hidrotermal banyak dipilih karena prosesnya yang sederhana, efisien secara biaya, serta kemampuannya membentuk gugus fungsional yang mempengaruhi kelarutan dan sifat fotoluminesensi material.

Secara umum, metode sintesis C-Dots dapat dikelompokkan menjadi dua pendekatan utama, yaitu metode *top-down* dan *bottom-up*. Metode *top-down* dilakukan dengan memecah material karbon berukuran besar menjadi partikel nano melalui proses fisik atau kimia. Sementara itu, metode *bottom-up* dilakukan dengan membangun struktur karbon dari molekul kecil melalui reaksi kimia tertentu. Metode hidrotermal termasuk dalam pendekatan *bottom-up* dan banyak digunakan dalam sintesis C-Dots berbasis biomassa. Metode hidrotermal merupakan teknik sintesis yang dilakukan dalam sistem tertutup pada suhu dan tekanan tinggi menggunakan pelarut, umumnya air (H_2O), sebagai media reaksi. Metode hidrotermal banyak digunakan dalam sintesis C-Dots berbasis biomassa karena mampu menghasilkan partikel dengan distribusi

ukuran yang relatif sederhana, ramah lingkungan, serta mampu menghasilkan partikel dengan distribusi ukuran yang cukup seragam. Sifat listrik dan sifat optik C-Dots yang diperoleh melalui metode hidrotermal dapat dipengaruhi oleh variasi jenis prekursor organik serta adanya perubahan kondisi reaksi, seperti suhu pemanasan.



Gambar 2. Skema pendekatan *top-down* dan *bottom-up* dalam sintesis C-Dots (De dan Karak, 2017)

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk memanfaatkan limbah biomassa ampas kopi sebagai prekursor dalam sintesis C-Dots menggunakan metode hidrotermal dengan variasi massa bahan. Kandungan senyawa organik pada ampas kopi, seperti selulosa, hemiselulosa, lignin, serta senyawa karbon lainnya, mengalami proses karbonisasi selama sintesis hidrotermal sehingga membentuk struktur C-Dots. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui karakteristik C-Dots yang dihasilkan melalui analisis sifat optik menggunakan spektrofotometer UV-Vis dan *Photoluminescence* (PL). Karakterisasi dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi massa ampas kopi terhadap karakteristik C-Dots yang dihasilkan. Variasi massa prekursor pada metode hidrotermal memengaruhi proses pembentukan inti karbon, distribusi gugus fungsi permukaan, serta sifat optik C-Dots, sehingga menghasilkan karakteristik material yang berbeda.

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen yang berfokus pada sintesis dan karakterisasi C-Dots yang berasal dari ampas kopi menggunakan metode hidrotermal. Pemilihan ampas kopi sebagai sumber karbon didasarkan pada ketersediaannya yang melimpah, kandungan karbon yang tinggi, serta potensinya sebagai limbah biomassa yang menjadi material bernilai tambah. Tahapan penelitian meliputi pembuatan larutan prekursor sebagai sumber karbon, proses sintesis C-Dots, uji fluoresensi awal secara kualitatif, serta karakterisasi untuk mengetahui sifat optik. Karakterisasi dilakukan menggunakan spektroskopi UV–*Visible* (UV–Vis), *Photoluminescence* (PL). Penelitian diawali dengan pembuatan prekursor C-Dots dari ampas kopi sebagai sumber karbon.

Pembuatan larutan prekursor diawali dengan mencampurkan ampas kopi kering dengan akuades sebanyak 20 mL. Massa ampas kopi yang digunakan divariasikan menjadi 2 g, 4 g, dan 6 g. Campuran kemudian dihomogenkan menggunakan spatula dan *magnetic stirrer*, selanjutnya dipanaskan pada suhu sekitar 70°C sambil diaduk untuk membantu proses ekstraksi senyawa karbon dari ampas kopi. Setelah pemanasan selesai, campuran didinginkan hingga suhu ruang dan disaring untuk memisahkan partikel padat yang tersisa.



Gambar 3. Proses Pembuatan Larutan Prekursor C-Dots

Larutan prekursor dari masing-masing variasi massa selanjutnya digunakan dalam proses sintesis C-Dots menggunakan metode hidrotermal. Sintesis dilakukan menggunakan autoklaf pada suhu 160°C selama 6 jam. Setelah proses pemanasan selesai, autoklaf didinginkan hingga mencapai suhu ruang sebelum larutan hasil sintesis dikeluarkan. Larutan hasil sintesis kemudian disaring menggunakan kertas saring untuk memisahkan partikel kasar yang masih tersisa.



Gambar 4. Proses sintesis C-Dots menggunakan metode hidrotermal

Larutan hasil sintesis hidrotermal selanjutnya dimurnikan untuk memisahkan partikel berukuran besar, sisa prekursor yang tidak bereaksi selama proses sintesis. Pemurnian dilakukan melalui pendinginan pada suhu ruang, filtrasi, dan sentrifugasi. . Proses sentrifugasi dilakukan dengan pengaturan kecepatan 10 × 100 rpm selama 10 menit untuk setiap siklus. Setelah satu siklus selesai, sampel diganti dengan sampel berikutnya. Sampel yang masih menunjukkan banyak endapan disentrifugasi kembali hingga diperoleh supernatan yang sesuai untuk tahap karakterisasi. Hasil sentrifugasi berupa endapan (*pellet*) dan bagian cair (*supernatan*). Supernatan yang mengandung partikel C-Dots terdispersi digunakan untuk tahap karakterisasi selanjutnya.



Gambar 5. Pemurnian C-Dots hasil hidrotermal

Tabel 1. Daftar kode sampel

Jenis Sampel	Kode Sampel
Carbon Dots dari ampas kopi 2 g	CDAK-2
Carbon Dots dari ampas kopi 4 g	CDAK-4
Carbon Dots dari ampas kopi 6 g	CDAK-6

Untuk memudahkan proses identifikasi selama pengujian dan analisis data, setiap sampel C-Dots diberi kode sesuai dengan kondisi sintesis yang digunakan (**Tabel 1**). Pada penelitian ini, seluruh sampel disintesis pada suhu 160°C selama 6 jam dengan volume pelarut 20 mL.

B. Variabel Operasional Penelitian

Variabel penelitian yang dilakukan menggunakan tiga variabel yaitu variabel kontrol berupa suhu pemanasan autoklaf sebesar 160°C, waktu pemanasan selama 6 jam, volume akuades sebagai pelarut sebanyak 20 mL, serta volume larutan C-Dots sebanyak 0,5 mL. Variabel manipulasi dalam penelitian ini adalah variasi massa ampas kopi sebagai prekursor sintesis C-Dots, yaitu 2 g, 4 g, dan 6 g**.** Adapun variabel respon yang diamati meliputi spektrum serapan UV-Vis serta intensitas fluoresensi C-Dots berdasarkan hasil karakterisasi *Photoluminescence* (PL).

C. Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data sampel C-Dots yang telah disintesis menggunakan metode hidrotermal dikarakterisasi menggunakan spektrofotometer UV-Visible (UV-Vis) dan *Photoluminescence* (PL). Karakterisasi UV-Vis dilakukan untuk memperoleh spektrum serapan pada setiap variasi massa ampas kopi, sedangkan karakterisasi PL dilakukan untuk memperoleh spektrum emisi fluoresensi C-Dots. Data yang diperoleh berupa panjang gelombang serapan, nilai absorbansi, panjang gelombang emisi, serta intensitas fluoresensi.

D. Teknik Pengolahan Data

Teknik pengolahan data hasil karakterisasi UV-Vis dan *Photoluminescence* (PL) diolah menggunakan perangkat lunak OriginLab. Data UV-Vis dianalisis berdasarkan spektrum serapan untuk menentukan karakteristik optik C-Dots, sedangkan data PL dianalisis berdasarkan panjang gelombang emisi dan intensitas fluoresensi. Selanjutnya, hasil analisis disajikan dalam bentuk grafik dan dibandingkan untuk mengetahui pengaruh variasi massa ampas kopi terhadap karakteristik optik C-Dots.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Sintesis C-Dots

Pada penelitian ini telah dilakukan sintesis C-Dots berbasis ampas kopi menggunakan metode hidrotermal pada suhu 160°C selama 6 jam dengan variasi massa prekursor. Ampas kopi digunakan sebagai bahan prekursor karena merupakan limbah biomassa yang memiliki kandungan karbon organik cukup tinggi sehingga berpotensi dimanfaatkan dalam sintesis C-Dots. Pembahasan meliputi karakterisasi C-Dots berdasarkan pengamatan fluoresensi di bawah sinar UV, hasil uji UV-Vis, *Photoluminenscence* (PL).



(a) (b) (c)

Gambar 6. Hasil Sintesis C-Dots: (a) CDAK-2, (b) CDAK-4, dan (c) CDAK-6

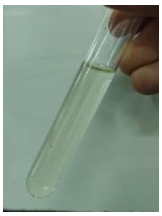
Berdasarkan **Gambar 6.** dapat dilihat bahwa C-Dots yang telah melalui proses sintesis hidrotermal menghasilkan larutan berwarna cokelat kemerahan hingga cokelat tua dengan variasi massa prekursor sebesar 2 gram, 4 gram, 6 gram. Intensitas warna meningkat seiring bertambahnya massa ampas kopi yang

digunakan, di mana sampel dengan massa 6 gram menunjukkan warna yang paling pekat. Warna cokelat yang terbentuk mengindikasikan terjadinya proses karbonisasi senyawa organik yang terkandung dalam ampas kopi selama proses sintesis. Menurut Zuluaga *et al*. (2024) ampas kopi tergolong biomassa lignoselulosa yang tersusun atas selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Komponen-komponen tersebut dapat mengalami dehidrasi dan degradasi termal selama proses pemanasan sehingga menghasilkan material karbon yang berperan sebagai prekursor dalam pembentukan carbon dots. Selain mengalami perubahan warna, hasil sintesis juga menghasilkan aroma khas yang menyerupai gula merah atau caramel yang dipanaskan. Aroma tersebut teramati selama proses sintesis selesai dan menunjukkan adanya perubahan senyawa organik dalam ampas kopi selama proses pembentukan C-Dots.

B. Hasil Uji Fluoresensi

C-Dots hasil sintesis kemudian dikarakterisasi melalui uji fluoresensi secara visual untuk mengamati kemampuan C-Dots dalam menghasilkan pendaran ketika disinari dengan radiasi ultraviolet. Sebelum pengamatan dilakukan, larutan C-Dots hasil sintesis diencerkan menggunakan akuades untuk mengurangi kepekatan larutan sehingga pendaran fluoresensi dapat diamati dengan lebih jelas. Selanjutnya, larutan C-Dots disinari menggunakan senter ultraviolet (UV) dengan panjang gelombang 365 nm dan dapat diamati warna pendaran yang dihasilkan. Sampel yang menghasilkan pendaran lebih terang menunjukkan kemampuan emisi fluoresensi yang lebih baik dibandingkan sampel dengan pendaran yang lebih redup. Hasil pengamatan fluoresensi sebelum penambahan ion logam ditunjukkan pada **Tabel 2.**

Tabel 2. Hasil karakterisasi fluoresensi C-Dots sebelum penambahan ion Fe^{3+}

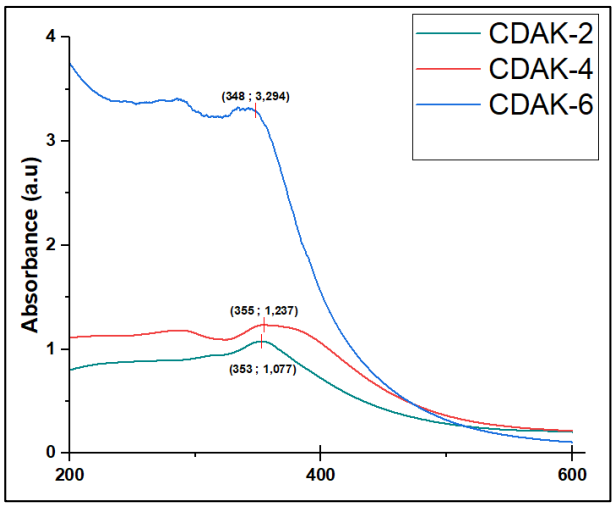
Kode Sampel C-D	Tanpa penyinaran UV	Dengan penyinaran UV
CDAK 2		
CDAK 4		
CDAK 6		

Berdasarkan **Tabel 2.**, hasil karakterisasi fluoresensi menunjukkan bahwa pendaran larutan C-Dots berwarna biru-kehijauan ketika disinari menggunakan senter UV. Pendaran tersebut menunjukkan bahwa material yang dihasilkan memiliki sifat fluoresensi. Fenomena fluoresensi terjadi ketika elektron pada C-Dots menyerap energi dari sinar UV sehingga mengalami eksitasi dari keadaan dasar (*ground state*) menuju keadaan tereksitasi (*excited state*) ke tingkat energi yang lebih tinggi (Arora *et al*., 2024). Selanjutnya elektron kembali

ke tingkat energi yang lebih rendah dan melepaskan sebagian energi dalam bentuk cahaya tampak berwarna biru-kehijauan. Emisi fluoresensi berwarna biru-kehijauan yang diamati pada penelitian ini memiliki karakteristik yang serupa dengan Nazar *et al.*(2024), penyerapan sinar UV pada C-Dots dikaitkan dengan transisi elektron π→π*, sedangkan ukuran partikel yang semakin kecil menyebabkan optical energi gap menjadi lebih besar akibat *quantum-size effect*. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sifat optic C-Dots dipengaruhi oleh struktur elektronik dan ukuran partikelnya (Nazar *et al.*, 2024). Besarnya energi yang dipancarkan menentukan panjang gelombang emisi. Berdasarkan pengamatan visual, seluruh sampel menunjukkan fluoresensi berwarna biru-kehijauan dengan perbedaan intensitas yang tidak dapat dibedakan secara jelas. Oleh karena itu, diperlukan karakterisasi menggunakan spektroskopi UV-Vis untuk mengevaluasi sifat optik C-Dots berdasarkan spektrum absorbansi yang dihasilkan.

C. Hasil Karakterisasi UV-Vis

Sampel C-Dots yang telah melalui pengamatan fluoresensi selanjutnya dikarakterisasi menggunakan spektrofotometer UV-Vis untuk mengetahui karakteristik optiknya berdasarkan spektrum absorbansi sehingga dapat mengidentifikasi daerah serapan dan transisi elektronik yang terjadi. Sebelum sampel dibaca menggunakan UV-Vis perlu dilakukan pengaturan uji alat berupa mengatur titik nol sampel menggunakan blanko berupa pelarut sampel yaitu akuades. Selanjutnya, masing-masing sampel diukur nilai absorbansinya pada rentang panjang gelombang 200- 600 nm.



Gambar 7. Grafik absorbansi UV-Vis sampel pemanasan selama 6 jam

Tabel 3. Data absorbansi C-Dots dari ampas kopi

Kode Sampel C-Dots	Panjang Gelombang (nm)	Absorbansi (a.u)
CDAK-2	353	1,077
CDAK-4	355	1,237
CDAK-6	348	3,294

Berdasarkan **Gambar 7.**, seluruh sampel C-Dots menunjukkan spektrum absorbansi pada daerah ultraviolet dengan panjang maksimum berada pada kisaran 348-355 nm. Sampel CDAK-6 memiliki nilai absorbansi tertinggi sebesar 3,294 a.u. pada panjang gelombang 348 nm, sedangkan sampel CDAK-4 dan CDAK-2 masing-masing menunjukkan absorbansi maksimum sebesar 1,237 a.u. pada panjang gelombang 355 nm dan 1,077 a.u. pada panjang gelombang 353 nm. Perbedaan nilai absorbansi tersebut menunjukkan adanya perbedaan karakteristik optik pada C-Dots yang dihasilkan dari variasi massa prekursor. Kemampuan C-Dots dalam menyerap radiasi ultraviolet merupakan salah satu sifat optik (*optical absorption*) yang dimiliki material tersebut. Spektrum UV-Vis C-Dots umumnya menunjukkan pita serapan pada daerah ultraviolet yang berkaitan dengan transisi elektronik π→π* dari ikatan C=C pada domain karbon terkonjugasi $(sp)^2$, sedangkan

bahu serapan pada daerah panjang gelombang yang lebih tinggi umumnya dikaitkan dengan transisi n→π* gugus karbonil (C=O) atau gugus yang mengandung oksigen pada permukaan C-Dots.

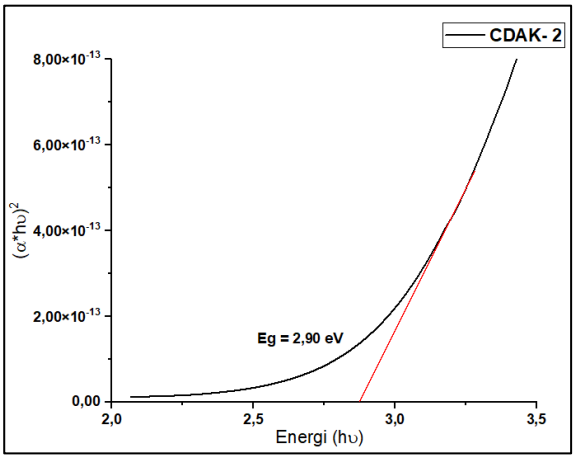
Keberadaan sistem karbon terkonjugasi dan gugus fungsi yang mengandung oksigen tersebut berperan dalam pembentukan *surface states* yang menentukan karakteristik C-Dots (Carbonaro *et al*., 2019). Pada penelitian ini diperoleh puncak absorbansi pada kisaran 348-355 nm, yang menunjukkan bahwa C-Dots hasil sintesis memiliki kemampuan menyerap radiasi pada daerah ultraviolet. Posisi pita serapan tersebut diduga berkaitan dengan transisi elektronik yang melibatkan gugus fungsi permukaan (*surface states*). Menurut Kamilah *et al*. (2021), gugus karbonil (C=O) maupun gugus lain yang mengandung oksigen pada permukaan C-Dots berkontribusi terhadap karakteristik optik material melalui pembentukan *surface states*. Hasil penelitian Simi *et al*. (2026) juga menunjukkan bahwa C-Dots memiliki aktivitas optik yang kuat dengan pita serapan utama sekitar 244 nm yang dikaitkan dengan transisi π→π* pada domain karbon sp^2 serta pita serapan sekitar 320 nm yang berhubungan dengan transisi n→π* dari gugus fungsi permukaan. Perbedaan posisi puncak serapan dibandingkan dengan penelitian ini disebabkan oleh perbedaan jenis prekursor, kondisi sintesis, ukuran partikel, serta gugus fungsi permukaan yang terbentuk selama proses sintesis (Simi *et al*., 2026).

Peningkatan massa prekursor memengaruhi jumlah C-Dots yang terbentuk selama proses sintesis sehingga karakteristik serapan cahaya yang dihasilkan turut berubah. Kondisi ini ditunjukkan oleh sampel variasi massa ampas kopi sebesar 6 gram yang memiliki absorbansi tertinggi dibandingkan variasi massa sampel lainnya. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Putro *et al*. (2018) yang menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi prekursor menyebabkan perubahan *molecular density* dan jumlah C-Dots yang terbentuk sehingga memengaruhi sifat optik C-Dots. Penelitian tersebut juga menjelaskan bahwa peningkatan konsentrasi prekursor menghasilkan lebih banyak C-Dots yang terbentuk selama sintesis. Selain jumlah prekursor, karakteristik optik C-Dots juga dipengaruhi oleh kondisi sintesis, seperti suhu, waktu pemansan, dan homogenitas larutan.

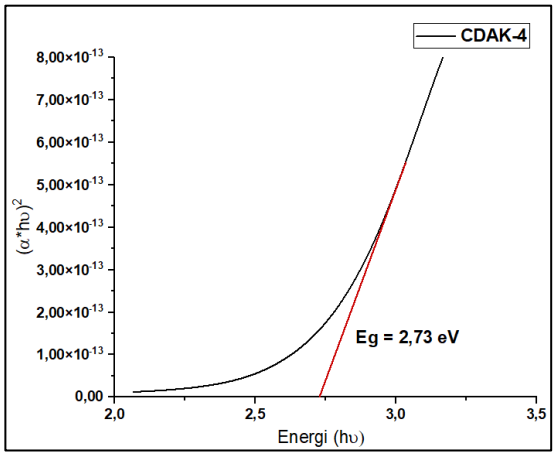
Perbedaan nilai absorbansi pada ketiga sampel menunjukkan bahwa variasi massa prekursor memengaruhi karakteristik penyerapan cahaya C-Dots yang dihasilkan. Sampel CDAK-6 dengan massa prekursor 6 gram menunjukkan absorbansi tertinggi sebesar 3,294 a.u., sedangkan CDAK-2 menunjukkan absorbansi terendah sebesar 1,077 a.u. Peningkatan absorbansi seiring bertambahnya massa ampas kopi diduga berkaitan dengan meningkatnya jumlah senyawa penyerap cahaya dalam larutan hasil sintesis. Hal ini dapat terjadi karena penggunaan massa prekursor yang lebih besar memungkinkan lebih banyak senyawa karbon organik terlibat selama proses sintesis. Namun, nilai absorbansi yang tinggi tidak secara langsung menunjukkan jumlah C-Dots yang terbentuk lebih banyak, karena absorbansi juga dipengaruhi oleh konsentrasi dan karakteristik spesies penyerap cahaya dalam larutan. Dengan demikian, variasi massa prekursor memberikan pengaruh terhadap karakteristik penyerapan optik C-Dots, tetapi tidak selalu menunjukkan peningkatan pada karakteristik emisi fluoresensinya.

Secara kuantitatif, hubungan antara absorbansi dan konsentrasi mengikuti Hukum Beer-Lambert. Data absorbansi hasil karakterisasi UV-Vis selanjutnya digunakan untuk menghitung koefisien absorpsi (α) sebagai dasar penentuan energi celah pita (*band gap*). Penentuan nilai *band gap* dilakukan melalui pengolahan data absorbansi menggunakan perangkat lunak OriginLab dengan menghitung koefisien absorpsi (α), energi foton (hv), dan energi celah pita (Eg). Selanjutnya, nilai tersebut dianalisis menggunakan metode Tauc Plot untuk memperoleh nilai energi celah pita C-Dots.

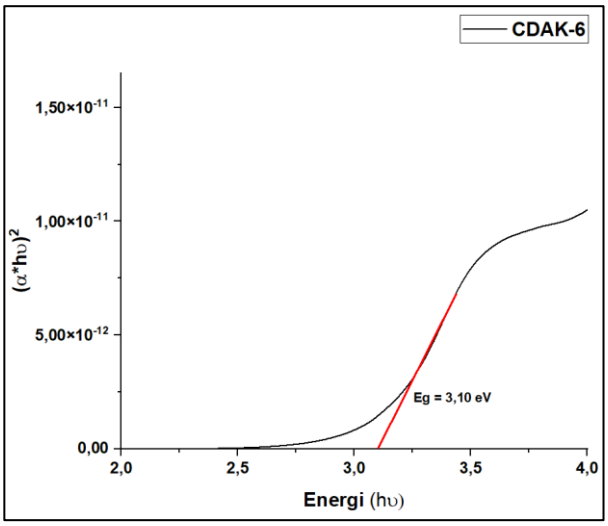
Pada penelitian ini, penentuan energi gap dilakukan menggunakan *direct band gap* melalui metode Tauc Plot dengan membuat kurva hubungan antara $(\alpha h\nu)^2$ dan energi foton ($h\nu$). Pendekatan *direct band gap* didasarkan pada transisi elektron secara langsung (*direct electronic transition*) dari pita valensi menuju pita konduksi tanpa melibatkan fonon. Nilai energi gap ditentukan dengan menarik garis lurus pada bagian linier kurva Tauc hingga memotong sumbu X. Titik potong garis dengan sumbu X menunjukkan nilai energi gap (Eg) sampel C-Dots.



(a)



(b)



(c)

Gambar 8. Grafik energi gap : (a) Sampel CDAK-2; (b) Sampel CDAK-4; (c) CDAK-6

Tabel 4. Nilai energi gap pada sampel C-Dots Ampas Kopi

Sampel	Energi Gap (eV)
CDAK-2	2,90
CDAK-4	2,73
CDAK-6	3,10

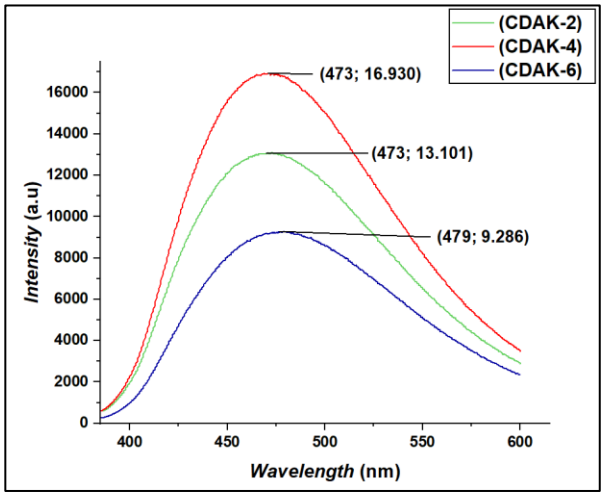
Berdasarkan **Gambar 8**. dan **Tabel 4**. diperoleh nilai energi gap C-Dots sebesar 2,90 eV untuk sampel variasi massa ampas kopi sebesar 2 gram, 2,73 eV untuk variasi massa ampas kopi sebesar 4 gram, dan 3,10 eV variasi massa ampas kopi sebesar 6 gram. Nilai energi gap tersebut menunjukkan bahwa C-Dots hasil sintesis memiliki karakteristik sebagai material semikonduktor. Keberadaan energi gap tersebut menunjukkan bahwa C-Dots hasil sintesis memiliki karakteristik sebagai material semikonduktor ketika material menyerap energi yang sesuai sehingga menghasilkan sifat optik yang khas. Menurut Ozyurt *et al*. (2023), sifat elektronik dan optoelektronik C-Dots berasal dari *intrinsic band gap* yang dipengaruhi oleh struktur karbon dan keadaan permukaannya. Selain itu, rentang energi gap yang diperoleh pada penelitian ini masih sebanding dengan hasil penelitian Nazar *et al*. (2024) yang memperoleh nilai energi gap C-Dots berbasis biomassa sekitar 3,0 eV.

Berdasarkan hasil yang diperoleh, peningkatan massa prekursor tidak menghasilkan perubahan energi gap secara linier. Nilai energi gap mengalami penurunan dari sampel 2 gram menjadi 4 gram, kemudian meningkat kembali pada sampel 6 gram. Perbedaan tersebut mengindikasikan bahwa variasi massa prekursor selama proses sintesis memengaruhi struktur elektronik C-Dots yang terbentuk. Menurut Deeksha *et al*. (2021), sifat optik C-Dots dipengaruhi oleh *surface states* yang berasal dari gugus fungsi dan cacat permukaan (*surface defects*). *Surface states* merupakan tingkat energi tambahan yang terbentuk akibat keberadaan gugus fungsi atau cacat struktur pada permukaan partikel. Keberadaan tingkat energi ini dapat memengaruhi transisi elektron dan menghasilkan variasi nilai energi gap pada C-Dots.

Selain itu, pada penelitian ini memperoleh bahwa gugus fungsi yang mengandung oksigen dapat membentuk domain grafitik sp^2 yang lebih kecil sehingga meningkatkan *local bandgap*. Keadaan energi permukaan (*surface states*) mengindikasikan adanya perbedaan karakteristik optik C-Dots.Oleh karena itu, peningkatan nilai energi gap pada sampel CDAK-6 berkaitan dengan perubahan struktur elektronik C-Dots selama proses sintesis. Perbedaan karakteristik elektronik tersebut selanjutnya berkaitan dengan sifat fotoluminesensi C-Dots yang ditunjukkan melalui variasi intensitas emisi pada hasil karakterisasi PL.

D. Hasil Karakterisasi *Photoluminescence* (PL)

Selain sifat absorbansi yang diperoleh dari karakterisasi UV-Vis, selanjutnya dilakukan karakterisasi *photoluminescence* (PL) untuk mengetahui sifat fluoresensinya. Uji PL dilakukan untuk mengamati emisi cahaya yang dihasilkan C-Dots setelah elektron tereksitasi oleh energi yang diberikan.



Gambar 9. Spektrum emisi PL (λeks = 375 nm)

Pengukuran PL dilakukan pada panjang gelombang (λeks) sebesar 375 nm. Panjang gelombang tersebut digunakan berdasarkan hasil pengujian λeks 365 nm, 375 nm, 385 nm karena menghasilkan spektrum emisi fluoresensi yang paling optimum. Hasil pengujian menunjukkan bahwa eksitasi pada 375 nm menghasilkan spektrum emisi dengan puncak yang jelas dan konsisten pada seluruh sampel C-Dots sehingga dipilih sebagai kondisi pengukuran untuk analisis fotoluminesensi selanjutnya. Berdasarkan **Gambar 9.**, seluruh sampel C-Dots menunjukkan spektrum emisi fotoluminesensi (PL) pada daerah cahaya biru (*blue emission*) dengan puncak 473-479 nm. Emisi tersebut terjadi akibat proses rekombinasi radiatif pasangan elektron-hole setelah elektron menyerap energi foton eksitasi, di mana ketika C-Dots dieksitasi pada panjang gelombang 375 nm, elektron memperoleh energi yang cukup untuk berpindah dari tingkat energi dasar menuju tingkat energi yang lebih tinggi. Selanjutnya, elektron kembali ke tingkat energi yang lebih rendah dengan melepaskan energi dalam bentuk foton sehingga menghasilkan emisi fluoresensi. Mekanisme tersebut sesuai dengan teori fotoluminesensi C-Dots yang dipengaruhi oleh stuktur inti karbon (*carbon core*) dan tingkat energi permukaan (*surface states*) (Ai *et al*., 2021; B. Wang dan Lu, 2022).

Perbedaan intensitas emisi pada ketiga sampel menunjukkan adanya perbedaan efisiensi rekombinasi radiatif. Pada sampel CDAK-4 menghasilkan intensitas emisi tertinggi sebesar 16.930 a.u., kemudian CDAK-

2 sebesar 13.101 a.u., sedangkan CDAK-6 menghasilkan intensitas terendah sebesar 9.286 a.u. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan massa prekursor dari 2 gram menjadi 4 gram meningkatkan intensitas emisi menurun, sedangkan peningkatan massa menjadi 6 gram menyebabkan intensitas emisi menurun. Hal tersebut menunjukkan bahwa variasi massa prekursor memengaruhi efisiensi proses rekombinasi radiatif pada C-Dots yang dihasilkan. Intensitas emisi yang lebih tinggi menunjukkan bahwa lebih banyak elektron kembali ke dasar melalui jalur rekombinasi radiatif sehingga menghasilkan emisi fluoresensi yang lebih kuat. Sebaliknya, intensitas yang lebih rendah mengindikasikan bahwa sebagian energi hilang melalui jalur *non radiative* yang dapat dipengaruhi oleh karakteristik permukaan C-Dots, seperti keberadaan *surface states* atau gugus fungsi permukaan yang berbeda (Ai *et al*., 2021).

Perbedaan posisi puncak emisi yang relatif kecil, yaitu 473 nm menjadi 479 nm, menunjukkan bahwa ketiga sampel memiliki karakteristik pusat emisi yang serupa. Pergeseran sekitar 6 nm tersebut menunjukkan bahwa variasi massa ampas kopi tidak menyebabkan perubahan yang signifikan terhadap posisi puncak emisi C-Dots. Dengan demikian, pengaruh utama variasi massa prekursor lebih terlihat pada perubahan intensitas emisi fluoresensi dibandingkan pergeseran panjang gelombang emisi. Hasil karakterisasi PL tersebut sejalan dengan hasil analisis UV-Vis yang menunjukkan bahwa sampel CDAK-4 memiliki nilai energi gap paling kecil, yaitu 2,73 eV, sedangkan CDAK-6 memiliki energi gap terbesar, yaitu 3,10 eV. Nilai *energi gap* yang lebih kecil menunjukkan bahwa energi yang diperlukan elektron untuk mengalami transisi optik lebih rendah sehingga berkaitan dengan intensitas fotoluminesensi yang lebih tinggi. Sebaliknya, nilai *energi gap* yang lebih besar pada CDAK-6 berkaitan dengan intensitas emisi yang lebih rendah. Hubungan tersebut menunjukkan bahwa variasi massa ampas kopi memengaruhi karakteristik optik C-Dots yang dihasilkan.

Tabel 5. Hasil perhitungan *Quantum Yield*

Kode Sampel C-Dots	*Quantum yield* (QY)%
CDAK-2	11,30
CDAK-4	11,01
CDAK-6	3,07

Berdasarkan **Tabel 5.**, nilai *quantum yield* C-Dots berturut-turut sebesar 11,30%, 11,01%, dan 3,07% untuk sampel CDAK-2, CDAK-4, dan CDAK-6. Nilai *quantum yield* menggambarkan efisiensi emisi fluoresensi, yaitu perbandingan antara jumlah foton yang dipancarkan terhadap jumlah foton yang diserap. Semakin tinggi nilai *quantum yield*, semakin tinggi efisiensi material dalam memancarkan kembali energi yang diserap sebagai fluoresensi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sampel CDAK-2 dan CDAK-4 memiliki efisiensi emisi fluoresensi yang relatif serupa, sedangkan CDAK-6 menunjukkan penurunan *quantum yield* yang cukup signifikan. Penurunan tersebut sejalan dengan rendahnya intensitas fotoluminesensi yang diperoleh pada sampel CDAK-6, sehingga mengindikasikan bahwa efisiensi emisi fluoresensi pada sampel tersebut lebih rendah.

Perbedaan efisiensi emisi fluoresensi ini dapat berkaitan dengan perubahan karakteristik keadaan energi permukaan (*surface states*) akibat variasi massa ampas kopi sebagai prekursor. Keberadaan tingkat energi tambahan pada permukaan dapat memengaruhi proses transisi elektron serta peluang terjadinya rekombinasi radiatif dan nonradiatif. Dengan demikian, variasi massa ampas kopi sebagai prekursor memengaruhi karakteristik optik C-Dots yang dihasilkan. Pengaruh tersebut ditunjukkan oleh perbedaan intensitas fotoluminesensi, nilai energi gap, dan *quantum yield* masing-masing sampel.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa Carbon Dots (C-Dots) berhasil disintesis dari ampas kopi menggunakan metode hidrotermal dengan variasi massa prekursor 2 g, 4 g, dan 6 g. Variasi massa ampas kopi memengaruhi karakteristik optik C-Dots yang dihasilkan. Hasil karakterisasi UV-Vis

menunjukkan terbentuknya pita serapan pada rentang 348–355 nm yang berkaitan dengan transisi elektronik π→π* dan n→π*. Sementara itu, karakterisasi *Photoluminescence* (PL) menunjukkan bahwa seluruh sampel menghasilkan emisi fluoresensi pada daerah biru dengan panjang gelombang emisi 473–479 nm. Perbedaan karakteristik optik terlihat pada masing-masing variasi massa prekursor. Sampel CDAK-6 menunjukkan nilai absorbansi tertinggi, yang mengindikasikan kemampuan penyerapan cahaya yang lebih besar pada kondisi pengukuran. Sampel CDAK-4 menghasilkan intensitas fluoresensi tertinggi, sedangkan sampel CDAK-2 memiliki nilai *quantum yield* tertinggi sebesar 11,30%. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan massa prekursor tidak selalu menghasilkan peningkatan efisiensi emisi fluoresensi, karena karakteristik penyerapan dan emisi cahaya C-Dots dipengaruhi oleh kondisi pembentukan serta keadaan energi permukaannya. Dengan demikian, setiap variasi massa prekursor menghasilkan karakteristik optik yang berbeda, dengan keunggulan masing-masing berdasarkan parameter yang diamati.

B. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, disarankan agar penelitian selanjutnya menggunakan ruang pengamatan fluoresensi yang tertutup dengan kondisi pencahayaan terkontrol serta sumber sinar UV yang memiliki panjang gelombang dan intensitas tetap sehingga hasil pengamatan fluoresensi dapat diperoleh secara lebih seragam. Selain itu, penelitian selanjutnya dapat melakukan optimasi kondisi sintesis, seperti variasi suhu, waktu hidrotermal, atau konsentrasi prekursor, untuk memperoleh Carbon Dots (C-Dots) dengan karakteristik optik yang lebih baik. Pengembangan penelitian juga dapat dilakukan dengan mengeksplorasi biomassa lain sebagai sumber karbon sehingga dapat dibandingkan pengaruh jenis prekursor terhadap karakteristik optik C-Dots. Penelitian selanjutnya juga disarankan untuk melakukan karakterisasi struktur, morfologi, dan ukuran partikel menggunakan Transmission Electron Microscopy (TEM) serta X-Ray Diffraction (XRD), dan karakterisasi gugus fungsi menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Karakterisasi tersebut diperlukan untuk memperoleh informasi yang lebih komprehensif mengenai struktur, morfologi, ukuran partikel, dan gugus fungsi C-Dots, sehingga identifikasi material yang dihasilkan tidak hanya didasarkan pada karakteristik optiknya.

DAFTAR PUSTAKA

Ai, L., Yang, Y., Wang, B., Chang, J., Tang, Z., Yang, B., & Lu, S. (2021). *Insights into photoluminescence mechanisms of carbon dots: advances and perspectives*. *Science Bulletin*, *66*(8),830–856. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.12.015

Costa, A. I., Barata, D., Moraes, B., & Prata, J. V. (2022). *Carbon Dots from Coffee Grounds : Synthesis , Characterization , and Detection of Noxious Nitroanilines*. 1–17.

Carbonaro, C. M., Corpino, R., Salis, M., Mocci, F., Thakkar, S. V., Olla, C., & Ricci, P. C. (2019). *On the Emission Properties of Carbon Dots : Reviewing Data and Discussing Models*.

Deeksha, S., Buerkle, M., Brunet, P., Maddi, C., Babu, D., Morelli, A., Farokh, A., Maguire, P., Mariotti, D., & Svrcek, V. (2021). *The importance of surface states in N-doped carbon quantum dots*. *Carbon*, *183*, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.06.088

Kang, C., Huang, Y., Yang, H., Yan, X. F., & Chen, Z. P. (2020). *A Review of Carbon Dots Produced from Biomass Wastes*. 1–24.

Nazar, M., Hasan, M., Wirjosentono, B., Gani, B. A., & Nada, C. E. (2024). *Microwave Synthesis of Carbon Quantum Dots from Arabica Coffee Ground for Fluorescence Detection of Fe 3+ , Pb 2+ , and Cr 3+*. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c02254

Ozyurt, D., Kobaisi, A. M., Hocking, K. R., & Fox, B. (2023). *Properties, synthesis, and applications of carbon dots.pdf*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cartre.2023.100276

Putro, P. A., & Roza, L. (2018). *Precursor concentration effect on optical properties of carbon dots from Cassava ' s peels*. *2*(02), 43–52. https://doi.org/10.20961/jphystheor-appl.v2i2.30664

Sugiarti, S., & Darmawan, N. (2015). *Synthesis of fluorescence carbon nanoparticles from ascorbic acid*. *15*(2), 141–145. https://doi.org/https://pendidikankimia.walisongo.ac.id/wp-content/uploads/2018/10/6-Vol-

15-No-2-2015.pdf

Wang, B., & Lu, S. (2022). *Review The light of carbon dots : From mechanism to applications*. *Matter*, *5*(1), 110–149. https://doi.org/10.1016/j.matt.2021.10.016

Xu, X., Ray, R., Gu, Y., Ploehn, H. J., Gearheart, L., Raker, K., & Scrievens, W. A. (2004). *Electrophoretic analysis and purification of fluorescent single-walled carbon nanotube fragments*. https://doi.org/10.1021/ja040082h

Xie, Y., Cheng, D., Liu, X., & Han, A. (2019). *Green Hydrothermal Synthesis of N-doped Carbon Dots from Biomass Highland Barley for the Detection*.

Zuluaga, R., Catalina, G., Vel, J., Lina, V., Valencia, I. P., Augusto, J., & Gañ, P. (2024). *Exploring Spent Coffee Grounds : Comprehensive Morphological Analysis and Chemical Characterization for Potential Uses*. https://www.mdpi.com/1420-3049/29/24/5866