

PENGARUH DOPING NITROGEN, SULFUR, DAN BORON TERHADAP SPEKTRUM ABSORBANSI DAN FOTOLUMINESSENSI KARBON DOT ASAM SITRAT

Alvin Dior Al Ghifari^{1,†}, Edi Sanjaya¹, Isnaeni²

¹Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta, Jalan. Ir. H. Djuanda No.95, Cempaka Putih, Ciputat, Kota Tangerang Selatan, Banten 15412, Indonesia

²Pusat Penelitian Fisika, LIPI, Kawasan Puspiptek, Tangerang Selatan, Banten 15314, Indonesia

[†]alvindior@gmail.com

Diterima: Maret 2019; Diperbaiki: April 2019; Disetujui: April 2019; Tersedia Daring: Desember 2019

Abstrak

Telah dilakukan sintesis karbon dot dengan bahan asam sitrat dengan metode pemanasan *microwave*. Sampel yang dibuat adalah sampel murni dan sampel yang diberi doping. Doping yang digunakan adalah HNO_3 untuk doping Nitrogen (N), $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ untuk doping Sulfur (S), dan H_3BO_3 untuk doping Boron (B). Pengujian optik yang dilakukan adalah Absorbansi UV-Vis dan Fotoluminesensi. Sampel karbon dot asam sitrat tanpa doping diuji terlebih dahulu, kemudian karbon dot doping-N, doping-S, dan doping-B diuji. Hasil yang didapat berupa spektrum absorbansi yang merupakan daya serap gelombang sampel yang diuji, dan spektrum fotoluminesensi yang merupakan pendaran sampel yang diuji. Spektrum sebelum pendopingan dibandingkan dengan spektrum setelah pendopingan. Dilakukan analisis perubahan sumbu-x yaitu pergeseran panjang gelombang, dan sumbu-y yaitu kenaikan atau penurunan nilai absorbansi dan intensitas fotoluminesensi. Hasil absorbansi karbon dot asam sitrat murni memiliki dua buah puncak (*peak*) absorbansi. Pendopingan N dan S tidak mempengaruhi spektrum absorbansi secara signifikan, namun pendopingan B sangat mempengaruhinya pada puncak kedua dengan menggeser 40 nm ke kanan dan menurunkan nilai absorbansi 1,68. Sedangkan hasil fotoluminesensi karbon dot asam sitrat murni memiliki sebuah puncak pada panjang gelombang 502 nm dengan intensitas 758 a.u., atau pendarannya berada dalam daerah warna *cyan*. Pendopingan N, S, dan B dapat menggeser spektrum fotoluminesensi ke arah warna merah dan nilai terbesar adalah dengan doping S yaitu sebesar 32 nm.

Kata-kata kunci: absorbansi, doping, fotoluminesensi, karbon dot, perubahan spektrum

Abstract

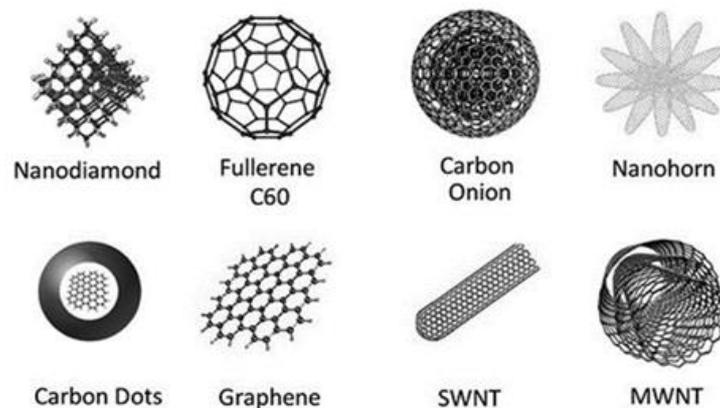
Synthesis of carbon dots with citric acid by microwave heating method has been carried out. The samples made are pure samples and samples doped. The dopant used is HNO_3 for doping Nitrogen (N), $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ for doping Sulfur (S), and H_3BO_3 for doping Boron (B). The optical characterizations performed were UV-Vis absorbance and photoluminescence spectrophotometers. Non-doped citric-acid carbon dots samples were characterized first, then N-doped, S-doped, and B-doped carbon dots. The results obtained are in the form of absorbance spectra which are the absorption of the waves of the sample being tested, and the photoluminescence (PL) spectra which is the luminescence of the samples tested. The spectrum before doping is compared to the spectrum after doping. Analysis of x-axis changes is carried out, namely a shift in the wavelength, and the y-axis, namely an increase or decrease in the absorbance value and intensity of photoluminescence. The absorbance results of pure citric acid carbon dots have two peaks. Doping of N and S did not significantly affect the absorbance spectrum, but doping of B greatly affected it on the second peak by shifting 40 nm to the right and decreasing the absorbance value by 1.68. While the photoluminescence results of pure citric-acid carbon dots have a peak at a wavelength of 502 nm with an intensity of 758 a.u., or the luminescence is inside the cyan color area. Doping of N, S, and B can shift the photoluminescence spectra towards red and the greatest value is the S-doped which is 32 nm.

Keywords: absorbance, carbon dots, doping, photoluminescence, spectra shift

PENDAHULUAN

Karbon Dot

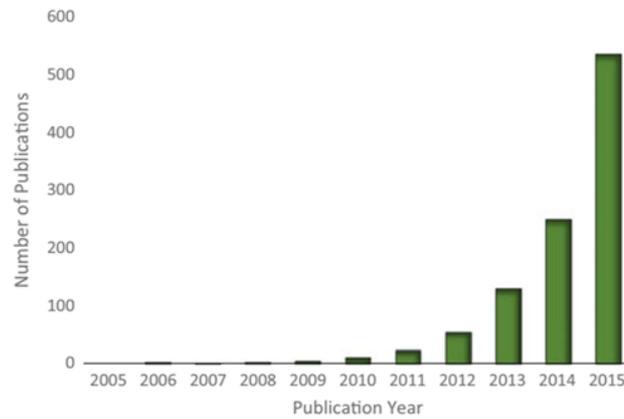
Material berpendar dapat dibuat dari bahan anorganik maupun bahan organik. Untuk aplikasi di bidang elektronika, bahan yang optimal digunakan adalah bahan anorganik, misalnya kuantum dot (*quantum dots*) untuk *light emitting diode* (LED) [1]. Untuk aplikasi di bidang biologi atau kesehatan, misalnya pencitraan biologis (*bioimaging*), dibutuhkan material yang bukan hanya optimal sifat optiknya namun juga memiliki biokompatibilitas yang baik. Oleh karena itu dibutuhkan material berpendar yang berasal dari bahan organik [2]. Salah satu jenis material berpendar yang terbuat dari bahan organik adalah karbon dot (*carbon dots*). Karbon dot memiliki keunggulan yaitu memiliki biokompatibilitas yang tinggi dan toksisitas yang rendah, sehingga dapat diaplikasikan ke makhluk hidup. Karbon dot juga dapat dibuat dari berbagai jenis bahan yang mengandung karbon. Bahan dasar untuk mensintesis karbon dot sangat melimpah, sehingga proses sintesisnya jauh lebih hemat biaya dibanding kuantum dot [2] [3].



Gambar 1. Jenis-jenis nanomaterial karbon [3].

Karbon dot termasuk salah satu jenis nanomaterial karbon. Karbon dot ditemukan secara tidak sengaja pada tahun 2004 [4]. Pada saat itu, Xu *et al.* sedang meneliti metode elektroforetik untuk melakukan purifikasi *single-walled carbon nanotubes* (SWNT) yang dihasilkan dari jelaga percikan bunga api (*arc-discharged soot*) [5]. Dalam proses tersebut, dua kelas (*class*) baru nanomaterial berhasil diisolasi dari jelaga mentah. Yang pertama adalah karbon tabung yang pendek, dan yang kedua adalah campuran nanopartikel berpendar. Dua zat tersebut ternyata memiliki sifat menarik sehingga sangat prospek untuk diteliti lebih lanjut, walaupun dua zat tersebut bukan tujuan dari penelitian saat itu. Sehingga dapat dikatakan bahwa penemuan zat tersebut adalah “tidak sengaja”. Lalu, zat kedua, atau nanopartikel berpendar itulah yang kelak disebut sebagai karbon dot [4] [5].

Sejak penemuan (sintesis) karbon dot pertama kali sekitar satu setengah dekade yang lalu (tahun 2004), nanomaterial ini telah menarik minat secara signifikan dalam bidang sains dan teknologi. Dari nama “dot” dapat terkesan kemiripan antara material ini dengan suatu material anorganik yaitu kuantum dot. Minat tersebut tercermin dari jumlah artikel ilmiah dari tahun ke tahun yang hampir menyerupai pertumbuhan eksponensial untuk judul yang mengandung istilah “*carbon-dots*” [2].



Gambar 2. Jumlah publikasi ilmiah dengan kata kunci karbon dot dari tahun ke tahun [2].

Sejauh ini, beberapa grup riset telah melaporkan keberhasilan mensintesis karbon dot dengan emisi panjang gelombang tinggi. Beberapa di antaranya adalah, Hu *et al.* pertama kali berhasil mendapatkan karbon dot merah, tetapi dengan prosedur yang sulit dan efisiensi rendah (6%) [6]. Lalu, Qu *et al.* melaporkan emisi warna oranye pada karbon dot, namun puncak emisi belum sampai pada daerah merah [7], serta Lin *et al.* mensintesis karbon dot merah dengan *quantum yield* (QY) sebesar 16,2% untuk eksperimen sel, namun proses purifikasinya sangat memakan waktu [8]. Sehingga sintesis karbon dot merah masih merupakan tantangan saat ini.

Selain bertujuan mendapatkan karbon dot merah, para peneliti juga berupaya untuk menghasilkan karbon dot yang memiliki emisi yang tak bergantung eksitasi (*excitation-independent*). Ini artinya, diharapkan karbon dot yang dihasilkan memiliki pendaran warna yang sama, apapun warna sinar laser yang digunakan untuk menyinarinya. Hal ini sangat bermanfaat dalam bidang *bioimaging*, karena terdapat beberapa sinar yang dapat menyebabkan autofluoresensi pada jaringan dan bahkan yang merusak sel. Ding *et al.* berhasil mensintesis karbon dot merah yang tak bergantung eksitasi untuk aplikasi di bidang *bioimaging* [9].

Dalam riset-riset tersebut, penambahan doping dapat mengubah spektrum pendaran. Hal inilah yang digunakan untuk menghasilkan karbon dot merah dan emisi yang tak bergantung eksitasi. Oleh karena itu, penulis melakukan penelitian karbon dot dengan menambahkan doping untuk menganalisis apakah terjadi perubahan spektrum.

Doping

Dalam pengertian sehari-hari, doping biasa diketahui dalam arti konsumsi zat atau obat untuk meningkatkan performa atlet. Dalam bidang semikonduktor, doping adalah penambahan impuritas ke dalam bahan semikonduktor untuk mengubah struktur, sifat elektrik, dan sifat optik dari bahan tersebut [10]. Dari kedua definisi di atas, dapat disimpulkan bahwa doping merupakan penambahan zat yang bertujuan untuk mengubah sifat suatu objek agar dapat meningkatkan performa tertentu. Objek yang mengalami pendopingan dalam penelitian ini adalah karbon dot. Dengan sifat bahan yang menjadi fokus adalah sifat optiknya. Zat yang digunakan untuk mendoping disebut *dopant*.

Mekanisme doping, yaitu bagaimana suatu proses doping dapat mengubah sifat suatu bahan, bergantung pada jenis bahan tersebut. Perbedaan mekanisme merupakan perbedaan dalam ranah detail, yang artinya mekanisme doping pada semikonduktor tentu berbeda dengan mekanisme doping pada karbon dot. Namun sebenarnya, esensi dari mekanisme tersebut sama. Setiap zat memiliki sifat tertentu. Ketika zat tersebut ditambahkan suatu zat lain, maka sifat asal zat pertama akan berubah. Hal ini merupakan fakta sederhana. Air mineral jika ditambah garam tentu akan menjadi asin, dan jika ditambah gula akan menjadi manis.

METODE

Sintesis Karbon Dot

Bahan dasar karbon dot yang digunakan adalah asam sitrat. Bahan *dopant* yang digunakan adalah HNO_3 untuk mendoping unsur Nitrogen (N), $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ untuk mendoping unsur Sulfur (S), dan H_3BO_3 untuk mendoping unsur Boron (B). Alat-alat yang digunakan adalah gelas beker, kuvet, oven microwave 700 Watt, pengaduk magnetik, dan kertas saring. Alat uji yang digunakan ada dua, yaitu spektrofotometer UV-Vis dan fotoluminesensi yang terhubung ke suatu perangkat komputer dengan *software* OceanOptic Spectrasuite. Data yang dihasilkan kemudian diolah menggunakan *software* OriginPro

Pada penelitian ini pertama-tama akan dibuat sampel karbon dot murni (tanpa doping) dalam bentuk larutan. Bahan baku yang digunakan asam sitrat. Dari ketiga bahan ini, akan dibuat larutan induk (*stock solution*). *Stock solution* asam sitrat dibuat menggunakan 12 g bahan, kemudian dilarutkan dalam 200 mL akuades dan diaduk menggunakan pengaduk magnetik dengan 1.500 rpm selama satu menit. Sehingga akhirnya didapatkan 200 mL *stock solution* asam sitrat. Sintesis karbon dot dilakukan dengan metode pemanasan *microwave*. Sampel karbon dot murni dibuat dengan mengambil 30 mL dari *stock solution* dan memasukkannya ke dalam gelas beker. Kemudian 30 mL larutan tersebut dipanaskan dalam oven *microwave* selama 10 menit. Setelah proses pemanasan tersebut, akan terbentuk kerak pada dasar gelas. Setelah itu 50 mL akuades ditambahkan ke dalam gelas tersebut untuk melarutkan kerak yang terbentuk. Larutan yang terbentuk kemudian disaring menggunakan kertas saring untuk mendapatkan sampel yang bersih dari ampas yang terlihat. Akhirnya didapatkan sampel karbon dot murni yaitu 50 mL karbon dot asam sitrat.

Sama seperti sintesis karbon dot murni, sintesis karbon dot dengan doping juga menggunakan *stock solution* sebagai bahan awalnya. Perbedaan hanya terjadi saat sebelum gelas beker dimasukkan ke dalam oven *microwave*, yaitu 30 mL *stock solution* ditambahkan dengan larutan *dopant* sebanyak 5 mL. Larutan yang digunakan adalah asam nitrat (HNO_3) untuk mendoping N, sodium metabisulfat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) untuk mendoping S, dan asam borat (H_3BO_3) untuk mendoping B. Ketiga larutan yang digunakan tersebut memiliki konsentrasi 0,1 M. Sampel karbon dot asam sitrat didoping dengan tiga macam *dopant* tersebut. Sehingga akan dihasilkan tiga macam sampel doping untuk karbon dot asam sitrat.



Gambar 3. (Dari kiri ke kanan) Sampel karbon dot asam sitrat murni, doping-N, doping-S, dan doping-B.

Pengujian Absorbansi dan Fotoluminesensi

Sampel yang akan diuji dimasukkan ke dalam kuvet. Untuk pengujian UV-vis absorbansi, digunakan spektrofotometer UV-Vis (Jasco V-570) dengan sumber cahaya Halogen-Deuterium. Pertama-tama, rekam data berupa kuvet berisi pelarut, dalam hal ini akuades. Data ini digunakan sebagai background yang nantinya akan dikurangi dari data sampel agar kurva absorbansi benar-benar milik zat terlarut (karbon dot), bukan milik akuades. Setelah itu sampel karbon dot yang akan diuji diletakkan dalam spektrometer UV-Vis.

Kemudian untuk pengujian fotoluminesensi harus dilakukan dalam ruang gelap. Hal ini disebabkan karena pendaran yang akan diuji termasuk ke dalam cahaya tampak (400–700 nm), sehingga segala macam cahaya tampak yang bukan merupakan pendaran sampel akan mengganggu proses pengambilan data. Sebelum pengambilan data dilakukan, kalibrasi spektrometer dilakukan dengan cara menutup detektor kemudian menyimpan spektrumnya di komputer, lalu mengurangi pengambilan data berikutnya dengan spektrum awal tadi.

Setelah sampel dimasukkan ke dalam kuvet, laser 420 nm dinyalakan. Laser ini merupakan laser dioda yang kontinu, sehingga intensitasnya cukup kuat. Sinar laser yang telah terfokus kemudian mengenai sampel dalam kuvet. Posisi kuvet disusun sedemikian rupa (sisi kuvet membentuk 45° terhadap alas setup) sehingga sinar laser kemudian dipantulkan ke arah lensa pengumpul. Sampel yang terkena laser akan berpendar, kemudian pendaran sampel ditangkap lensa pengumpul dan difokuskan ke detektor. Detektor merekam pendaran lalu meneruskannya ke spektrofotometer untuk diproses. Spektrofotometer UV-Vis dan fotoluminesensi terhubung ke komputer sehingga spektrum pendaran akan terbaca di komputer melalui program OceanOptic Spectrasuit. Data spektrum pendaran dari seluruh sampel disimpan untuk kemudian diolah dan dianalisis.



(a)



(b)

Gambar 4. Alat uji absorbansi UV-Vis (a), dan setup fotoluminesensi (b).

Pengolahan Data

Data yang sudah disimpan berbentuk file teks (.txt) berisi dua kolom. Kemudian data diolah dengan cara memplot grafik. Dapat digunakan berbagai macam *software* untuk melakukan hal ini. Dalam penelitian ini penulis menggunakan *software* OriginPro, karena *software* ini cukup mudah dipakai (berbasis GUI, bukan *script*) sehingga dapat menghemat waktu pengolahan data. Plot grafik yang dibuat tidak apa adanya, namun harus disesuaikan *range*-nya dan dilakukan *smoothing*. Pada pengolahan data ini penulis menggunakan metode *smoothing* Savitzky-Golay yang akan cenderung mempertahankan bentuk puncak spektrum. Kemudian penulis melakukan *curve fitting* dengan metode Gaussian. Seluruh fitur ini tersedia dalam *software* OriginPro, sehingga penulis tidak perlu melakukan *coding* seperti dalam *software* matematika dan pemrograman.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Spektrum Absorbansi

Hasil uji absorbansi UV-Vis berupa spektrum dengan sumbu-x adalah panjang gelombang (nm), dan sumbu-y adalah nilai absorbansi. Nilai absorbansi tidak memiliki satuan karena merupakan logaritma dari rasio intensitas penyerapan foton pada panjang gelombang tertentu. Rentang data yang dikaji dimulai dari 200 nm sampai 500 nm. Didapatkan hasil berupa spektrum dengan dua puncak absorbansi (**Gambar 5**), di mana grafik berwarna hitam adalah spektrum absorbansi karbon dot asam sitrat murni, dan grafik berwarna merah adalah spektrum absorbansi setelah didoping unsur N, S, dan B. Untuk karbon dot murni, puncak pertama memiliki nilai absorbansi 1,60 di panjang gelombang 209 nm, dan puncak kedua memiliki nilai absorbansi 2,00 di panjang gelombang 230 nm. Puncak pertama merupakan puncak milik inti partikel karbon dot,

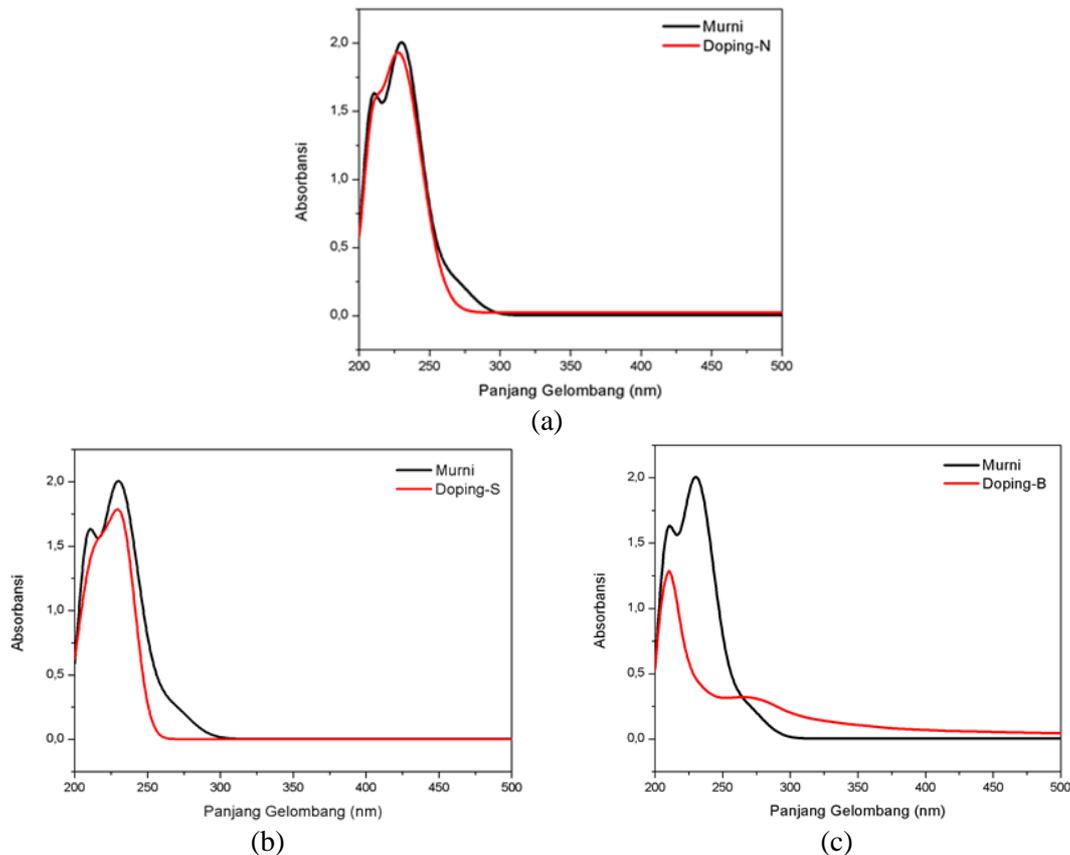
dan puncak kedua merupakan puncak milik permukaan karbon dot [2]. Data hasil pengujian dapat di lihat pada tabel di bawah (**Tabel 1**).

Perbedaan spektrum absorbansi sebelum dan setelah doping dapat menunjukkan di mana unsur doping tersebut berikatan dengan partikel karbon dot. Jika perbedaan signifikan terjadi pada puncak pertama, maka unsur doping masuk ke inti karbon dot. Namun jika perbedaan signifikan terjadi pada puncak kedua, maka unsur tersebut berikatan dengan rantai karbon pada permukaan partikel karbon dot, dan membentuk suatu gugus fungsi atau dapat disebut pasifasi permukaan. Spektrum absorbansi karbon dot asam sitrat sebelum dan sesudah doping N hampir serupa (**GAMBAR 5a**). Puncak absorbansi pertama mengalami pergeseran 3 nm ke kanan dan nilainya turun 0,01. Puncak absorbansi kedua mengalami pergeseran ke kiri sejauh 2 nm dan nilainya turun 0,07. Maka pendopingan N pada karbon dot asam sitrat tidak terlalu berpengaruh pada daya penyerapan gelombang karbon dot tersebut.

Spektrum absorbansi karbon dot asam sitrat setelah doping S mengalami perubahan menyempit ke dalam spektrum sebelum doping (**Gambar 5b**). Puncak pertama mengalami pergeseran sejauh 8 nm ke kanan dan penurunan absorbansi sebesar 0,02. Puncak kedua tidak mengalami pergeseran namun absorbansinya turun sebesar 0,22. Spektrum absorbansi karbon dot asam sitrat mengalami perubahan setelah didoping B (**Gambar 5c**). Penurunan absorbansi terlihat pada puncak pertama, dan perubahan drastis terjadi pada puncak kedua. Puncak pertama mengalami penurunan 0,31 dan pergeseran 1 nm ke kanan, sedangkan puncak kedua mengalami penurunan 1,68 dan pergeseran 40 nm ke kanan.

Tabel 1. Data absorbansi karbon dot murni dan setelah doping.

Doping	Absorbansi 1	Puncak λ_1 (nm)	Absorbansi 2	Puncak λ_2 (nm)
Murni	1,60	209	2,00	230
Nitrogen (N)	1,61	212	1,93	228
Sulfur (S)	1,58	217	1,78	230
Boron (B)	1,29	210	0,32	270



Gambar 5. Spektrum absorbansi karbon dot sebelum dan sesudah doping N (a), doping S (b), dan doping B (c).

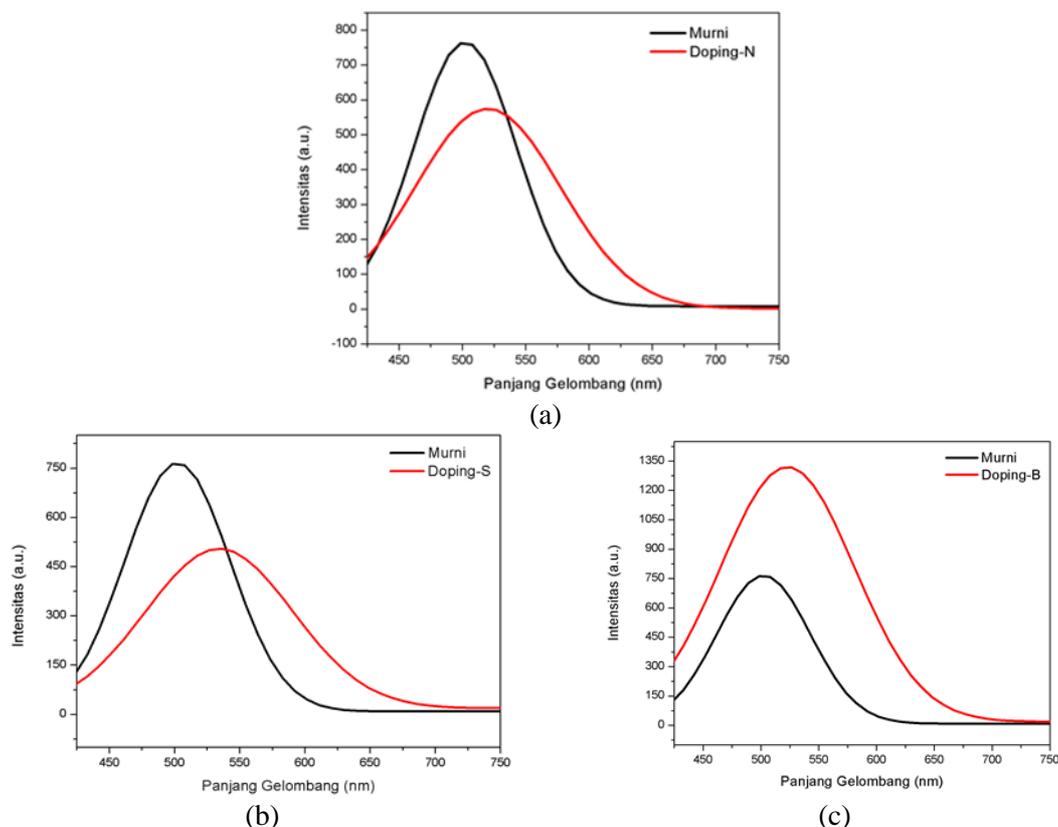
Dari ketiga jenis doping, yang paling mengubah spektrum absorbansi karbon dot asam sitrat adalah doping B. Perubahan signifikan terjadi pada puncak kedua. Maka pendopingan B lebih berdampak pada permukaan karbon dot. Atom B berikatan dengan atom bebas C pada permukaan karbon dot membentuk suatu gugus fungsi. Apa jenis gugus fungsi tersebut di luar batasan masalah penelitian ini. Penelitian ini hanya dapat menentukan atom unsur yang didoping lebih banyak berikatan dengan permukaan atau inti partikel karbon dot.

Analisis Spektrum Fotoluminesensi

Hasil uji fotoluminesensi (PL) berupa spektrum dengan sumbu-x adalah panjang gelombang (nm), dan sumbu-y adalah intensitas pendaran. Nilai intensitas pendaran memiliki satuan *arbitrary unit* (a.u.) karena satuan tersebut adalah satuan relatif yang konsisten hanya pada satu *occurrence* (kejadian) rentetan pengambilan data. Rentang data yang dikaji dimulai dari 425 nm sampai 750 nm. Didapatkan hasil berupa spektrum dengan sebuah puncak fotoluminesensi (**Gambar 6**), di mana grafik berwarna hitam adalah spektrum PL karbon dot asam sitrat murni, dan grafik berwarna merah adalah spektrum PL setelah didoping unsur N, S, dan B. Untuk karbon dot murni, spektrumnya memiliki nilai intensitas 758 di panjang gelombang 502 nm atau daerah warna *cyan* [11]. Intensitas bermakna fisis terangnya pendaran karbon dot, dan panjang gelombang adalah warna pendaran. Data hasil pengujian dapat di lihat pada tabel di bawah (**Tabel 2**).

Tabel 2. Data fotoluminesensi karbon dot murni dan setelah doping.

Doping	Intensitas (a.u.)	Puncak λ (nm)
Murni	758	502
Nitrogen (N)	573	520
Sulfur (S)	485	534
Boron (B)	1.301	523



Gambar 6. Spektrum fotoluminesensi karbon sebelum dan sesudah doping N (a), doping S (b), dan doping B (c).

Setelah didoping N (**Gambar 6a**), pendaran karbon dot asam sitrat turun intensitasnya sejauh 184 a.u., atau berkurang 24,3%. Sedangkan untuk pergeseran warna, puncak bergeser sejauh 18 nm ke arah merah. Setelah didoping S (**Gambar 6b**), intensitas fotoluminesensi berkurang 272 a.u., atau pendaran meredup 35,9%. Pendaran karbon dot ini bergeser 32 nm ke arah merah. Spektrum fotoluminesensi setelah doping B (**Gambar 6c**) mengalami peningkatan intensitas dan bergeser ke kanan. Pendaran menjadi lebih terang 71,8% dan bergeser ke arah merah sejauh 21 nm.

Dari ketiga jenis doping, puncak pendaran berada dalam rentang 520—534 nm atau berada dalam daerah hijau. Pendopongan N, S, dan B dapat menggeser spektrum PL ke arah merah. Jenis doping terbaik dari ketiga doping tersebut adalah doping S karena mampu menggeser spektrum sejauh 32 nm ke arah merah. Pendaran karbon dot pada umumnya menghasilkan warna biru-hijau jika dieksitasi laser energi tinggi (UV-Ungu). Berdasarkan riset-riset para peneliti Tiongkok [8] [9] [12], karbon dot yang baik adalah yang dapat berpendar dalam rentang cahaya tampak dari ungu sampai merah. Sedangkan warna merah sulit didapatkan dari karbon dot. Penelitian ini berhasil menggeser pendaran karbon dot ke arah merah namun belum memasuki wilayah merah, hanya sejauh 32 nm dan berada dalam daerah hijau.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan doping cenderung berpengaruh pada permukaan partikel karbon dot sehingga terbentuk ikatan antara atom unsur pendoping dan atom C bebas. Di antara tiga jenis doping N, S, dan B, doping yang mudah berikatan dengan permukaan partikel karbon dot asam sitrat adalah doping B dengan *dopant* asam borat (H_3BO_3).
2. Penambahan doping N, S, dan B pada karbon dot asam sitrat dapat mempengaruhi intensitas pendaran, turun untuk N dan S, naik untuk B. Ketiga jenis doping ini dapat menggeser spektrum PL ke arah merah, dengan nilai terbesar untuk doping S yaitu sejauh 32 nm.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Pusat Penelitian Fisika (P2F) Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) yang telah memberikan izin bagi kami untuk melakukan penelitian ini di Laboratorium Laser P2F-LIPI.

REFERENSI

- [1] N. Kirkwood, B. Singh dan P. Mulvaney, "Enhancing quantum dot LED efficiency by tuning electron mobility in the ZnO electron transport layer," *Adv. Mat. Interfaces* **3**(22), (2016).
- [2] R. Jelinek, *Carbon Quantum Dots: Synthesis, Properties, and Applications* (Springer, Switzerland, 2017).
- [3] F. R. Baptista, S. A. Belhout, S. Giordani dan S. J. Quinn, "Recent developments in carbon nanomaterial sensors," *Chem. Soc. Rev.* **44**(13), 4433-4453, (2015).
- [4] N. R. Pirez, C. Santos dan R. Sousa, "Novel and fast microwave-assisted synthesis of carbon quantum dots from raw cashew gum," *J. Braz. Chem. Soc.* **26**(6), 1274-1282, (2015).
- [5] X. Xu, R. Ray dan Y. Gu, "Electrophoretic analysis and purification of fluorescent single-walled carbon nanotube fragments," *J. Am. Chem. Soc.* **126**(40), 12736-12737, (2004).
- [6] S. Hu, A. Trinchi, P. Atkin dan I. Cole, "Tunable photoluminescence across the entire visible spectrum from carbon dots excited by white light," *Ange. Chem.* **54**, 2970-2974, (2015).
- [7] S. Qu, D. Zhou, D. Li, W. Ji, P. Jing, D. Han, L. Liu, H. Zheng dan D. Shen, "Toward efficient orange emissive carbon nanodots through conjugated sp²-domain controlling and surface charges engineering," *Adv. Mat.* **28**, 3516-3521, (2016).

- [8] S. Sun, L. Zhang, K. Jiang, A. Wu dan H. Lin, "Toward high-efficient red emissive carbon dots: facile preparation, unique properties, and applications as multifunctional theranostoc agents," *Chem. Mat.* **28**(22), 8659-8668, (2016).
- [9] H. Ding, J. Wei, N. Zhong, Q. Gao dan H. Xiong, "Highly efficient red-emitting carbon dots with gram-scale yield for bioimaging," *Langmuir* **33**(44), 12635-12642, (2017).
- [10] A. H. Wilson, *The Theory of Metals* (Cambridge University Press, Cambridge, 1965).
- [11] A. Kitai, "Principles of Luminescence," dalam *Luminescent Materials and Applications*, disunting oleh A. Kitai (John Wiley & Sons Ltd., USA, 2008).
- [12] H. Ding, Y. Ji, J. Wei, Q. Gao, Z. Zhao dan H. Xiong, "Facile synthesis of red-emitting carbon dots from pulp-free lemon juice for bioimaging," *J. Mat. Chem. B* **5**(26), 5272-5277, (2017).