

Received: 29 March 2018
Revised: 19 April 2018
Accepted: 19 April 2018
Published: 30 April 2018

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF GOLD NANOPARTICLE ADDITION TO PHOTOLUMINESCENCE EMISSION INTENSITY AND DECAY TIME OF 618-CDSE QUANTUM DOTS

Muhammad Lawrence Pattersons^{1, a)}, Isnaeni^{2, b)}

¹*Prodi Fisika UIN Syarif Hidayatullah Jakarta, Jl. Ir. H. Juanda No. 95, Tangerang Selatan 15412*

²*Pusat Penelitian Fisika Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Gedung 442, Puspiptek, Tangerang Selatan 15314*

Email: ^{a)}muhammad4lawrence@gmail.com, ^{b)}isnaeni@lipi.go.id

Abstrak

Telah dilakukan pencampuran nanopartikel emas dengan kuantum dot CdSe 618. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan nanopartikel emas terhadap intensitas emisi dan waktu peluruhan fotoluminesensi kuantum dot CdSe 618. Dalam 2 mL kuantum dot CdSe 618, ditambahkan nanopartikel emas sebanyak 40 μL , 80 μL , dan 120 μL . Pada setiap penambahan tersebut, dilakukan pengujian fotoluminesensi dan *time-resolved photoluminescence*, masing-masing untuk mengetahui intensitas emisi dan waktu peluruhan fotoluminesensi kuantum dot CdSe 618 setelah ditambahkan dengan nanopartikel emas. Dilakukan pula pengukuran terhadap rentang panjang gelombang absorpsi dari nanopartikel emas, beserta ukuran diameter partikel-partikelnya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa secara keseluruhan, intensitas emisi kuantum dot CdSe 618 setelah ditambahkan dengan nanopartikel emas menjadi lebih rendah, dan nilai waktu peluruhan fotoluminesensi menjadi lebih besar. Penurunan intensitas emisi dan peningkatan waktu peluruhan fotoluminesensi diakibatkan oleh kemunculan plasmon pada nanopartikel emas.

Kata-kata kunci: nanopartikel emas, kuantum dot, fotoluminesensi.

Abstract

We have done the mixing of gold nanoparticles and CdSe 618 quantum dots. The purpose of this study is to see the influence of gold nanoparticles increment to emission intensity and photoluminescence decay time of CdSe 618 quantum dots. Into 2 mL of CdSe 618 quantum dots, we added gold nanoparticles as much as 40 μL , 80 μL , and 120 μL . At each adding, we did photoluminescence and time-resolved photoluminescence testings, to see emission intensity and photoluminescence time decay of CdSe 618 quantum dots after the adding of gold nanoparticles. We also did a measurement of absorption wavelength range of gold nanoparticles, along with diameter size of the particles. The results showed that, overall, the emission intensity of CdSe 618 quantum dots became lower after the adding of gold nanoparticles, and the value of photoluminescence decay time became bigger. The decrease of emission intensity and the increment of photoluminescence decay time were caused by the appearance of a plasmon at gold nanoparticles.

Keywords: gold nanoparticles, quantum dots, photoluminescence.

PENDAHULUAN

Kuantum dot adalah kristal semikonduktor yang memiliki ukuran berorde nanometer. Rentang panjang gelombang absorpsi dan emisi dari nanopartikel ini bergantung pada ukuran partikel-partikelnya. Sifat-sifat optik yang dimiliki oleh kuantum dot antara lain adalah luminesensi yang terang, puncak emisi cahaya yang sempit, dan rentang panjang gelombang eksitasi yang lebar. Material semikonduktor berorde nanometer ini banyak diaplikasikan sebagai sensor optik untuk keperluan *imaging*, *target labeling*, sensor temperatur, bahkan *sensitizer* untuk sel surya [1].

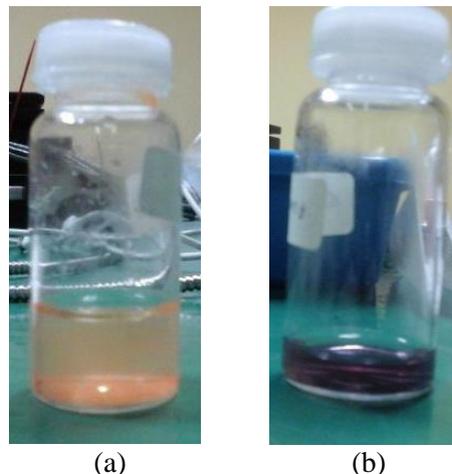
Kuantum dot adalah nanopartikel di mana elektron dan *hole* terkurung di dalam jari-jari Bohr eksiton dari material tersebut. Hubungan antara ukuran partikel dan *band gap* kuantum dot pertama kali diturunkan oleh Louis Brus pada tahun 1984, dan terbukti secara eksperimental dalam jangka waktu hampir satu dekade setelahnya [2].

Efisiensi kuantum dari kuantum dot cukup tinggi, yaitu hingga mencapai 80 % [3]. Efisiensi kuantum pada material luminesensi merupakan rasio antara jumlah foton yang dipancarkan dengan jumlah foton yang diserap, dan merupakan parameter penentu kualitas material luminesensi tersebut [4-6]. Dalam aplikasinya sebagai devais fotonik, nilai efisiensi kuantum dari kuantum dot dapat menurun secara drastis hingga mencapai 20 % akibat oksidasi pada permukaan kuantum dot. Pada pengaplikasian tersebut, umumnya kuantum dot dibuat menjadi lapisan tipis dengan metode deposisi atau *spin-coating*. Ketika lapisan itu terkena udara dari lingkungan di sekitarnya, gugus yang melindungi kuantum dot di dalam larutan menjadi terdegradasi, sehingga terjadi oksidasi pada permukaan kuantum dot, sebagaimana yang telah disebutkan sebelumnya [3, 4].

Salah satu cara untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah dengan penambahan nanopartikel logam pada kuantum dot. Nanopartikel logam yang digunakan dapat berupa emas (Au NPs), perak (Ag NPs), aluminium (Al NPs), dan beberapa logam lainnya. Pada penambahan nanopartikel logam, diharapkan intensitas emisi pendaran cahaya kuantum dot meningkat akibat kehadiran plasmon dari nanopartikel logam tersebut [3].

Di sisi lain, interaksi antara plasmon dan kuantum dot tidak selalu berimplikasi pada meningkatnya intensitas emisi kuantum dot. Ketidaksesuaian antara panjang gelombang absorpsi dari nanopartikel logam dengan panjang gelombang emisi kuantum dot dapat berakibat pada penurunan intensitas emisi kuantum dot setelah ditambahkan nanopartikel emas [3].

Plasmon yang terjadi pada nanopartikel logam merupakan *localized surface plasmon* (plasmon permukaan terlokalisasi). Teori-teori dasar bagi *localized surface plasmon* dikerjakan oleh Gustav Mie, dan dapat diaplikasikan pada nanopartikel logam berbentuk bola dan elipsoidal [7].



GAMBAR 1. (a) Kuantum dot CdSe 618, dan (b) Nanopartikel emas (Au NPs).

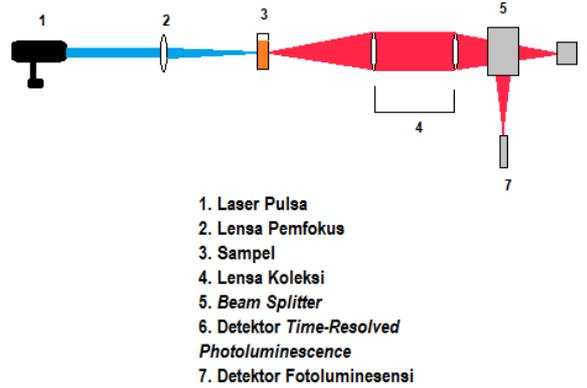
Ketika terjadi fotoluminesensi pada kuantum dot atau material luminesensi lainnya, intensitas cahaya bukanlah satu-satunya besaran yang dapat diukur. Besaran lainnya yang dapat diukur dan masih berkaitan dengan fenomena fotoluminesensi adalah waktu peluruhan fotoluminesensi. Besaran tersebut adalah selang waktu antara datangnya cahaya pengeksitasi hingga material luminesensi berpendar. Lama waktu peluruhan fotoluminesensi dapat dipengaruhi oleh banyak faktor, seperti temperatur, lemahnya transisi intramolekul yang diizinkan dalam suatu material luminesensi, dan proses relaksasi non-radiatif [8].

Dalam penelitian ini, dilakukan pencampuran antara nanopartikel emas (Au NPs) dengan kuantum dot CdSe dengan panjang gelombang emisi cahaya berada pada *range* di sekitar 618 nm, atau biasa disebut sebagai kuantum dot CdSe 618. Kuantum dot CdSe memiliki kelebihan dibanding kuantum dot lainnya, yaitu kemudahan dalam hal sintesis dan tunabilitas, sehingga menjadikannya jenis kuantum dot yang banyak diteliti [9]. Kuantum dot jenis ini adalah nanopartikel luminesensi yang banyak diaplikasikan sebagai *dye* untuk *sensitizer* panel surya [10]. Selain itu, kuantum dot CdSe juga memiliki peluang yang besar untuk diaplikasikan dalam bidang teknologi sains luar angkasa, fabrikasi panel surya, dan sensor kimia [11]. Meskipun memiliki aplikasi yang cukup menjanjikan, kuantum dot jenis ini tidak digunakan untuk aplikasi biomedis, karena bersifat toksik [9]. Pembuatan kuantum dot CdS dapat dilakukan dengan metode sintesis dari bubuk logam selenium (Se), kadmium asetat $\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, dan $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{SH}$ (disebut juga sebagai βME) [10]. Metode lain untuk yang dapat digunakan untuk membuat kuantum dot CdSe adalah fabrikasi melalui proses hidrolisis SeSO_3^{2-} dan pengikatan secara kovalen terhadap ion Cd^{2+} oleh *dispersant mercaptoacetate* [12]. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh nanopartikel emas terhadap intensitas emisi dan waktu peluruhan fotoluminesensi kuantum dot CdSe 618.

METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, dilakukan beberapa tahap, yaitu (1) penyusunan *setup* eksperimen fotoluminesensi dan *time-resolved photoluminescence*, (2) pengujian fotoluminesensi dan *time-resolved photoluminescence* (3) penambahan nanopartikel emas ke dalam kuantum dot CdSe 618, (4) pengujian kembali fotoluminesensi dan *time-resolved photoluminescence*, (5) pengukuran absorbansi nanopartikel emas, dan (6) penganalisisan data.

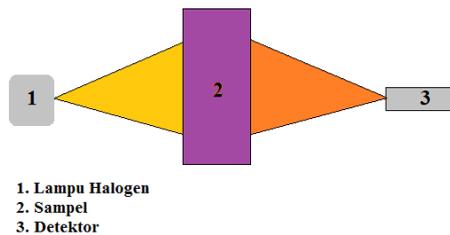
Setup optik yang disusun sedemikian rupa sehingga eksperimen fotoluminesensi dan *time-resolved photoluminescence* dapat dilakukan secara bersamaan. Oleh karena itu, dalam *setup* yang disusun, digunakan *beam splitter* yang berfungsi memecah berkas cahaya emisi dari sampel menjadi 2, masing-masing menuju sensor pengujian fotoluminesensi dan sensor *time-resolved photoluminescence*. Dalam *setup* ini, laser yang digunakan adalah laser pulsa 420 nm. Penggunaan laser pulsa dalam rangkaian eksperimen ini adalah hal yang penting, sebagaimana yang umum digunakan dalam eksperimen *time-resolved photoluminescence*. Dalam rangkaian eksperimen ini, suhu udara dibiarkan tetap (konstan). *Setup* eksperimen fotoluminesensi dan *time-resolved photoluminescence* ditunjukkan oleh gambar 2.



GAMBAR 2. Setup eksperimen pengujian fotoluminesensi dan *time-resolved photoluminescence*.

Setelah *setup* disusun, dilakukan preparasi sampel kuantum dot CdSe 618. Sebanyak 2 mL kuantum dot CdSe dalam bentuk larutan dimasukkan ke dalam kuvet kosong, kemudian dilakukan pengujian fotoluminesensi dan *time-resolved photoluminescence*.

Nanopartikel emas ditambahkan secara bertahap ke dalam kuantum dot CdSe 618, yaitu sebanyak 40 μL , 80 μL , dan 120 μL . Pada setiap tahapan penambahan nanopartikel emas, dilakukan pengujian fotoluminesensi dan *time-resolved photoluminescence*.



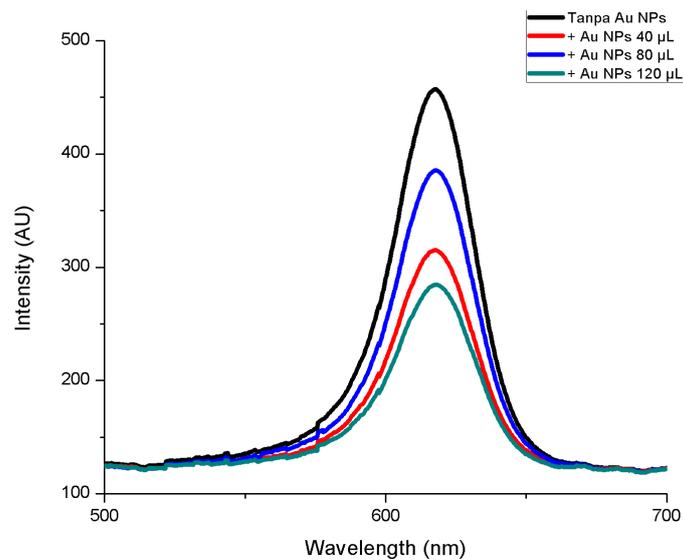
GAMBAR 3. Setup eksperimen pengujian fotoluminesensi dan *time-resolved photoluminescence*.

Pengukuran absorbansi nanopartikel emas bertujuan untuk mengetahui panjang gelombang maksimum dari nanopartikel emas. Pada pengukuran ini, sumber cahaya yang digunakan adalah lampu halogen. Hasil pengukuran absorbansi juga dapat dijadikan data untuk menentukan ukuran partikel dari Au NPs yang digunakan. Untuk menghitung ukuran nanopartikel emas, dapat digunakan persamaan (1).

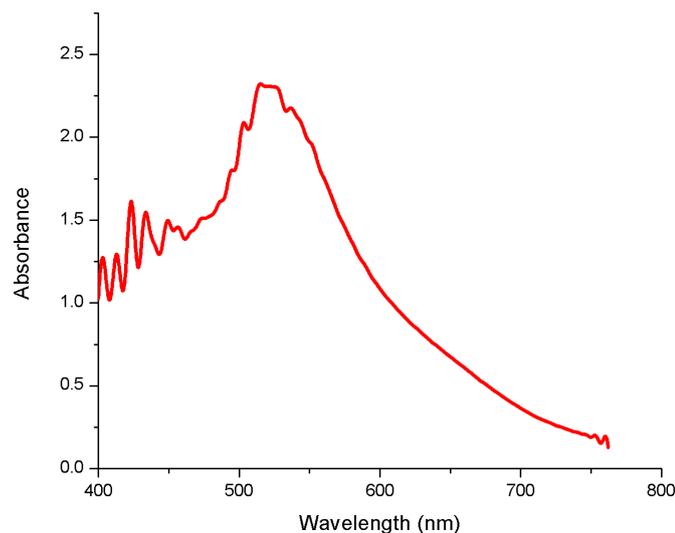
$$d = \exp(B1 \frac{A_{spr}}{A_{450}} - B2) \quad (1)$$

Pada persamaan (1), d adalah ukuran diameter partikel dalam nanometer, $B1$ adalah konstanta bernilai 3,55, A_{spr} adalah nilai absorbansi pada puncak *range* panjang gelombang absorbansi nanopartikel. A_{450} adalah nilai absorbansi pada titik panjang gelombang 450 nm, dan $B2$ adalah konstanta bernilai 3,11 [13].

HASIL DAN PEMBAHASAN



GAMBAR 4. Perbandingan intensitas emisi kuantum dot CdSe 618 sebelum dan setelah penambahan Au NPs.



GAMBAR 5. Absorbansi nanopartikel emas.

Gambar 4 memperlihatkan grafik intensitas kuantum dot CdSe 618 pada saat sebelum dan sesudah penambahan nanopartikel emas. Terlihat bahwa puncak emisi kuantum dot berada di panjang gelombang 617,65 nm (kurva hitam) menurun setelah ditambahkan nanopartikel emas sebanyak 40 µL (kurva merah), disertai dengan bergesernya puncak intensitas ke panjang gelombang 617,87 nm. Intensitas emisi kuantum dot sempat naik kembali di panjang gelombang 618,08 setelah ditambahkan nanopartikel emas sebanyak 80 µL (kurva biru), namun nilai tersebut masih lebih kecil dibandingkan intensitas kuantum dot sebelum ditambahkan nanopartikel emas. Puncak intensitas kuantum dot kembali mengalami penurunan di panjang gelombang 617,87 nm setelah penambahan Au NPs sebanyak 120 µL (kurva hijau).

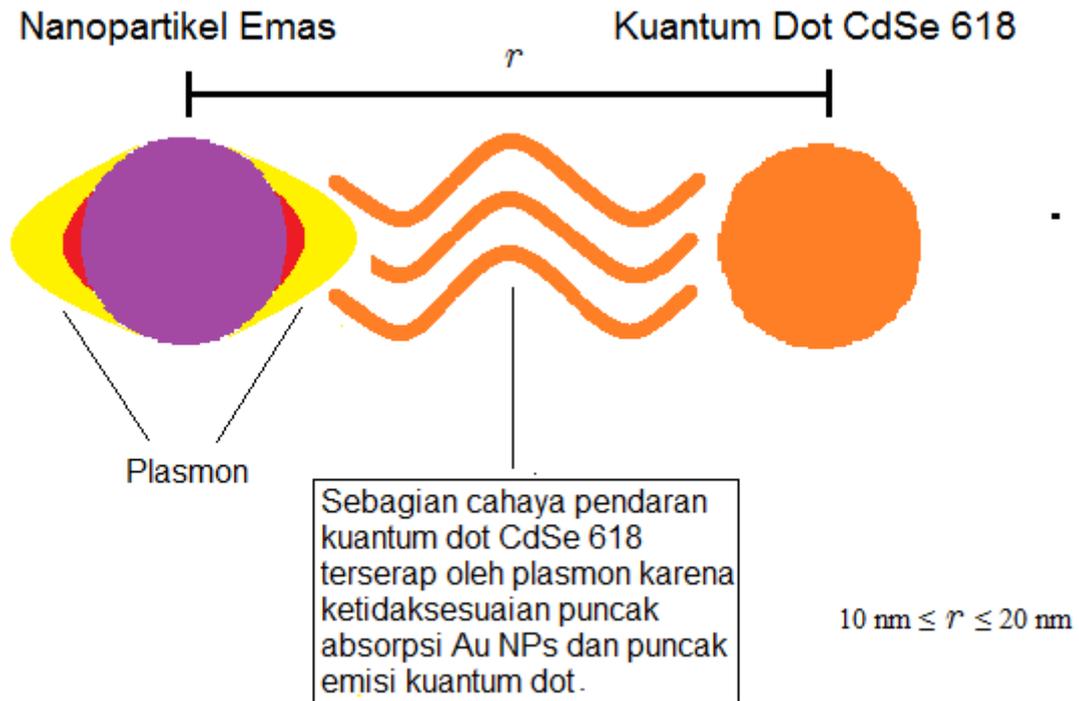
Dari data pengujian fotoluminesensi dan pengukuran absorbansi nanopartikel emas, terlihat bahwa rentang panjang gelombang emisi kuantum dot CdSe 618 berbeda dengan titik panjang gelombang absorpsi maksimum dari nanopartikel emas yang digunakan dalam eksperimen ini, yaitu pada titik 521,19 nm. Hal itu menunjukkan bahwa syarat peningkatan intensitas emisi kuantum dot

tidak terpenuhi, sehingga berimplikasi pada penurunan intensitas emisi kuantum dot. Emisi cahaya dari kuantum dot justru terserap oleh plasmon yang berasal dari nanopartikel emas. Pergeseran puncak panjang gelombang emisi kuantum dot menunjukkan penyerapan cahaya kuantum dot oleh plasmon yang berbeda-beda pada saat penambahan nanopartikel emas. Pada saat penambahan nanopartikel emas sebanyak 40 μL , puncak emisi kuantum dot bergeser dari 617,85 nm ke 617,87 nm. Hal tersebut disebabkan karena penyerapan plasmon ketika volume nanopartikel emas di dalam kuantum dot sebanyak 40 μL lebih banyak terjadi pada panjang gelombang 617,85 nm dibandingkan panjang gelombang 617,87 nm, sehingga puncak intensitas emisi menjadi bergeser. Hal yang sama juga terjadi pada penambahan nanopartikel emas sebanyak 80 μL dan 120 μL .

Di samping ketidaksesuaian antara rentang panjang gelombang emisi kuantum dot dengan puncak panjang gelombang absorpsi nanopartikel emas, faktor lain yang dapat menurunkan intensitas emisi kuantum dot adalah jarak dari partikel-partikel logam yang sangat dekat dengan partikel-partikel kuantum dot, yaitu di mana jarak antara kedua jenis nanopartikel tersebut kurang dari 10 nm. Jarak yang sangat dekat antara keduanya dapat mengakibatkan cahaya pendaran dari kuantum dot justru terserap oleh plasmon. Jarak antara nanopartikel logam dan kuantum dot harus berada pada rentang 10 nm sampai dengan 20 nm. Jika jarak antara keduanya sangat jauh, plasmon tidak akan berpengaruh terhadap kuantum dot, sehingga tidak terjadi peningkatan intensitas emisi [3].

Pada saat penambahan nanopartikel emas sebanyak 80 μL , sempat terjadi kenaikan intensitas emisi kuantum dot CdSe 618, namun menurun kembali ketika penambahan nanopartikel emas sebanyak 120 μL , bahkan penurunan intensitas tersebut lebih rendah dibandingkan pada saat penambahan nanopartikel emas sebanyak 40 μL . Hal ini dapat terjadi dengan asumsi jarak antara nanopartikel emas dan partikel kuantum dot pada saat volume nanopartikel emas di dalam kuantum dot sebanyak 80 μL lebih jauh daripada jarak nanopartikel emas dan partikel kuantum dot ketika volume nanopartikel emas di dalam kuantum dot sebanyak 40 μL dan 120 μL . Penurunan intensitas emisi menunjukkan bahwa semakin banyak volume nanopartikel emas di dalam kuantum dot, semakin banyak partikel-partikel emas yang menghasilkan plasmon, maka semakin banyak pula emisi yang terserap oleh plasmon dengan densitas yang bertambah besar tersebut, terutama plasmon yang dihasilkan oleh partikel-partikel emas yang jaraknya sangat dekat dengan partikel-partikel kuantum dot. Meskipun dapat diasumsikan bahwa jarak antara nanopartikel emas dan partikel kuantum dot pada saat volume nanopartikel emas di dalam kuantum dot sebanyak 80 μL lebih jauh daripada jarak saat volume nanopartikel emas sebanyak 40 μL dan 120 μL , namun jarak itu tetap menghasilkan pengaruh bagi kuantum dot, yaitu nilai intensitas emisi kuantum dot yang lebih rendah dibandingkan dengan kuantum dot CdSe 618 tanpa nanopartikel emas, maka dapat dikatakan bahwa jarak tersebut tidak lebih besar daripada 20 nm.

Gambar 5 menunjukkan grafik absorbansi dari nanopartikel emas yang digunakan dalam penelitian ini. Puncak absorbansi bernilai 2,31, dan berada pada panjang gelombang 521,19 nm. Dengan demikian, nilai A_{spr} juga berada pada titik 521,19 nm tersebut. Dari data absorbansi nanopartikel emas tersebut, didapatkan bahwa nilai A_{spr} adalah sebesar 2,31, dan nilai A_{450} adalah sebesar 1,49, sehingga didapatkan bahwa ukuran diameter nanopartikel emas yang digunakan dalam eksperimen ini adalah sebesar 10,95 nm. Dapat dikatakan bahwa penambahan nanopartikel emas dengan ukuran diameter 10,95 nm pada kuantum dot CdSe 618 mengakibatkan penurunan intensitas emisi kuantum dot CdSe 618.



GAMBAR 6. Ilustrasi penyerapan sebagian cahaya pendaran kuantum dot oleh plasmon nanopartikel emas.

Dari data pengujian fotoluminesensi yang didapatkan, terlihat bahwa secara keseluruhan, intensitas emisi cahaya kuantum dot CdSe 618 menurun setelah dilakukan penambahan nanopartikel emas.

TABEL 1. Waktu peluruhan fotoluminesensi kuantum dot CdSe 618 sebelum dan sesudah penambahan Au NPs.

Sampel	Waktu Peluruhan Fotoluminesensi	Standard Error
Kuantum dot CdSe 618	10,64 ns	0,14 ns
Kuantum dot CdSe 618 + 40 μL Au NPs	12,88 ns	0,13 ns
Kuantum dot CdSe 618 + 80 μL Au NPs	11,29 ns	0,15 ns
Kuantum dot CdSe 618 + 120 μL Au NPs	13,88 ns	0,17 ns

Tabel 1 memperlihatkan nilai waktu peluruhan fotoluminesensi kuantum dot CdSe 618 pada saat sebelum dan setelah penambahan nanopartikel emas. Waktu peluruhan tersebut merupakan waktu paruh dari hasil *exponential fitting* terhadap data yang didapat dari pengujian *time-resolved photoluminescence*. Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa secara keseluruhan, waktu peluruhan fotoluminesensi mengalami peningkatan setelah dilakukan penambahan nanopartikel emas. Nilai *standard error* yang cukup kecil pada hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa pengukuran yang dilakukan dapat dipercaya.

Dalam penelitian ini, suhu di lokasi eksperimen dibiarkan konstan, sehingga faktor yang mempengaruhi perubahan waktu peluruhan fotoluminesensi kuantum dot CdSe 618 adalah penambahan nanopartikel emas. Penelitian mengenai pengaruh plasmon terhadap waktu peluruhan fotoluminesensi pernah dilakukan oleh V. Dan'ko *et al.*, dan didapatkan bahwa nilai waktu peluruhan fotoluminesensi nanopartikel silikon meningkat setelah terdapat plasmon [14]. Hasil yang sama didapatkan dalam penelitian ini, yaitu bertambahnya waktu peluruhan fotoluminesensi kuantum dot CdSe 618 diakibatkan oleh kehadiran plasmon.

SIMPULAN

Terjadi penurunan intensitas emisi kuantum dot CdSe 618 setelah dilakukan penambahan nanopartikel emas dengan ukuran diameter partikel sebesar 10,95 nm. Penurunan terjadi karena ketidaksesuaian antara titik panjang gelombang absorpsi maksimum dari nanopartikel emas dengan rentang panjang gelombang emisi kuantum dot CdSe 618. Penambahan nanopartikel emas pada kuantum dot CdSe 618 berpengaruh terhadap peningkatan waktu peluruhan fotoluminesensinya. Secara umum, penurunan intensitas dan peningkatan waktu peluruhan fotoluminesensi kuantum dot CdSe 618 diakibatkan oleh munculnya plasmon pada nanopartikel emas.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih kepada grup penelitian laser di Pusat Penelitian Fisika (P2F) Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), yang telah memberikan izin bagi kami untuk melakukan penelitian ini di laboratorium laser P2F – LIPI, juga kepada teman-teman mahasiswa; Fiqhri Heda Murdaka (UGM), Muhammad Yusrul Hanna (UGM), Afian Arya Pambudi (UGM), dan Ega Yohanda Putra (Surya University) atas diskusi yang berharga selama penelitian ini dilakukan. Ucapan terimakasih yang istimewa juga untuk Bapak Edi Sanjaya dari Prodi Fisika UIN Syarif Hidayatullah Jakarta atas masukan-masukan yang sangat membantu.

REFERENSI

- [1] M. L. Landry *et al.*, “Simple Syntheses of CdSe Quantum Dots,” *J. Chemical Educ.*, vol. 91, pp. 274-279, Dec. 2013.
- [2] E. S. Shibu *et al.*, “Photoluminescence of CdSe and CdSe/ZnS Quantum Dots: Modifications for Making the Invisible Visible at Ensemble and Single-Molecule Levels,” *Coordination Chemistry Reviews*, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ccr.2013.10.014>
- [3] Isnaeni and N. Yulianto, “Pengaruh Nanopartikel Emas terhadap Peningkatan Emisi Cahaya Kuantum Dot,” *Spektra: Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, vol. 16, pp. 45-49, Dec 2015.
- [4] Isnaeni, “Pengaruh Sumber Eksitasi LED Biru terhadap Efisiensi Kuantum Nanopartikel Luminesensi,” *Telaah*, vol. 32, pp. 39-46, 2014.
- [5] U. Resch-Genger and K. Rurack, “Determination of the Photoluminescence Quantum Yield of Dilute Dye Solutions (IUPAC Technical Report),” *Pure Appl. Chemistry*, vol. 85, pp. 2005-2026, Sep. 2013.
- [6] S. Leyre *et al.*, “Absolute Determination of Photoluminescence Quantum Efficiency Using An Integrating Sphere Setup,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 85, pp. 123115-123115, Dec. 2014.
- [7] D. Sarid and W. Challener, “Localized Surface Plasmons,” in *Modern Introduction to Surface Plasmons: Theory, Mathematica Modeling, and Applications*. New York: Cambridge Univ. Press, 2010, pp. 201-255.
- [8] S. Jie *et al.*, “Time Decay Behavior of Fullerene-C₆₀ Studied by Time-Resolved Photoluminescence,” *Acta Physica Sinica (Overseas Edition)*, vol. 4, pp. 175-182, July 1995.
- [9] D. R. Bell *et al.*, “Concentration-Dependent Binding of CdSe Quantum Dots on the SH3 Domain,” *Nanoscale*, vol. 10, pp. 351-358, Nov. 2017.
- [10] K. Surana *et al.*, “Synthesis, Characterization and Application of CdSe Quantum Dots,” *J. Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 20, pp. 4188-4193, Nov. 2014.
- [11] M. A. Hegazy and A. M. A. El-Hameed, “Characterization of CdSe-Nanocrystals Used in Semiconductors for Aerospace Applications: Production and Optical Properties,” *NRIAG J. Astronomy and Geophysics*, vol. 3, pp. 82-87, June 2014.
- [12] M. J. Almendral-Parra *et al.*, “A Novel Approach to the Fabrication of CdSe Quantum Dots in Aqueous Solution: Procedure for Controlling Size, Fluorescence Intensity, and Stability over Time,” *J. Nanomaterials*, vol. 2014, pp. 1-7, Apr. 2014.

- [13] W. Haiss *et al.*, "Determination of Size and Concentration of Gold Nanoparticles from UV-Vis Spectra," *Analytical Chemistry*, vol. 79, pp. 4215-4221, June 2007.
- [14] V. Dan'ko *et al.*, "Photoluminescence Decay Rate of Silicon Nanoparticles Modified with Gold Nanoislands," *Nanoscale Research Lett.*, vol. 9, Apr. 2014. <http://dx.doi.org/10.1186/1556-276X-9-165>