

Sains Malaysiana 48(7)(2019): 1513–1518
<http://dx.doi.org/10.17576/jsm-2019-4807-20>

Reka Bentuk Sensor Pendar Cahaya Bintik Kuantum ZnCdSe untuk Mengesan Racun Perosak (Fluorescence Sensor Design for Pesticide Detection using ZnCdSe Quantum Dots)

NORHAYATI ABU BAKAR*, AKRAJAS ALI UMAR & MUHAMAD MAT SALLEH

ABSTRACT

The pesticides are widely used in the agricultural sector to increase crop production. However, pesticides are considered as harmful chemicals to human health, animal, fish and may cause environmental damage including water pollution. This paper reports a study on the development of a fluorescent sensor system to detect pesticides in water using ZnCdSe quantum dots (QDs) thin film. An optical sensing system was set up, comprises of four components: light source to excite pesticide, sensor chamber that contains the sample of pesticide, fiber optic to drive light from source to sensor chamber, and analyzer system. The dual arms fiber optic probe is for excitation and emission light paths. A glass surface probe is coated with ZnCdSe QDs thin film and attached at the end of the probe arm. ZnCdSe QDs was synthesized at 5 min of growth time using the wet chemical process at 350°C. The detection of pesticide was done by comparing photoluminescence (PL) spectra of the ZnCdSe thin film in deionized water and then in the pesticide solution. The concentration of pesticide solution was prepared in water at 2.5 µg/L to 2500 µg/L. The sensing experiment showed that the PL peak spectrum of ZnCdSe thin film was dropped after dipped in the pesticide solutions compared with PL peak of ZnCdSe dipped in the water. The percentage drop of PL peak was increasing with the increasing of pesticide concentrations and linearly depends on pesticide concentrations.

Keywords: Fluorescence; pesticide; quantum dots; sensor design system

ABSTRAK

Racun perosak digunakan secara meluas dalam sektor pertanian bagi meningkatkan hasil pengeluaran tanaman. Namun demikian, racun perosak boleh memudaratkan kesihatan manusia, haiwan, ikan dan menyebabkan pencemaran alam sekitar terutamanya pencemaran air. Kertas ini melaporkan kajian pembangunan sistem sensor pendar cahaya untuk mengesan kehadiran racun perosak di dalam air dengan menggunakan filem nipis bintik kuantum. Sistem sensor pendar cahaya mempunyai empat bahagian: sumber cahaya untuk menguji racun perosak, kebuk sensor yang mengandungi sampel racun perosak, serat optik yang memandu cahaya daripada sumber ke kebuk sensor dan sistem analisis. Penduga serat optik dupleks berfungsi menyalurkan sumber cahaya penguja dan pancaran. Pada bahagian hujung serat optik terdapat permukaan kaca pada penduga yang dimendapkan dengan filem nipis bintik kuantum ternari ZnCdSe yang disintesis menggunakan kaedah kimia basah pada suhu 350°C dan masa pertumbuhan hablur ZnCdSe adalah 5 min. Pengesanan racun perosak diukur dengan membandingkan spektrum pendar cahaya (PL) filem nipis ZnCdSe di dalam air dan di dalam larutan racun perosak dengan variasi kepekatan 2.5 hingga 2500 µg/L. Pengesanan dalam uji kaji ini menunjukkan spektrum PL filem nipis ZnCdSe menurun apabila dicelupkan ke dalam larutan racun perosak berbanding dengan puncak spektrum di dalam air. Peratus perbezaan penurunan PL meningkat dengan peningkatan kepekatan racun perosak dan bergantung secara linear kepada kepekatan racun perosak.

Kata kunci: Bintik kuantum; pendar cahaya; racun perosak; reka bentuk sistem sensor

PENDAHULUAN

Sejak akhir-akhir ini, sensor kimia yang berasaskan sifat optik telah menarik perhatian para penyelidik seiring dengan kemajuan dalam bidang teknologi optik dan fotonik. Sensor optik adalah stabil, tidak terganggu oleh fluktuasi elektrik (Sikarwar & Yadav 2015), kemampuan bersifat selektiviti yang tinggi (Labeo et al. 2018) dan beroperasi pada suhu bilik (Morsin et al. 2014). Bahan penderia sensor optik biasanya diperbuat daripada filem nipis. Apabila satu alur cahaya menimpa permukaan filem nipis, maka akan berlaku penyerapan atau pantulan

bergantung kepada sifat bahan filem nipis tersebut dan sifat optik ini dapat diukur sebagai spektrum serapan dan pantulan. Jika filem nipis adalah bahan pendar cahaya, ia akan memancarkan cahaya apabila diuji oleh sumber cahaya pada panjang gelombang tertentu. Seterusnya menghasilkan spektrum pendar cahaya yang boleh diukur. Kehadiran molekul bahan kimia analit yang berdekatan permukaan filem nipis akan mempengaruhi sifat hablur filem nipis menerusi tindak balas tertentu. Dengan itu sifat optik filem nipis berubah. Perubahan spektrum filem nipis tersebut yang dipengaruhi oleh kehadiran bahan kimia

analit dijadikan sebagai parameter penderia. Dalam kes tertentu, perubahan bentuk spektrum optik adalah sangat bergantung kepada jenis bahan kimia analit. Dengan itu sensor yang dibangunkan akan mempunyai sifat selektiviti.

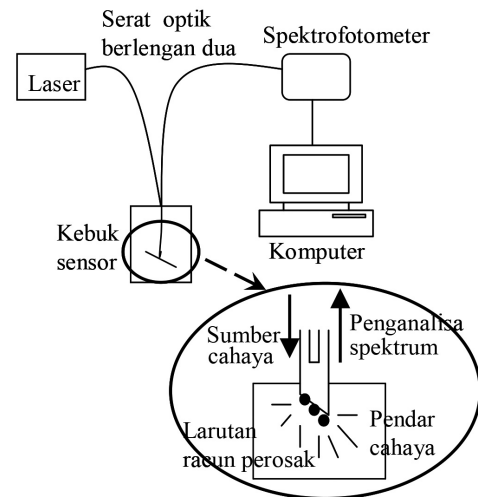
Terdapat pelbagai jenis sensor optik yang telah dibangunkan seperti sensor pendar cahaya (Zhang et al. 2018), pantulan (Li et al. 2015), Raman (Abdullah et al. 2017), serapan (Vivi Fauzia et al. 2018), indeks bias (Rifat et al. 2016) dan kesan plasmon (Morsin et al. 2017). Namun begitu, reka bentuk dan sistem pembangunan sensor optik berasaskan pendar cahaya mempunyai kelebihan dari segi kepekaan, selektiviti, respon yang pantas dan operasi sistem yang mudah (Cao et al. 2018). Sensor pendar cahaya biasanya dipakai untuk mengesan biomolekul seperti protein (Landry et al. 2017), sel tumor (Li et al. 2016), mengesan gas (Guo et al. 2018) dan ion logam terutama logam berat (Peng et al. 2018). Kemajuan dalam pembangunan sensor pendar cahaya ini bertambah menarik perhatian apabila digabungkan dengan nanoteknologi. Contohnya penggunaan bintik kuantum sebagai bahan penderia. Bintik kuantum adalah koloid nanohablur semikonduktor yang berdiameter antara 1-12 nm dan mempunyai sifat optik yang unik iaitu berbeza daripada struktur pukalnya (Zhou et al. 2018). Sensor yang menggunakan parameter optik berasaskan sifat pendar cahaya bintik kuantum adalah sensor ion, sensor pH, sensor persekitaran dan bio-perubatan seperti pengesanan, imbasan dan rawatan terapi (Hai et al. 2018).

Pencegahan penggunaan racun perosak tidak mungkin dilakukan berhubungannya dengan kepentingannya dalam sektor pertanian (Tosi et al. 2018). Namun kehadiran sisa racun perosak di dalam air, tanah, makanan boleh dipantau dengan membangunkan satu sistem sensor pendar cahaya (Bakar et al. 2011). Sistem sensor pendar cahaya ini direka untuk memantau sisa racun perosak di dalam air tanpa memerlukan pegawai makmal yang berkepakaran tinggi dan tanpa melalui proses analisis yang panjang seperti kromatografi cecair atau gas (Wu et al. 2017). Oleh itu, kertas ini akan membincangkan pengesanan Ridomil Gold MZ 68 WP di dalam air diuji dengan menggunakan sistem sensor pendar cahaya yang dibina berasaskan bahan bintik kuantum ZnCdSe. Racun perosak Ridomil Gold MZ 68 WP ini telah diperolehi daripada Institut Kemajuan dan Penyelidikan Pertanian Malaysia (MARDI).

KAEDAH DAN BAHAN

Reka bentuk sistem pendar cahaya dibina berdasarkan sistem optik. Sistem optik merupakan sistem yang ringkas dan murah. Rajah 1 menunjukkan sistem sensor optik yang dibina dalam kajian ini.

Sensor ini terdiri daripada sebuah diod laser, penduga serat optik berlengan dua, spektrofotometer dan kebuk sensor yang mengandungi sampel racun perosak. Diod laser yang dibekalkan oleh Arroyo Instrument berfungsi sebagai sumber cahaya, penduga serat optik berlengan dua sebagai medium penghantaran cahaya penguja dan



RAJAH 1. Skematik reka bentuk sensor pendar cahaya

penerima sumber cahaya (pendar cahaya) manakala spektrofotometer sebagai penganalisis spektrum pendar cahaya. Cahaya yang digunakan adalah diod laser yang berwarna biru, panjang gelombang pada 403.6 nm dan kuasa tipikal minimum sebanyak 40 mW. Pengawal suhu berfungsi memastikan suhu diod laser tersebut sentiasa tetap dan tidak melebihi suhu maksimum. Pengawasan suhu yang disambung pada diod laser boleh mengelakkan masalah kerosakan diod pemancar cahaya.

Serat optik berlengan dua mempunyai dua cabang lengan dan bertemu pada satu hujung yang dilengkapi oleh satu tip. Lengan pertama disambungkan kepada diod laser. Ia akan menghantar sumber cahaya daripada diod laser ke tip untuk menguji bahan penderia yang tersalut pada permukaan tip tersebut. Pendar cahaya yang dipancarkan oleh bahan penderia akan masuk ke lengan kedua serat optik dan dihantar ke spektrometer untuk menganalisis spektrum cahaya yang dipancarkan itu. Pada bahagian paling hujung penduga serat optik ini telah dilengkapi dengan permukaan kaca berstruktur condong pada sudut 45°. Dengan geometri tersebut, sumber cahaya pengujaan tidak akan memasuki laluan lengan kedua serat optik. Dengan itu, cahaya yang masuk ke lengan kedua hanya daripada cahaya yang dipancarkan oleh bahan penderia. Permukaan kaca itu digunakan sebagai substrat untuk dimendapkan filem nipis bintik kuantum yang bertindak sebagai bahan penderia. Spektrofotometer yang digunakan adalah HR 2000 yang dibekalkan oleh syarikat Ocean Optics. Ia boleh mengukur spektrum pendar cahaya dengan julat panjang gelombang dari 200 nm-1100 nm. Kebuk sensor pula dibina daripada bekas kaca yang dibalut dengan kertas hitam pada seluruh badan kaca tersebut. Bahagian atas kebuk pula diletakkan penutup aluminium. Terdapat satu lubang pada aluminium itu bagi membolehkan penduga serat optik dimasukkan ke dalam kebuk sensor yang mengandungi larutan racun perosak.

Bintik kuantum ZnCdSe disintesis menggunakan kaedah kimia-basah pada suhu yang sederhana iaitu 350°C

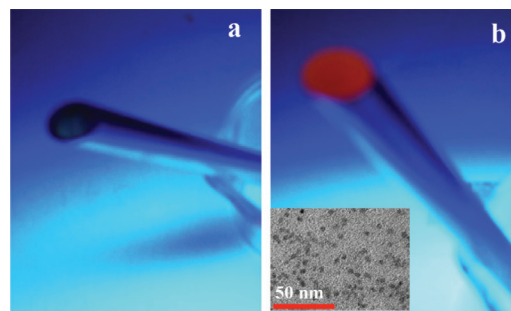
seperti yang telah dilaporkan dalam penerbitan terdahulu (Norhayati et al. 2010). Larutan ZnCdSe dimurnikan menggunakan emparan pada kelajuan 4000 rpm selama 5 min. Mendakan yang terhasil dilarutkan dalam kloroform sebanyak 0.2 mL per tiub. Larutan mendakan ini dititiskan ke atas permukaan kaca penduga dan dibiarkan kering pada suhu bilik untuk digunakan sebagai bahan penerima dalam mengesan racun prosak. Dalam kajian pengesanan ini, Ridomil Gold MZ 68 WP telah dipilih untuk ujikaji ini. Ridomil Gold MZ 68 WP merupakan nama dagangan bagi racun kulat yang mengandungi mankozeb dan metalaksil-M sebagai bahan aktifnya. Nama kimia mankozeb ialah zink-mangan etilena-bis-ditiokarbamat manakala nama kimia metalaksil-M ialah N-2,6-dimetilfenil-N-(metoksiasetil)-alanina. Penggabungan dua bahan aktif ini bertujuan meningkatkan daya racun terhadap kulat. Ia digunakan untuk mengawal penyakit daun, buah-buahan dan bunga-bunga serta serasi digunakan dengan sebilangan besar racun perosak yang lain. Racun ini biasanya digunakan untuk tanaman seperti nanas, anggur, tomato dan ubi kentang. Racun ini telah dipilih oleh pihak Institut Kemajuan dan Penyelidikan Pertanian Malaysia (MARDI) untuk digunakan oleh pekebun di Malaysia dengan pertimbangan bahawa racun tersebut memberi kesan keracunan yang minimum terhadap alam sekitar. Untuk pengesanan racun Ridomil Gold MZ 68 WP di dalam air, serbuk racun ini dilarutkan di dalam air sebanyak sembilan kepekatan iaitu 2.5, 10, 20, 25, 50, 150, 250, 1250 dan 2500 µg/L.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Filem nipis ZnCdSe telah dimendapkan pada permukaan penduga optik menggunakan teknik titis-penuangan serta dikeringkan pada suhu bilik. Langkah pertama untuk memastikan filem nipis ZnCdSe telah berjaya dimendapkan adalah dengan meletakkan filem tersebut di bawah sinaran lembayung (365 nm). Rajah 2 menunjukkan permukaan penduga yang didedahkan di bawah sinaran lembayung sebelum dan selepas dimendapkan filem nipis ZnCdSe. Merujuk kepada Rajah 2, permukaan kaca penduga yang dimendapkan filem nipis telah memancarkan cahaya merah setelah didedahkan di bawah sinaran lembayung. Ini membuktikan bahawa pembentukan filem nipis menggunakan kaedah ini telah berjaya dilakukan pada permukaan kaca penduga serat optik.

Mikroskopi elektron penghantaran (TEM) telah dilakukan untuk menentukan bentuk dan ukuran saiz nanohablur ZnCdSe. Hasil taburan nanohablur ZnCdSe direkodkan menggunakan TEM pada pembesaran 10^6 kali seperti ditunjukkan dalam gambar selitan dalam Rajah 2(b). Taburan nanohablur ZnCdSe yang tertabur pada permukaan adalah berbentuk bulat seragam dan julat saiz nanohablur adalah 5.2 nm.

Pencirian fotopendarcahaya (PL) ke atas filem nipis ZnCdSe yang termendap pada permukaan kaca dijalankan dengan menggunakan sistem sensor seperti dalam Rajah 1. Pengujian spektrum PL filem nipis ZnCdSe direkodkan

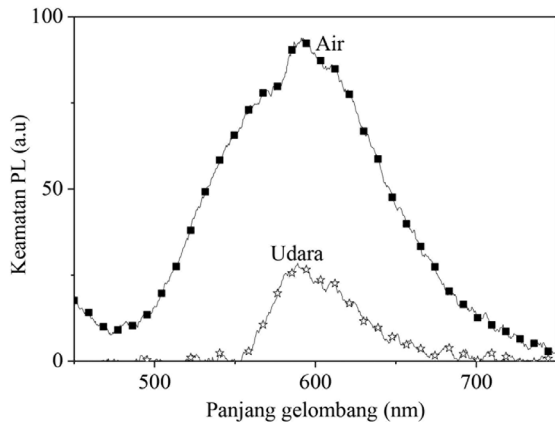


RAJAH 2. Permukaan kaca penduga optik yang didedahkan di bawah sinaran lembayung a) sebelum b) selepas dimendapkan filem nipis ZnCdSe. Gambar selitan dalam Rajah 2(b) ialah taburan nanohablur ZnCdSe

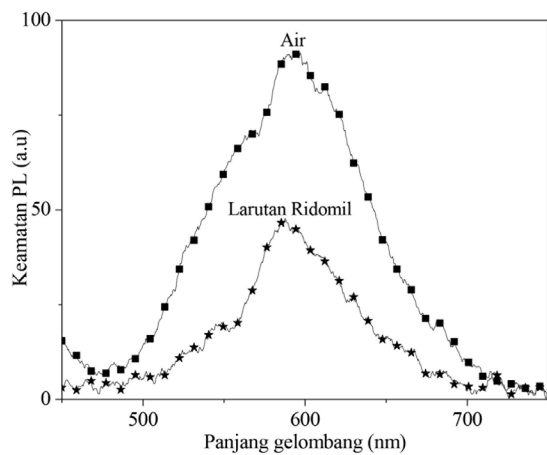
ketika filem berada di dalam udara terbuka dan kemudian di dalam air. Hasil spektrum PL filem nipis ZnCdSe di dalam udara dan di dalam air pada Rajah 3 memaparkan panjang gelombang bagi puncak spektrum PL adalah 577 nm iaitu mewakili sifat pendar cahaya yang berwarna merah dan julat saiz nanohablur pada 5.2 nm. Keamatan puncak PL filem nipis di dalam air ialah 94 a.u. manakala di dalam udara adalah 28 a.u. Peratus penurunan keamatan puncak PL filem di dalam udara berbanding air adalah 70%. Keamatan puncak PL yang lebih tinggi di dalam air disebabkan oleh beberapa perkara yang mungkin. Pertama, pengaruh indeks bias air yang lebih tinggi berbanding udara. Kedua, medium air adalah pegun, sementara medium udara sentiasa bergerak. Sebahagian elektron nanohablur yang teruja dalam medium udara berkemungkinan berpindah ke molekul udara menerusi pergeseran molekul udara dengan permukaan bintik kuantum (Li & Zhang 2009). Kehilangan elektron itu menyebabkan tenaga foton yang dibebaskan adalah rendah. Dengan mengamati Rajah 3, kita dapat melihat perbezaan kelebaran penuh setengah maksimum (FWHM) spektrum PL filem nipis bintik kuantum dalam air dan udara masing-masing berpadanan dengan 58 nm dan 120 nm. Selain itu, kestabilan keamatan puncak PL filem nipis di dalam udara dan air telah diperhatikan selama 30 min dan didapati stabil.

Uji kaji kepekaan sensor terhadap racun perosak dilakukan dengan memasukkan filem nipis ZnCdSe ke dalam larutan racun perosak Ridomil Gold MZ 68 WP yang berkepekatan 20 µg/L. Kepekaan sensor ini diperhatikan dengan membandingkan spektrum pendar cahaya filem nipis di dalam air dengan spektrum filem nipis di dalam larutan racun perosak. Rajah 4 menunjukkan spektrum fotopendarcahaya (PL) filem nipis bintik kuantum ZnCdSe di dalam air dan di dalam larutan Ridomil Gold MZ 68 WP. Terdapat dua perubahan kepada spektrum PL iaitu keamatan puncak PL filem nipis dan kedua adalah perubahan kelebaran spektrum yang boleh diperhatikan daripada rajah tersebut. Sementara itu, bentuk spektrum dan kedudukan puncak PL filem nipis tidak berubah.

Keamatan puncak PL filem nipis di dalam air adalah 93 a.u. Manakala, keamatan puncak PL filem nipis setelah dimasukkan ke dalam larutan Ridomil Gold MZ 68 WP



RAJAH 3. Spektrum PL film nipis ZnCdSe di dalam udara dan air



RAJAH 4. Spektrum PL film nipis ZnCdSe di dalam air dan larutan Ridomil Gold MZ 68 WP

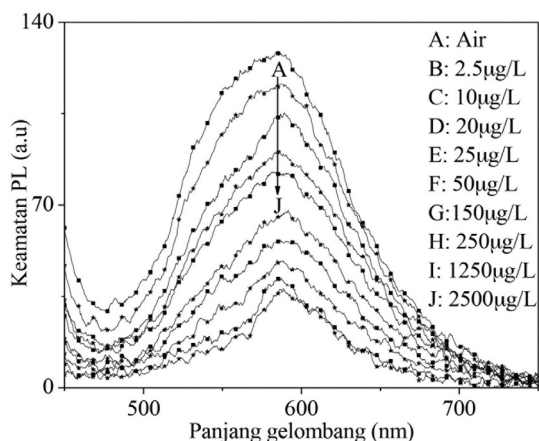
adalah 47 a.u. Penurunan keamatan puncak sebanyak 49% ini menggambarkan bahawa sebahagian tenaga film titik kuantum yang teruja telah berpindah ke molekul racun perosak. Sementara itu, perubahan kelebaran spektrum menunjukkan berlaku interaksi antara permukaan titik kuantum dengan molekul racun perosak (Ling et al. 2008). Kelebaran penuh pada setengah maksimum (FWHM) yang dikirakan bagi film ZnCdSe di dalam air dan larutan racun perosak adalah masing-masing berpadanan dengan 110 nm dan 69 nm. Tiada perubahan yang berlaku kepada bentuk spektrum dan kedudukan puncak PL film nipis yang menunjukkan sifat fizikal titik kuantum adalah stabil di dalam larutan racun perosak. Hasil yang ditunjukkan oleh Rajah 4 dapat dirumuskan bahawa kehadiran racun perosak Ridomil Gold MZ 68 WP dalam larutan air boleh ditentukan berdasarkan penurunan puncak PL film nipis dan kelebaran spektrum PL film tersebut. Dengan itu, mekanisme yang paling mungkin berlaku adalah proses pemindahan elektron atau lohong iaitu penurunan puncak PL film nipis titik kuantum adalah disebabkan oleh pemindahan elektron daripada titik kuantum yang teruja

kepada molekul racun perosak. Hal ini disokong oleh sifat racun perosak yang tidak mempunyai pendar cahaya dan bahan aktif Ridomil Gold MZ 68 WP terdiri daripada bahan pengoksida (Graf pendar cahaya dan serapan Ridomil Gold MZ 68 WP dilampirkan dalam data sokongan). Kestabilan spektrum PL bagi film nipis di dalam larutan racun perosak diperhatikan selama 30 min. Film nipis ZnCdSe dibiarkan di dalam larutan racun perosak selama 30 min dan direkodkan kestabilan spektrumnya. Didapati keamatan puncak PL film nipis ZnCdSe adalah stabil di dalam larutan racun perosak, dengan peratusan perubahan yang kecil, iaitu sebanyak 0.8%.

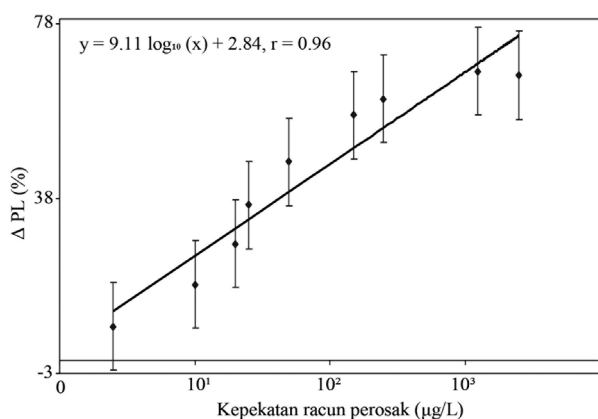
Di samping itu, pengujian keboleholangan sensor diteruskan untuk memastikan kepekaan sensor terhadap pengesanan racun perosak dapat diulang. Film nipis ZnCdSe direndamkan ke dalam air selama 5 min, kemudian direndamkan ke dalam larutan racun perosak yang berkepekatan 20 $\mu\text{g/L}$ selama 5 min. Setiap kali langkah tersebut diulang, film nipis akan dicuci terlebih dahulu selepas dikeluarkan daripada larutan racun perosak. Langkah ini diulang sebanyak enam kali kitaran pengulangan dan direkodkan keamatan PL bagi setiap kitaran. Berdasarkan uji kaji keboleholangan tersebut, sensor pendar cahaya mampu memberikan pengulangan kepekaan yang baik apabila film nipis dimasukkan ke dalam air dan larutan Ridomil Gold MZ 68 WP. Ralat kitaran keboleholangan ini adalah sebanyak 8.75%.

Setelah sensor pendar cahaya menunjukkan kepekaan terhadap kehadiran Ridomil Gold MZ 68 WP, pengesanan racun perosak diteruskan dengan menguji kepekaan sensor terhadap sembilan kepekatan larutan Ridomil Gold MZ 68 WP. Hasil kepekaan sensor terhadap sembilan kepekatan racun perosak ditunjukkan dalam Rajah 5. Didapati keamatan PL film nipis semakin menurun apabila dimasukkan ke dalam larutan racun perosak yang berkepekatan tinggi. Kadar penurunan keamatan puncak PL telah meningkat dengan peningkatan kepekatan racun perosak (Yan et al. 2015). Ini juga seiring dengan penurunan daripada kelebaran spektrum PL film nipis (Kong et al. 2010). Sementara itu bentuk spektrum dan kedudukan puncak tidak berubah di dalam air dan di dalam kepekatan racun perosak yang berbeza.

Kepekaan sensor terhadap sembilan kepekatan larutan Ridomil Gold MZ 68 WP diulang sebanyak 12 set pengulangan untuk memerhatikan statistik kepekaan sensor itu. Rajah 6 menunjukkan peratus penurunan keamatan PL untuk 12 kali pengulangan. Berdasarkan analisis daripada graf statistik tersebut, lengkung kalibrasi bagi sensor film nipis titik kuantum terhadap larutan Ridomil Gold MZ 68 WP menunjukkan garis linear yang baik, dengan pekali korelasi (r) adalah 0.96. Kepekaan sensor yang dihitung juga adalah sebanyak 9.11 ± 1.38 . Pengiraan ini dilakukan berdasarkan analisis statistik yang diterangkan oleh Montgomery et al. (2003). Peratus penurunan keamatan PL (ΔPL) yang bergantung secara linear kepada kepekatan racun perosak mungkin boleh digunakan untuk mengukur serta menganggar kandungan racun perosak di dalam air.

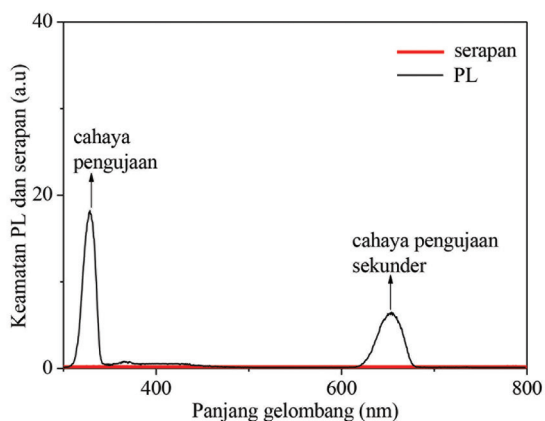


RAJAH 5. Spektrum PL filem nipis ZnCdSe di dalam air dan sembilan kepekatan larutan Ridomil Gold MZ 68 WP



RAJAH 6. Statistik kepekaan sensor terhadap sembilan kepekatan racun perosak Ridomil Gold MZ 68 WP

Data Sokongan



Graf serapan dan PL bagi larutan Ridomil Gold MZ 68 WP yang berkepekatan 20 µg/L

KESIMPULAN

Dalam kajian ini, suatu sistem sensor optik menggunakan filem nipis bintang kuantum ZnCdSe untuk mengesan racun perosak dalam air telah dibangunkan. Sensor tersebut dibuat berasaskan kepada keunikan sifat pendar cahaya filem nipis bintang kuantum. Filem nipis bintang kuantum ZnCdSe berupaya menderia kehadiran molekul racun perosak di dalam air menerusi kesan penurunan keamatan puncak PL. Kepekaan sensor filem nipis bintang kuantum ZnCdSe yang ditunjukkan melalui perubahan penurunan keamatan puncak PL adalah bertambah dengan peningkatan kepekatan larutan Ridomil Gold MZ 68 WP daripada kepekatan serendah 2.5 µg/L hingga setinggi 2500 µg/L. Peratus perbezaan penurunan PL (ΔPL) filem nipis ZnCdSe adalah linear dengan kepekatan Ridomil Gold MZ 68 WP. Kepekaan sensor yang dianalisis berdasarkan lengkung kalibrasi daripada garis linear dengan pekali korelasi, r di atas 0.90.

PENGHARGAAN

Pengarang ingin merakamkan penghargaan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia, Kementerian Pendidikan Tinggi Malaysia, Pusat Pengurusan Penyelidikan dan Instrumentasi (CRIM) atas sokongan dana melalui geran GGPM-2017-049.

RUJUKAN

- Bakar, N.A., Salleh, M.M., Umar, A.A. & Yahaya, M. 2011. The detection of pesticides in water using ZnCdSe quantum dot films. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology* 2: 2.
- Cao, X., Mu, L., Chen, M. & She, G. 2018. A facile fluorescent sensor based on silicon nanowires for dithionite. *Applied Surface Science* 441(5): 388-393.
- Guo, L., Wang, M. & Cao, D. 2018. A Novel Zr-MOF as fluorescence turn-on probe for real-time detecting H₂S gas and fingerprint identification. *Small* 14(17): 1703822.
- Hai, X., Wang, Y., Hao, X., Chen, X. & Wang, J. 2018. Folic acid encapsulated graphene quantum dots for ratiometric pH sensing and specific multicolor imaging in living cells. *Sensors and Actuators B: Chemical* 268(9): 61-69.
- Kong, C., Qin, L., Liu, J., Zhong, X., Zhu, L. & Long, Y.T. 2010. Determination of dissolved oxygen based on photoinduced electron transfer from quantum dots to methyl viologen. *Analytical Methods* 2(8): 1056-1062.
- Landry, M.P., Hiroki, A., Chen, A.Y., Cao, J., Kottadiel, V.I., Chio, L., Yang, D., Dong, J., Lu, T.K. & Strano, M.S. 2017. Single-molecule detection of protein efflux from microorganisms using fluorescent single-walled carbon nanotube sensor arrays. *Nature Nanotechnology* 12(4): 368-377.
- Li, D.P., Wang, Z.Y., Cao, X.J., Wang, J.C., Cui, H.Z., Miao, J.Y. & Zhao, B.X. 2016. A mitochondria-targeted fluorescent probe for ratiometric detection of endogenous sulfur dioxide derivatives in cancer cells. *Chemical Communications* 52(13): 2760-2763.
- Li, D., Sun, Y., Yu, S., Sun, C., Yu, H. & Xu, K. 2015. A single-loop fiber attenuated total reflection sensor enhanced by silver nanoparticles for continuous glucose monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical* 220(12): 1033-1042.

- Li, J. & Zhang, J.Z. 2009. Optical properties and applications of hybrid semiconductor nanomaterials. *Coordination Chemistry Reviews* 253(23-24): 3015-3041.
- Ling, X., Deng, Da-Wei., Zhong, Wen-Ying & Yu, Jun-Sheng. 2008. Quantitative determination of pazufloxacin using water-soluble quantum dots as fluorescent probes. *Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi = Guang Pu* 28(6): 1317-1321.
- Marlia Morsin, Muhamad Mat Salleh, Akrajas Ali Umar & Mohd Zainizan Sahdan. 2017. Gold nanoplates for a localized surface plasmon resonance-based boric acid sensor. *Sensors* 17(5): 947.
- Marlia Morsin, Muhamad Mat Salleh, Akrajas Ali Umar & Muhamad Yahaya. 2014. Localized surface plasmon resonance sensor of gold nanoplates for detection of boric acid. *Key Engineering Materials* 605(4): 356-359.
- Mohmed Labeab, Abdel-Hamed Sakr, Moataz Soliman, Tarek M. Abdel-Fattah & Shaker Ebrahim. 2018. Effect of capping agent on selectivity and sensitivity of CdTe quantum dots optical sensor for detection of mercury ions. *Optical Materials* 79(5): 331-335.
- Montgomery, D.C., Runger, G.C. & Hubele, N.F. 2003. *Engineering Statistics*. Ed. Ke-3. United States: John Wiley & Sons, Inc.
- Norhayati Abu Bakar, Akrajas Ali Umar & Muhamad Mat Salleh. 2010. Synthesis of CdTe-CdSe core-shell quantum dots with luminescence in the red. *Sains Malaysiana* 39(3): 473-477.
- Nur Adliha Abdullah, Norhayati Abu Bakar, Shapter, J.G., Muhamad Mat Salleh & Akrajas Ali Umar. 2017. Synthesis of silver-platinum nanoferns substrates used in surface-enhanced Raman Spectroscopy sensors to detect creatinine. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology* 8(2): 025015.
- Peng, J., Li, J., Xu, W., Wang, L., Su, D., Lean Teoh, C. & Chang, Y.T. 2018. Silica nanoparticle-enhanced fluorescent sensor array for heavy metal ions detection in colloid solution. *Analytical Chemistry* 90(3): 1628-1634.
- Rifat, A.A., Mahdiraji, G.A., Sua Yong Meng, Ahmed Rajib, Shee, Y.G. & Mahamd Adikan, F.R. 2016. Highly sensitive multi-core flat fiber surface plasmon resonance refractive index sensor. *Optics Express* 24(3): 2485-2495.
- Sikarwar, S. & Yadav, B.C. 2015. Opto-electronic humidity sensor: A review. *Sensors and Actuators A: Physical* 233(9): 54-70.
- Tosi, S., Costa, C., Vesco, U., Quaglia, G. & Guido, G. 2018. A 3-year survey of Italian honey bee-collected pollen reveals widespread contamination by agricultural pesticides. *Science of the Total Environment* 615(February): 208-218.
- Vivi Fauzia, Nurlily, Cuk Imawan, Ni Made Manik Savitri Narayani & Anita Eka Putri. 2018. A localized surface plasmon resonance enhanced dye-based biosensor for formaldehyde detection. *Sensors and Actuators B: Chemical* 257(3): 1128-1133.
- Wu, X., Song, Y., Yan, X., Zhu, C., Ma, Y., Du, D. & Lin, Y. 2017. Carbon quantum dots as fluorescence resonance energy transfer sensors for organophosphate pesticides determination. *Biosensors and Bioelectronics* 94(9): 292-297.
- Yan, X., Li, H., Han, X. & Su, X. 2015. A ratiometric fluorescent quantum dots based biosensor for organophosphorus pesticides detection by inner-filter effect. *Biosensors and Bioelectronics* 74(12): 277-283.
- Zhang, P., Tian, Y., Liu, H., Ren, J., Wang, H., Zeng, R., Long, Y. & Chen, J. 2018. *In vivo* imaging of hepatocellular nitric oxide using a hepatocyte-targeting fluorescent sensor. *Chemical Communications* 54(52): 7231-7234.
- Zhou, Y., Zhao, H., Ma, D. & Rosei, F. 2018. Harnessing the properties of colloidal quantum dots in luminescent solar concentrators. *Chemical Society Reviews* 47(15): 5866-5890.

Institute of Microengineering and Nanoelectronics (IMEN)
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan
Malaysia

*Pengarang untuk surat-menyurat; email: norhayati.ab@ukm.edu.my

Diserahkan: 9 Januari 2019

Diterima: 3 April 2019