

KRZYSZTOF DWIECKI, MAŁGORZATA NOGAŁA-KAŁUCKA,
KRZYSZTOF POLEWSKI

ZASTOSOWANIE KROPEK KWANTOWYCH DO OZNACZANIA SKŁADNIKÓW I ZANIECZYSZCZEŃ ŻYWNOŚCI

Streszczenie

Kropki kwantowe (QD) są półprzewodnikowymi nanostrukturami o średnicy $1 \div 100$ nm, zdolnymi do fotoluminescencji. W roztworach oddziaływania pomiędzy atomami na powierzchni kropki kwantowej i otaczającymi je cząsteczkami mogą w istotny sposób wpływać na fotoluminescencję QD. Właściwość ta jest podstawą wykorzystania kropek kwantowych w analityce. Często stosuje się modyfikacje kropek kwantowych poprzez powlekanie ich powierzchni związkami zdolnymi do oddziaływania z analitem. Zastosowanie kropek kwantowych umożliwia opracowania nowych, czułych, selektywnych i szybkich metod analitycznych. W pracy przedstawiono metody oznaczania sacharydów, peptydów i białek, kwasu askorbinowego, związków fenolowych oraz zanieczyszczeń żywności i substancji niepożądanych. Opisa-
no także szereg mechanizmów oddziaływania kropek kwantowych z oznaczanymi substancjami.

Słowa kluczowe: kropki kwantowe, analityka żywności, składniki żywności, zanieczyszczenia żywności

Wprowadzenie

Kropki kwantowe (ang. *quantum dots* – QD) to półprzewodnikowe nanostruktury o średnicy $1 \div 100$ nm, w skład których wchodzi głównie pierwiastki z grup II - IV, II - V oraz IV - VI układu okresowego. Do najczęściej syntetyzowanych kropek kwantowych należą struktury zbudowane z CdSe oraz CdTe [14]. Wskutek niewielkich rozmiarów kropki kwantowe mają dyskretne poziomy energetyczne, podobne do występujących w atomach. Fotoluminescencja (FL) tych układów jest zależna od rozmiaru, dlatego stosunkowo łatwo można uzyskać kropki emitujące promieniowane elektromagnetyczne o różnych długościach fali. W porównaniu z organicznymi związkami fluo-

Dr K. Dwiecki, prof. dr hab. M. Nogala-Kałucka, Katedra Biochemii i Analizy Żywności, ul. Mazowiecka 48, 61-623 Poznań, prof. dr hab. K. Polewski, Katedra Fizyki, ul. Wojska Polskiego 38/42, 60-637 Poznań, Wydz. Nauk o Żywności i Żywieniu, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, ul. Wojska Polskiego 31, 61-624 Poznań. Kontakt: dwiecki@up.poznan.pl

ryzującymi kropki kwantowe charakteryzują się stosunkowo wąskimi pasmami emisji fotoluminescencji, wysoką wydajnością kwantową, długim czasem życia fluorescencji oraz stabilnością i odpornością na fotowysbielanie [5].

Ze względu na niewielkie rozmiary cząstek stosunek powierzchni do objętości kropek kwantowych jest relatywnie wysoki. Wraz ze zmniejszaniem się rozmiarów kropek, coraz większa liczba atomów znajduje się na ich powierzchni. Oddziaływania pomiędzy atomami na powierzchni kropki kwantowej i otaczającymi je cząsteczkami w roztworach mogą w istotny sposób wpływać na fotoluminescencję. Właściwość ta jest podstawą wykorzystania kropek kwantowych w analityce [20]. W metodach analitycznych związanych z fotoluminescencją kropek kwantowych oddziaływania pomiędzy analitem i powierzchnią QD prowadzą do mierzalnej zmiany natężenia FL. Defekty na powierzchni kropek kwantowych zmniejszają natężenie ich fotoluminescencji, natomiast przyłączenie analitu do powierzchni kropki może powodować pasywację powierzchni, co prowadzi do wzrostu natężenia emitowanego światła [20]. Niektóre substancje po przyłączeniu do powierzchni kropki kwantowej powodują wzrost liczby defektów, co prowadzi z kolei do spadku natężenia FL (depasywacji). Istnieją również metody wykorzystujące kombinacje efektu pasywacji i depasywacji [20]. Innymi zjawiskami wykorzystywanymi w analityce jest forsterowski transfer energii (ang. *fluorescence* (Forster) *resonance energy transfer* – FRET) oraz fotoindukowane przeniesienie elektronu (ang. *photoinduced electron transfer* – PET). W mechanizmie FRET kropki kwantowe pełnią rolę donora, który przekazuje energię wzbudzenia do akceptora (analitu), co prowadzi do zmniejszenia natężenia fotoluminescencji donora i jednoczesnego wzrostu natężenia FL analitu. W przypadku mechanizmu PET wzbudzone kropki kwantowe są donorem elektronów, przekazywanych cząsteczkom akceptora. Transfer ten prowadzi do wygaszania fotoluminescencji QD i do wzrostu natężenia FL akceptora (analitu) [20]. Metody polegające na mechanizmach pasywacji/depasywacji kropek kwantowych nie zawsze zapewniają odpowiednią selektywność opracowanych metod, dlatego często stosuje się modyfikacje kropek kwantowych, poprzez powlekanie ich powierzchni związkami zdolnymi do oddziaływania z analitem. Wykorzystuje się różne typy oddziaływań (receptor – ligand, antygen – przeciwciało, DNA – białko, cukier – pektyny, oddziaływania typu gospodarz – gość) [20]. Celem modyfikacji powierzchni (powlekania, funkcjonalizacji) może być nie tylko zwiększenie selektywności i specyficzności metody, ale również nadanie nanostrukturom zdolności do rozpraszania w roztworach wodnych, co jest niezbędne do przeprowadzenia oznaczeń substancji hydrofilowych. Drugą strategią pozwalającą na otrzymanie kropek kwantowych rozpuszczalnych w wodzie jest ich bezpośrednia synteza w roztworach wodnych.

Celem niniejszej pracy jest zapoznanie Czytelnika z wybranymi metodami analitycznymi, w których wykorzystano kropki kwantowe do oznaczania zarówno makro-

składników żywności, jak i substancji występujących w niej w ilościach śladowych, w tym szkodliwych zanieczyszczeń.

Oznaczanie sacharydów

Do składników żywności oznaczanych metodami wykorzystującymi QDs należy glukoza, której ilościowa analiza ma duże znaczenie zarówno w przemyśle spożywczym, jaki i w procesach biotechnologicznych, a także w badaniu płynów ustrojowych. Dotychczas opracowane metody oznaczania glukozy z zastosowaniem nanostruktur polegają na wykorzystaniu enzymów. Duong i Rhee [2] wykorzystali do ilościowego oznaczania glukozy wygaszanie fluorescencji kropek kwantowych CdSe/ZnS powleczonych kwasem merkaptopropionowym. Proces wygaszania polegał na transferze elektronów z QDs do enzymów (oksydazy glukozowej i peroksydazy chrzanowej), które katalizowały procesy utleniania/redukcji glukozy i produktów reakcji enzymatycznej. Oksydaza glukozowa katalizowała w tym procesie utlenianie glukozy do kwasu glukonowego i nadtlenu wodoru, natomiast nadtlenek wodoru był rozkładany do wody i tlenu cząsteczkowego w obecności peroksydazy chrzanowej. Kropki kwantowe były skoniugowane z enzymem poprzez grupę karboksylową kwasu merkaptopropionowego powlekającego nanostrukturę i grupę aminową enzymu. Ilościowe oznaczenie cukru następowało bezpośrednio po wprowadzeniu do roztworu glukozy kropek kwantowych skoniugowanych z enzymami. Według autorów metoda ta może służyć do wykrywania glukozy w zakresie stężenia $0 \div 5,0 \text{ g}\cdot\text{dm}^{-3}$ [2]. Metoda polegająca na wykorzystaniu oksydazy glukozowej i peroksydazy chrzanowej została również zaproponowana przez Yuan i wsp. [19]. W obecności oksydazy i peroksydazy glukoza była utleniana z wytworzeniem nadtlenu wodoru, który z kolei utleniał hydrochinon do benzochinonu. Powstały benzochinon powodował wygaszanie fotoluminescencji kropek kwantowych CdTe powleczonych kwasem merkaptobursztynowym. Przy ilościowym oznaczaniu glukozy w zakresie stężenia 10^{-6} M do 10^{-3} M osiągnięto limit detekcji równy 10^{-8} M . Nieco inne podejście przedstawili Huang i wsp. [10]. Oksydaza glukozowa została użyta jako katalizator reakcji utleniania glukozy z wytworzeniem nadtlenu wodoru i glukonolaktonu, który z kolei był hydrolizowany do kwasu D-glukonowego, powodującego obniżenie pH środowiska. Natężenie fotoluminescencji kropek kwantowych CdSe/ZnS powleczonych kwasem merkaptobursztynowym zmniejsza się wraz ze wzrostem kwasowości środowiska, stąd nanostruktury zastosowano jako indykator zmian pH zaistniałych w wyniku wzrostu stężenia produktów utleniania glukozy o charakterze kwaśnym. Metoda zachowywała liniową zależność sygnału od stężenia analitu w zakresie stężenia glukozy $0,2 \div 10 \text{ mM}$ lub $2 \div 30 \text{ mM}$. Na tej podstawie opracowano szybki test do półilościowego oznaczania tego monosacharydu. Fluorescencja kropek kwantowych wzbudzanych promieniowaniem o długości fali 365 nm zmieniała się od jasnopomarańczowej do żółtozielonej w zakresie stę-

żenia glukozy 0 ÷ 14 mM [10]. Kropki kwantowe powlekane białkami zostały również wykorzystane do detekcji maltozy [15].

Oznaczanie peptydów i białek

Nanocząstki powlekane grupami tiolowymi mogą być wykorzystane do oznaczania niektórych peptydów. W wyniku oddziaływania peptydu z powierzchnią kropki następuje wygaszenie emisji fluorescencji. Istnieje również możliwość analitycznego wykorzystania mechanizmów polegających na elektrostatycznym oddziaływaniu pomiędzy grupami karboksylowymi liganda i grupami aminowymi peptydu, a także pasywacji powierzchni kropek lub zahamowaniu przemian nieradiacyjnych. W wyniku tych procesów następuje wzrost natężenia emisji fluorescencji. Lizozym był oznaczany w obecności kropek powleczonych kwasem merkaptodekanowym z limitem detekcji równym $0,115 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. W tym przypadku obserwowano wygaszenie fluorescencji na skutek elektrostatycznego oddziaływania obdarzonych ujemnym ładunkiem powierzchniowym kropek kwantowych CdSe z białkiem [5].

Oznaczanie kwasu askorbinowego

Kropki kwantowe zastosowano również z powodzeniem do oznaczania kwasu askorbinowego. Zaobserwowano wygaszenie fluorescencji kropek kadmowo-tellurowych powleczonych kwasem merkaptopropionowym (MPA-CdTe-QDs) w obecności witaminy C. Zaproponowany mechanizm wygaszania polega na wpływie tlenu na fluorescencję MPA-CdTe-QDs. W roztworach wodnych tlen może powodować zwiększenie natężenia fluorescencji nanokryształów poprzez pasywację defektów powierzchni. Kwas askorbinowy jest dobrym antyoksydantem, dlatego reaguje z tlenem zaadsorbowanym na powierzchni kropek, powodując tym samym wygaszenie fluorescencji [14]. Opracowana metoda wykazywała liniowość w zakresie stężenia $12 \div 250 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, granica wykrywalności wynosiła $4 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$, a granica oznaczalności – $12 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$. Przy oznaczaniu kwasu askorbinowego zastosowano system przepływowy, uzyskując wydajność 68 oznaczeń na godzinę. Metodę zastosowano do oznaczania witaminy C w suplementach diety – kapsułkach goji, sokach owocowych oraz preparatach farmaceutycznych [14].

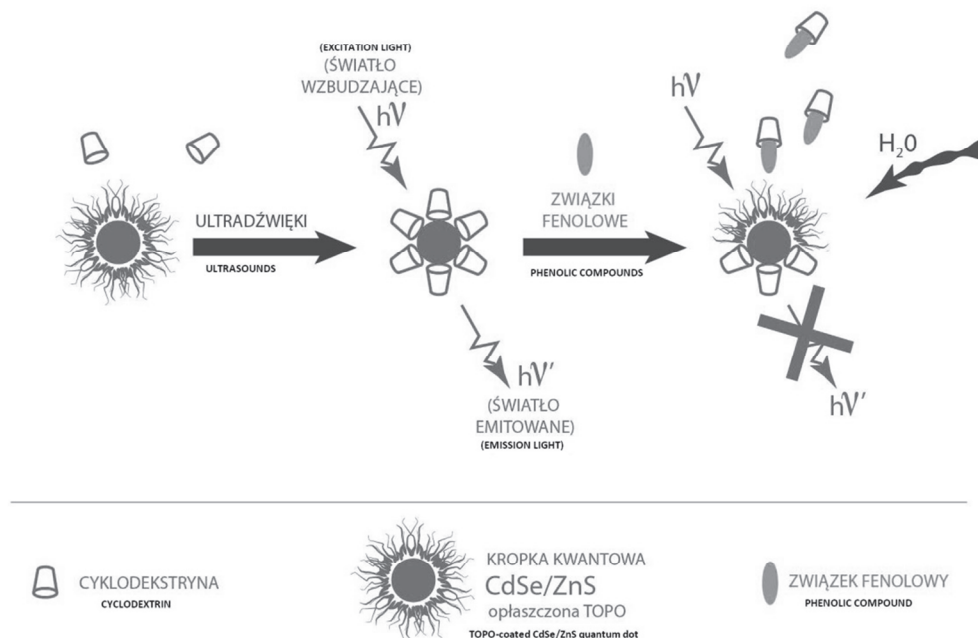
Oznaczanie związków fenolowych

Zaobserwowano, że akceptory elektronów i/lub dziur w półprzewodnikach zaadsorbowane na powierzchni kropek kwantowych powodują efektywne wygaszenie fluorescencji [16]. To zjawisko zostało wykorzystane do oznaczania prostych związków fenolowych (fenol, dopamina, hydrochinon) i benzochinonu. Związki fenolowe były utleniane do odpowiednich chinonów w obecności peroksydazy chrzanowej i H_2O_2 .

Chinony są akceptorami elektronów zdolnymi do wygaszania fotoluminescencji kadmowo-tellurowych kropek kwantowych. Przy użyciu tej metody osiągnięto stosunkowo niski limit detekcji związków fenolowych (10^{-7} mol·dm⁻³) [19]. Biosensor do oznaczania fenoli został zaproponowany przez Janga i wsp. [11]. W czasie indukowanego światłem sieciowania tyrozynaza i kropki kwantowe były pułapkowane w matrycy żelu glikolu polietylenowego. Pułapkowana tyrozynaza katalizowała utlenianie fenoli do chinonów (akceptorów elektronów), które z kolei wygaszały fluorescencję zamkniętych w matrycy kropek kwantowych [11]. Tian i wsp. [17] zaproponowali czułą i specyficzną metodę oznaczania naturalnego roślinnego polifenolu – apigeniny. Zastosowano wygaszanie fluorescencji kropek CdSe/CdS w obecności flawonoidu. Apigenina była oznaczana w próbach modelowych z limitem detekcji równym $0,13 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ [17]. Związki fenolowe były też oznaczane przy wykorzystaniu elektrochemiluminescencji kropek kwantowych. Obecny w oleju bawełnianym i śrucie poekstrakcyjnej polifenol roślinny – gossypol jest zdolny do wygaszania elektrochemiluminescencji kropek kadmowo-tellurowych. Gossypol był oznaczany tą metodą z granicą oznaczalności równą $5\cdot 10^{-9}$ M [9].

Wykorzystanie kompleksów inkluzyjnych typu gospodarz – gość

Do oznaczania prostych związków fenolowych w wodzie zastosowano zjawisko powstawania kompleksów inkluzyjnych typu gospodarz – gość. Przykładem tego typu struktur są kompleksy β -cyklodekstryny ze związkami występującymi w żywności (galusan propylu, kwas chlorogenowy, kwas kawowy, kwas linolowy) [6, 7, 8]. W omawianej metodzie wykorzystano kropki kwantowe CdSe/ZnS powleczone β -cyklodekstryną oddziałującą z przyłączonymi do powierzchni nanostruktury hydrofobowymi łańcuchami tlenu trioktylfosfiny (TOPO). Po dodaniu do roztworu kropek próby zawierającej oznaczane związki fenolowe (p-nitrofenol, 1-naftol) powstają kompleksy fenoli z cyklodekstrynami (kompleks inkluzyjny typu gospodarz – gość), co powoduje jednocześnie destabilizację kompleksów cyklodekstryny z TOPO. Kropki kwantowe pozbawione w ten sposób otaczającej je warstwy cyklodekstryn są narażone na bezpośrednie działanie wody, co prowadzi do wygaszania ich fluorescencji (rys. 1). Na podstawie zmiany natężenia fluorescencji oznaczono w ten sposób p-nitrofenol i naftol w ściekach zawierających te związki [13]. Wykorzystanie kompleksów inkluzyjnych pozwala zwiększyć selektywność metody. Podobna strategia została zastosowana w oznaczaniu aminokwasów. Dzięki chiralnej naturze β -cyklodekstryn skonstruowano sensor nanostrukturalny, umożliwiający odróżnienie izomerów optycznych D- i L-feniloalaniny i tyrozyny [4].



Rys. 1. Mechanizm oznaczania związków fenolowych przy zastosowaniu kropek kwantowych CdSe/ZnS powleczonych β -cyklodekstryną. Kropki kwantowe CdSe/ZnS są powlekanie cyklodekstrynami pod wpływem ultradźwięków, w wyniku czego są zdolne do emisji fluorescencji ($h\nu'$) w środowisku wodnym. Związki fenolowe obecne w próbie tworzą kompleksy z cyklodekstrynami otulającymi kropki, co powoduje usunięcie części cyklodekstryn z powierzchni nanostruktury i wygaszanie fluorescencji pod wpływem wody.

Fig. 1. Mechanism of determining phenolic compounds using CdSe/ZnS quantum dots coated with β -cyclodextrin. The CdSe/ZnS quantum dots are coated with cyclodextrins using ultrasounds; thus, they are capable of emitting fluorescence ($h\nu'$) in aqueous medium. Phenolic compounds present in the sample form complexes with cyclodextrins wrapped around the quantum dots. As a result, cyclodextrins are partially removed from the surface of nanostructure and fluorescence is quenched by water.

Źródło: / Source: opracowanie własne na podstawie: [13] / the authors' own study based on [13].

Oznaczanie zanieczyszczeń żywności i substancji niepożądanych

Oprócz oznaczania prostych związków fenolowych w wodzie kropki kwantowe mogą być wykorzystywane do oznaczania innych zanieczyszczeń i substancji niepożądanych w żywności. Kropki CdSe/ZnS zostały zastosowane do fluorymetrycznego oznaczania pozostałości herbicydu dikwat w ziarniakach zbóż. W metodzie tej kropki kwantowe używane są jako czynnik redukujący (donor elektronów). Pierwszym etapem oznaczenia jest wspomagana ultradźwiękami ekstrakcja pozostałości herbicydu

z ziarniaków za pomocą acetonitrylu, następnie herbicyd obecny w próbce jest redukowany w reakcji z kropkami kwantowymi. Powstały zredukowany produkt wykazuje natywną fluorescencję przy długości fali emisji $\lambda = 666$ nm, która jest liniowo zależna od stężenia herbicydu w zakresie $0,01 \div 0,5$ $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. Dzięki unieruchomieniu kropek na filtrze strzykawkowym uzyskano możliwość szybkiej redukcji herbicydu i wielokrotnego użycia tego samego złoza o właściwościach redukujących. Granica oznaczalności herbicydu dikwat w ziarnie owsa z wykorzystaniem wyżej opisanej metody wynosiła $0,01$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Maksymalna pozostałość pestycydów w ziarniakach owsa według regulacji Unii Europejskiej wynosi 2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (EC nr 149/2008) [1].

Kropki kwantowe kadmowo-tellurowe oraz nanocząstki złota zostały użyte do oznaczania melaminy w mleku. Ze względu na wysoką zawartość azotu melamina jest substancją nielegalnie dodawaną do mleka w celu zawyżenia zawartości białka oznaczanego metodą Kjeldahla. W opisywanej metodzie zastosowano znane w spektroskopii zjawisko filtra wewnętrznego. Fluorescencja kropek kwantowych CdTe w obecności nanocząstek złota (AuNPs) jest bardzo słaba, ze względu na silną absorpcję światła przez AuNPs. Melamina obecna w próbce wiąże się z powierzchnią nanocząstek złota przez grupy aminowe, co powoduje szybką agregację AuNPs. Agregacja przyczynia się z kolei do obniżenia absorpcji światła przez złoto, dzięki czemu efekt filtra wewnętrznego nie występuje i obserwowana jest silna fluorescencja CdTe przy długości fali $\lambda = 553$ nm. Dzięki zastosowaniu opisanej metody oznaczono melaminę w próbkach mleka z limitem detekcji równym $0,02$ $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, co jest wartością znacznie niższą od uznawanego za bezpieczne dla zdrowia stężenia melaminy w mleku ($2,5$ $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ w USA i Wielkiej Brytanii oraz 1 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ w odżywkach dla dzieci w Chinach) [21]. Kropki kwantowe CdSe/ZnS powlekane amfifilowym polimerem zbudowanym na bezwodniku maleinowym znakowane przeciwciałami zostały wykorzystane do oznaczania aflatoksyny B1 [3]. Nanostruktury powlekane przeciwciałami są z powodzeniem stosowane w immunochemicznych metodach oznaczania pozostałości leków weterynaryjnych w surowcach pochodzenia zwierzęcego. Przy zastosowaniu tej techniki oznaczono między innymi pozostałości sulfmetazyliny w mleku, thiamphenicolu w jajach i cephalexinu w wołowinie i mleku [12].

Podsumowanie

Zastosowanie kropek kwantowych w analityce żywności pozwala na opracowanie nowych, czułych, selektywnych i szybkich metod analitycznych. Możliwość rejestracji luminescencji kropek za pomocą fluorymetrów oraz postęp w ich syntezie sprawiają, że metody wykorzystujące nanostruktury stają się proste, tanie i ogólnodostępne. Techniki te nie wymagają też zastosowania skomplikowanej aparatury, istnieje natomiast możliwość opracowywania szybkich rutynowych testów wykorzystywanych poza laboratorium. Zastosowanie różnych ligandów do powlekania kropek kwanto-

wych pozwala na osiągnięcie wysokiej selektywności, charakterystycznej dla metod chromatograficznych. Mimo dużego postępu w dziedzinie analitycznego zastosowania kropek kwantowych, przed badaczami jest jednak wiele trudnych problemów do rozwiązania, takich jak: możliwość syntezy nietoksycznych kropek kwantowych o wysokiej wydajności kwantowej fluorescencji, zjawisko migotania czy niespecyficzna reakcja na analit.

Praca naukowa współfinansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki w ramach grantu NCN 2011/01/B/NZ9/02976.

Literatura

- [1] Carrillo-Carrión C., Simonet B.M., Valcárcel M.: Rapid fluorescence determination of diquat herbicide in food grains using quantum dots as new reducing agent. *Anal. Chim. Acta.*, 2011, **692** (1-2), 103-108.
- [2] Duong H.D., Rhee J.I.: Use of CdSe/ZnS core-shell quantum dots as energy transfer donors in sensing glucose. *Talanta*, 2007, **73** (5), 899-905.
- [3] Fernández-Argüelles M.T., Costa-Fernández J.M., Pereiro R., Sanz-Medel A.: Simple bioconjugation of polymer-coated quantum dots with antibodies for fluorescence-based immunoassays. *Analyst*, 2008, **133**, 444-447.
- [4] Freeman R., FINDER T., Bahshi L., Willner I.: β -cyclodextrin-modified CdSe/ZnS quantum dots for sensing and chiroselective analysis. *Nano Lett.*, 2009, **9** (5), 2073-2076.
- [5] Galian R.E., de la Guardia M.: The use of quantum dots in organic chemistry. *Trends Anal. Chem.*, 2009, **28** (3), 279-291.
- [6] Górnaś P., Dwiecki K., Nogala-Kałucka M., Polewski K.: Propyl gallate-beta-cyclodextrin complexes. spectroscopic and thermodynamic studies. *Acta Agroph.*, 2006, **7** (1), 73- 80.
- [7] Górnaś P., Neunert G., Baczyński K., Polewski K.: Beta-cyclodextrin complexes with chlorogenic and caffeic acids from coffee brew: Spectroscopic, thermodynamic and molecular modelling study. *Food Chem.*, 2009, **114**, 190-196.
- [8] Górska A., Ostrowska-Ligęza E., Wirkowska M., Bryś J.: Stabilność termiczna kompleksów inkluzyjnych kwasu linolowego z β -cyklodekstryną. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 2011, **2** (75), 115-123.
- [9] Hua L., Zhou J., Han H.: Direct electrochemiluminescence of CdTe quantum dots based on room temperature ionic liquid film and high sensitivity sensing of gossypol. *Electrochim. Acta*, 2010, **55** (3), 1265-1271.
- [10] Huang C.P., Liu S.W., Chen T.M., Li Y.K.: A new approach for quantitative determination of glucose by using CdSe/ZnS quantum dots. *Sensor. Actuat. B-Chem.*, 2008, **130** (1), 338-342.
- [11] Jang E., Son K.J., Kim B., Koh W.G.: Phenol biosensor based on hydrogel micro-arrays entrapping tyrosinase and quantum dots. *Analyst*, 2010, **135**, 2871-2878.
- [12] Kuang H., Zhao Y., Ma W., Xu L., Wang L., Xu C.: Recent developments in analytical applications of quantum dots. *Trends Anal. Chem.*, 2011, **30** (10), 1620-1636.
- [13] Li H., Han C.: Sonochemical synthesis of cyclodextrin-coated quantum dots for optical detection of pollutant phenols in water. *Chem. Mater.*, 2008, **20** (19), 6053-6059.
- [14] Llorent-Martínez E.J., Molina-García L., Kwiatkowski R., Ruiz-Medina A.: Application of quantum dots in clinical and alimentary fields using multicommutated flow injection analysis. *Talanta*, 2013, **109**, 203-208.

- [15] Medintz I.L., Clapp A.R., Mattoussi H., Goldman E.R., Fisher B., Mauro J.M.: Self-assembled nanoscale biosensors based on quantum dot FRET donors. *Nat. Mater.*, 2003, **2**, 630-638.
- [16] Suchetti C.A., Lema R.H., Hamity M.: Effect of benzene derivatives bearing electron-releasing and/or electron-withdrawing groups on the fluorescence of CdS-Q clusters. *J. Photochem. Photobiol. A*, 2005, **169** (1), 1-8.
- [17] Tian J.N., Wei S.Z., Zhao Y.C., Zhao S.L.: Studies on fluorescence quenching method for determination of apigenin with CdSe/CdS quantum dots. *Chin. J. Anal. Lab.*, 2008, **10**, 19-22.
- [18] Yuan J., Guo W., Wang E.: Quantum dots-bi-enzyme hybrid system for the sensitive determination of glucose. *Biosens. Bioelectron.*, 2008, **23** (10), 1567-1571.
- [19] Yuan J., Guo W., Wang, E.: Utilizing a CdTe quantum dots-enzyme hybrid system for the determination of both phenolic compounds and hydrogen peroxide. *Anal. Chem.*, 2008, **80**(4), 1141-1145.
- [20] Zhang F., Ali Z., Amin F., Riedinger A., Parak W.J.: *In vitro* and intracellular sensing by using the photoluminescence of quantum dots. *Anal. Bioanal. Chem.*, 2010, **397** (3), 935-942.
- [21] Zhang M., Cao X., Li H., Guan F., Guo J., Shen F., Luo Y., Sun C., Zhang L.: Sensitive fluorescent detection of melamine in raw milk based on the inner filter effect of Au nanoparticles on the fluorescence of CdTe quantum dots. *Food Chem.*, 2012, **135** (3), 1894-1900.

APPLYING QUANTUM DOTS TO DETERMINE FOOD COMPONENTS AND CONTAMINANTS

S u m m a r y

Quantum dots (QD) are semiconductor nanostructures of a diameter between 1 and 100 nm, capable of photoluminescence. In solutions, interactions occurring between the atoms on the surface of a quantum dot and the neighbouring molecules can significantly affect the photoluminescence of QD. Owing to this characteristic, quantum dots are utilized in analytical methods. Modified quantum dots are often used; their modification consists in coating their surface using molecules capable of interacting with an analyte. The use of quantum dots makes it possible to develop novel, sensitive, selective, and quick analytical methods. In the paper, some methods are described, which are used to determine saccharides, peptides, proteins, ascorbic acid, phenolic compounds, food contaminants, and undesirable substances. Furthermore, some mechanisms are depicted of the interaction between quantum dots and an analyte.

Key words: quantum dots, food analysis, food components, food contaminants 