

DOZYMETRIA 1D I 2D PROMIENIOWANIA WYSOKOENERGETYCZNEGO - PRZEGLĄD PRAC ZESPOŁU DOSLAB

Elżbieta Sęsiadek

*Katedra Inżynierii Mechanicznej, Informatyki Technicznej i Chemii Materiałów
Polimerowych
Politechnika Łódzka*

DOI 10.34658/9788366741805.6

1. Wstęp

Szkodliwy wpływ promieniowania UV na środowisko, ekosystem [1, 2] i zdrowie człowieka [3, 4] opisany jest w wielu źródłach literaturowych. Z uwagi na powyższe, monitorowanie promieniowania UV jest bardzo istotne [5]. Większość znanych dozymetrów do pomiarów promieniowania UV wykorzystuje w swojej strukturze bakterie, DNA grzybów, materiały nieorganiczne [6, 7] lub ciekłe kryształy [8, 9], które są używane do określania erytemy oraz do porównywania ze spektrum odpowiedzi erytemalnej [10, 11]. Ze względu na dynamiczny rozwój technik radiacyjnych, np. wykorzystujących promieniowanie jonizujące w medycynie zarówno w diagnostyce jak i planów leczenia nowotworów, poszukuje się nowych detektorów promieniowania. W przypadku zaawansowanych technik radio-terapeutycznych wykorzystujących modulowane wiązki promieniowania, konwencjonalne dozymetry mogą być nie efektywne [12]. Tym samym, uważa się, że pomiar rozkładu dawki promieniowania powinien być wykonany przy użyciu różnych detektorów [13]. W dozymetrii 1D najczęściej stosuje się dozymetry wytwarzane na bazie alaniny lub materiałów termoluminescencyjnych. W przypadku dozymetrii 2D i 3D stosuje się dozymetry wytwarzane na bazie związków czułych na promieniowanie, których nośnikiem jest matryca polimerowa.

2. Systemy dozymetryczne

Dozymetria promieniowania wysokoenergetycznego to dziedzina fizyki i metrologii zajmująca się pomiarem, obliczeniami i analizą podstawowych wielkości związanych z przekazem energii promieniowania (UV i jonizującego) do materii oraz zmienności ich wartości w czasie i przestrzeni. Dozymetry są stosowane jako część systemu kontroli procesów stosowanych w aplikacjach przemysłowych i medycznych. Gwarantują prawidłowe stosowanie procesów radiacyjnych, pozwalają na wykluczenie niewiadomych związanych z systemem pomiarowym danego źródła promieniowania, błędami wskazań instrumentów, błędami kalibracji urządzenia, itp.

Są używane także do sporządzenia dokumentacji dotyczących standardów pomiarów oraz dyrektyw dotyczących ochrony przed promieniowaniem wysokoenergetycznym.

W związku z tym, poszukuje się coraz bardziej zaawansowanych układów dozymetrycznych, pozwalających na dokładny pomiar promieniowania. Dozymetry dobierane są do danego systemu dozymetrycznego z uwzględnieniem: *i)* dawki, *ii)* mocy dawki, *iii)* zależności energii, *iv)* wpływu temperatury przed, w trakcie i po procesie napromieniania, *v)* wilgotności, *vi)* światła, *vii)* stabilności oraz *viii)* powtarzalności. Dobry dozymetr powinien charakteryzować się: *i)* dużą dokładnością i precyzją pomiaru, *ii)* liniowym zakresem pomiaru, *iii)* bezpośrednią zależnością od energii lub wielkości dawki, *iv)* rozkładem przestrzennym dawki, *v)* stabilnością fizycznego wymiaru i kształtu układu dozymetrycznego, *vi)* łatwością odczytu oraz *vii)* komfortem użytkowania. Układ dozymetryczny powinien pozwalać na pomiar dawek w możliwie szerokim zakresie, zapewniając łatwe oznaczenie analityczne produktów tworzonych w procesie radiacyjnym przy jednoczesnym zachowaniu dużej dokładności. Wraz z rozszerzaniem się możliwości wykorzystywania technik radiacyjnych, wzrasta zapotrzebowanie na dozymetry do kontroli pola radiacyjnego.

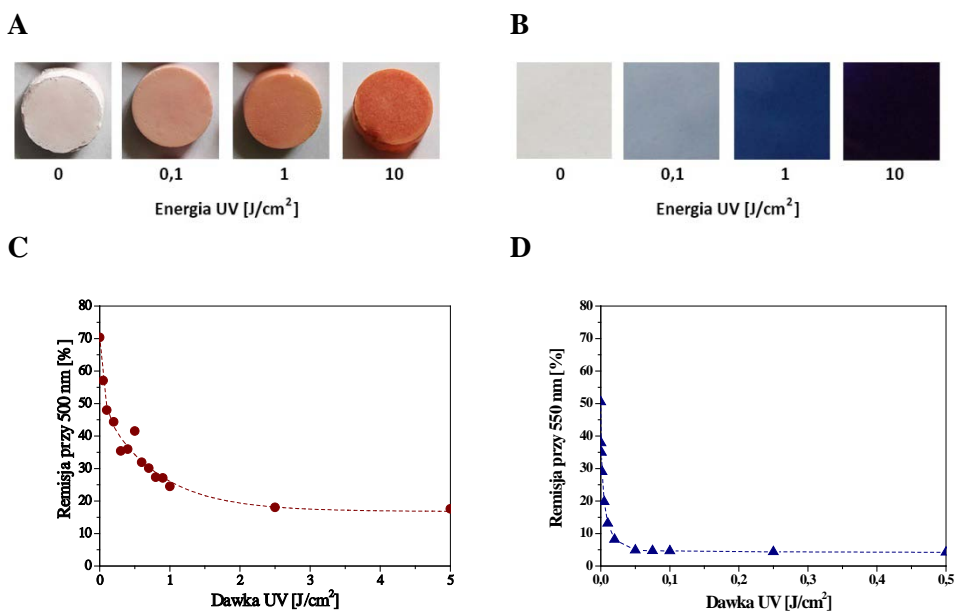
3. Dozymetria 1D i 2D – prace zespołu DosLab

Zespół DosLab działający w Katedrze Inżynierii Mechanicznej, Informatyki Technicznej i Chemii Materiałów Polimerowych Politechniki Łódzkiej zajmuje się badaniami chemicznymi m.in. w tematyce dozymetrii 1D, 2D i 3D promieniowania ultrafioletowego (UV) i jonizującego od 2007 roku. Dotychczas opracowano rozwiązania dotyczące m.in. tabletek polimerowych 1D do pomiarów promieniowania UV, płaskich dozymetrów 2D do pomiarów promieniowania UV i jonizującego na bazie folii [14] i wyrobów włókienniczych wraz z ich systemem odczytu [15-17] oraz barwnikowych i polimerowych dozymetrów 3D do zastosowania w radioterapii [18-21]. Wyniki prac zostały opublikowane w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym. W ostatnim czasie opracowano także włókna poliakrylonitrylowe domieszkowane polidiacetylenem (SMART-FIBRE), które zostały nagrodzone złotym medalem na Międzynarodowej Wystawie PRO INVENT 2019 [22]. Poniżej zaprezentowano wybrane wyniki prac własnych związanych z dozymetrią 1D i 2D.

Przy projektowaniu dozymetrów 1D i 2D należy uwzględnić kilka założeń, które są niezależnie od struktury dozymetru, m.in.: *i)* uzyskanie proporcjonalnej odpowiedzi w funkcji zaabsorbowanej dawki promieniowania jonizującego i ultrafioletowego w szerokim zakresie, *ii)* powtarzalność układu, *iii)* łatwość przygotowania układu dozymetrycznego, *iv)* stabilność układu przed i po procesie napromieniania, *v)* trwałość oraz *vi)* prosty sposób użycia. Opracowane układy zawierają w swojej strukturze lub na powierzchni związku czułe na promieniowania, które w wyniku ekspozycji na promieniowanie UV i/lub jonizujące zmieniają swoją

barwę z bezbarwnej na czerwoną, niebieską, fioletową w zależności od użytych prekursorów barwy, a intensywność tych zmian jest proporcjonalna do zaabsorbowanej dawki promieniowania. Niezależnie od budowy i struktury dozymetrów zmiany barwy były rejestrowane za pomocą spektrofotometru odbiciowego lub poprzez skanowanie próbek. Na podstawie uzyskanych danych, wyznaczono parametry kalibracyjne poszczególnych wariantów dozymetrów: *i)* zakres pomiarowy, *ii)* zakres liniowej odpowiedzi na dawkę, *iii)* dawkę progową oraz *iv)* czułość układu. Z uwagi na szeroki zakres badań prowadzonych w zespole DosLab, niniejszy przegląd dotyczy wyłącznie dozymetrów do pomiarów dawek promieniowania UV.

Dozymetry 1D w formie tabletek polimerowych lub folii wykonanej z polialkoholu winylowego (PVA) domieszkowanych związkami czułymi na promieniowanie wysokoenergetyczne w wyniku napromienienia zmieniają swoją barwę z bezbarwnej na czerwoną lub niebieską (Rys. 1A i B) w zależności od użytych prekursorów barwy.



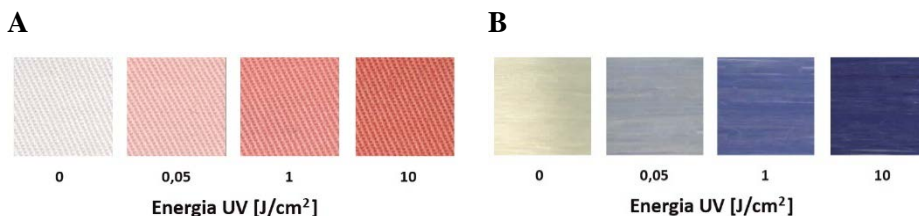
Rys. 1. Zmiana barwy oraz zależność zmiany remisji światła w funkcji zaabsorbowanej energii dla próbek tabletek polimerowych (A i C) oraz modyfikowanej folii PVA (B i D) po ekspozycji na promieniowanie UV.

Źródło: opracowanie własne.

Na Rysunku 1 przedstawiono także przykładowe charakterystyki remisji światła dla tabletek polimerowych modyfikowanych chlorkiem trifenylotetrazoliny (Rys. 1C) oraz próbek folii PVA modyfikowanej diacetylenem (Rys. 1D) w wyniku ekspozycji na promieniowanie UVC. Po napromienieniu dozymetrów zmiany barwy

rejestrowano za pomocą spektrofotometru odbiciowego w systemie barwnym CIELAB (pomiar remisji, współczynnik K/S, współrzędne barwy).

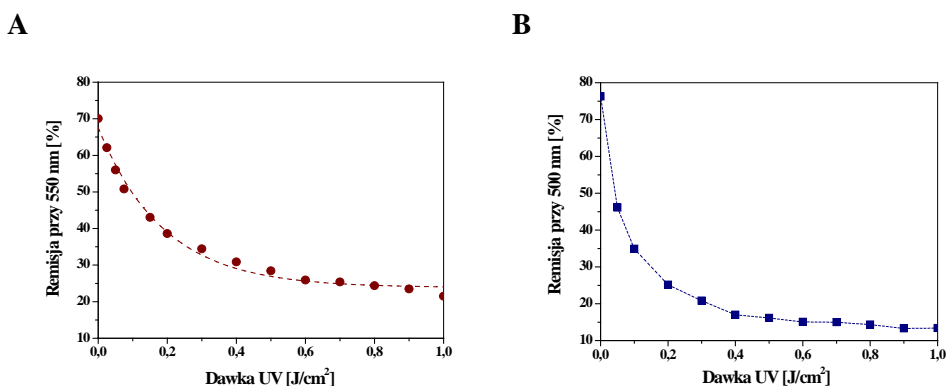
Dozymetry tekstylne 2D w formie wyrobów włókienniczych modyfikowanych powierzchniowo poprzez napawanie lub drukowanie oraz włókien domieszkowanych związkami czułymi na promieniowanie wysokoenergetyczne w wyniku napromienienia zmieniają swoją barwę z bezbarwnej na czerwoną, niebieską lub fioletową w zależności od użytych prekursorów barwy (Rys. 2).



Rys. 2. Zmiana barwy tkanin drukowanych pastą z chlorkiem trifenylotetrazoliny (A) oraz włókien modyfikowanych polidiacetylenem (B) po napromienieniu UV w zakresie 0-10 J/cm².

Źródło: opracowanie własne.

Poniżej przedstawiono przykładowe charakterystyki dla próbek modyfikowanych powierzchniowo roztworem nitro błękitu tetrazoliny (Rys. 3A) oraz włókien poliakrylonitrylowych domieszkowanych polidiacetylenem (Rys. 3B).



Rys. 3. Zależność zmiany remisji światła w funkcji zaabsorbowanej dawki promieniowania UV (0-1 J/cm²) dla próbek tkanin modyfikowanych roztworem nitro błękitu tetrazoliny (A) oraz włókien PAN domieszkowanych polidiacetylenem (B).

Źródło: opracowanie własne.

W Tabeli 1 zestawiono przykładowe parametry uzyskane dla próbek tkanin modyfikowanych powierzchniowo roztworem nitro błękitu tetrazoliny (NBT).

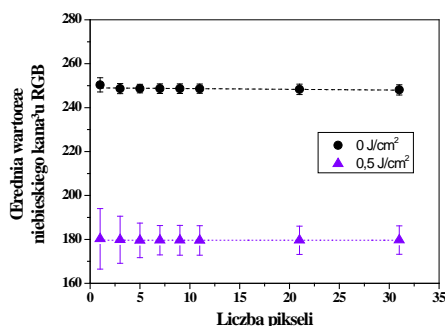
Tabela 1. Charakterystyka kalibracyjna próbek tkaniny modyfikowanej NBT po napromienieniu UV (R_0 [%] – wartość emisji światła nienapromienionej próbki, A – czułość na dawkę)

Zawartość NBT [g/dm ³]	R_0 [%]*	Zakres pomiarowy [mJ]	Zakres pseudo-prostoliniowy [mJ]	A [% cm ² /mJ]	R^2
0,1	72,48	0 – 200	0 – 140	-0,030±0,003	0,959
10,0	70,06	0 – 600	0 – 75	-0,255±0,018	0,985
20,0	66,85	0 – 600	0 – 50	-0,439±0,078	0,939

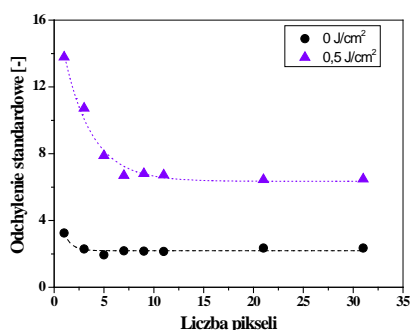
Źródło: opracowanie własne.

Po napromienieniu dozymetrów zmiany barwy rejestrowano za pomocą spektrofotometru odbiciowego w systemie barwnym CIELAB (pomiar emisji, współczynnik K/S, współrzędne barwy) a także przy użyciu skanera fotograficznego w połączeniu z prostym algorytmem do analizy kanałów przestrzeni RGB (Rys. 4), co stanowi również efektywną metodę analizy dwuwymiarowego rozkładu dawki promieniowania.

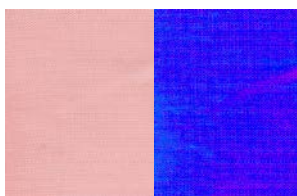
A



B



C



Rys. 4. Przykład analizy dozymetru po zeskanowaniu: A – wartość średnia wyliczona dla różnej liczby pikseli; B – zmiana odchylenia standardowego w zależności od liczby pikseli użytej do wyliczenia wartości średniej profilu; C – widok napromienionej (UVC, 500 mJ/cm²) próbki: po lewej – widziana gołym okiem; po prawej – obraz po zastosowaniu algorytmu do wizualizacji niedoskonałości rozłożenia barwy na powierzchni próbki.

Źródło: opracowanie własne.

4. Podsumowanie

Dotychczas opublikowane wyniki potwierdziły, iż zaproponowane przez nas dozymetry można stosować do pomiarów rozkładów dawki promieniowania UV oraz jonizującego. Modyfikacja struktury polimerów oraz powierzchni tekstylnych próbek jest prostym sposobem wytwarzania dozymetrów, gwarantujących równomierne rozłożenie związków aktywnych i uzyskanie gładkiej powierzchni. Zastosowanie różnych związków czułych na promieniowanie daje możliwość uzyskania szerokiej palety barw możliwość tworzenia efektów wzorniczych. Dozymetry 2D w postaci wyrobów włókienniczych mogą znaleźć zastosowanie jako: elementy o charakterze dekoracyjnym, dozymetry będące elementami odzieży ochronnej, akcesoria dołączane do kosmetyków chroniących przed promieniowaniem UV lub znaczniki oryginalności produktów. Opracowane rozwiązania zostały opublikowane w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym. Więcej szczegółów na temat publikacji i patentów związanych z tematykami badawczymi zespołu DosLab można znaleźć na stronie: <http://mkozicki-sci.eu/>

5. Literatura

- [1] **Bérces A., Fekete A., Gáspár S., Gróf P., Rettberg P., Horneck G., Rontó Gy.,** *Biological UV dosimeters in the assessment of the biological hazard from environmental radiation*, J. Photochem. Photobiol. B: Biol. 1999, vol. 53, ss. 36-43.
- [2] **Horneck G.,** *Quantification of biologically effective environmental UV irradiance*, Adv. Space Res. 2000, vol. 26, ss. 1983-1994.
- [3] **Taylor H.R.,** *The biological effects of UV-B on the eye*, Photochem. Photobiol. 1989, vol. 50, ss. 489-492.
- [4] **Urbach F.,** *Potential effects of altered solar ultraviolet radiation on human skin cancer*. Photochem, Photobiol. 1989, vol. 50, ss. 507-513.
- [5] **Rettberg P., Horneck G.,** *Biologically weighted measurement of UV radiation in space and on earth with the biofilm technique*, Adv. Space Res. 2000, vol. 26, ss. 2005-2014.
- [6] **Smith J. Gerald.** Ultraviolet radiation actinometer. United States Patent. 4763011. Opubl. 09.08.1988.
- [7] **Beaubien J. David, Beaubien F. Arthur.** Reference grade solar ultraviolet band pyranometer. United States Patent. 5331168. Opubl. 10.07.1994.
- [8] **Chanishvili A., Chilaya G., Petriashvili G., Barberi R., Bartolino R., De Santo M.P.,** *Cholesteric liquid crystal mixtures sensitive to different ranges of solar UV irradiation*, Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2005, vol. 434, ss. 353-366.

- [9] **Petriashvili G., Chanishvili A., Chilaya G., Matranga M.A., De Santo M.P., Barberi, R.,** *Novel UV sensor based on a liquid crystalline mixture containing a photoluminescent dye*, Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2009, vol. 500, ss. 82-90.
- [10] **McKinley A.F., Diffey, B.L.,** *A reference spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin*, CIE J. 1987, nr 6, ss. 17-22.
- [11] **Suh K.-S., Roh H.-J., Choi S.-Y., Jeon Y.-S., Doh K.-S., Bae J.-H., Kim S.-T.,** *A long-term evaluation of erythema and pigmentation induced by ultraviolet radiations of different wavelengths*, Skin Res. Technol. 2007, vol. 13, ss. 360-368.
- [12] **Olding T., Holmes O., Schreiner, L.J.,** *Cone beam optical computed tomography for gel dosimetry I: scanner characterization*, Phys. Med. Biol. 2010, vol. 55, ss. 2819-2840.
- [13] **Pantelis E., Antypas C., Petrokokkinos L., Karaiskos P., Papagiannis P., Kozicki M., Georgiou E., Sakelliou L., Seimenis, I.,** *Dosimetric characterization of CyberKnife radiosurgical photon beams using polymer gels*, Med. Phys. 2008, vol. 35, pp. 2312-2320.
- [14] **Kozicki M., Szaśiadek E., Karbownik I., Maniukiewicz W.,** *Doped polyacrylonitrile fibres as UV radiation sensors*, Sensor. Actuat. B - Chem. 2015, vol. 213, ss. 234-243.
- [15] **Kozicki M., Szaśiadek E., Kadlubowski S., Dudek M., Karbownik I.,** *Radiation sensitive polyacrylonitrile microfibres doped with PDA nanoparticles*, Radiat. Phys. Chem. 2020, vol. 169, nr 107751, <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.01.021>
- [16] **Kozicki M., Szaśiadek E.,** *Scanning of flat textile-based radiation dosimeters: Influence of parameters on the quality of results*, Radiat. Measur. 2013, vol. 58, ss. 87-93.
- [17] **Kozicki M., Szaśiadek E.,** *UV-assisted screen-printing of flat textiles*, Color. Technol. 2012, vol. 128, ss. 251-260.
- [18] **Kozicki M., Kwiatos K., Kadlubowski S., Dudek M.,** *TTC-Pluronic 3D radiochromic gel dosimetry of ionizing radiation*. Phys. Med. Biol. 2017, vol. 62, ss. 5668-5690.
- [19] **Kwiatos K., Maras P., Kadlubowski S., Stempień Z., Dudek M., Kozicki M.,** *Tetrazolium salts-Pluronic F-127 gels for 3D radiotherapy dosimetry*, Phys. Med. Biol. 2018, vol. 63, ss. 95012 – 95022.
- [20] **Kouvati K., Jaszczak M., Papagiannis P., Kadlubowski S., Wach R., Maras P., Dudek M., Kozicki M.,** *Leuco crystal violet-Pluronic F-127 3D radiochromic gel dosimeter*”. Phys. Med. Biol. 2019, vol. 64, ss. 175017 – 175031.

-
- [21] **Kozicki, M, Jaszczak, M, Kwiatos, K, Maras, P, Kadlubowski S., Wach R., Dudek M.**, *Three-dimensional radiochromic and polymer gel dosimeters with Pluronic F-127 matrix – a review of current research*, Journal of Physics: Conf. Series 2019, vol. 1305, no 012035.
- [22] **Stowarzyszenie Polskich Wynalazców i Racjonalizatorów**, *PRO INVENT - International Exhibition of Research, Innovations and Inventions*, online, <http://www.polskiewynalazki.pl/ex/2019/proinvent/wynalazki> [dostęp: 15.11.2022].