

## Półprzewodnikowe źródła promieniowania UV-C LED dla potrzeb wybranych procedur stosowanych w technologii żywności

**Streszczenie.** W artykule omówiono wybrane zagadnienia związane z projektem i praktyczną realizacją systemu bazującego na półprzewodnikowych źródłach promieniowania UV-C LED przeznaczonych do prowadzenia prac eksperymentalnych związanych z wprowadzaniem innowacyjnych procedur w obszarze technologii żywności, których celem jest uzyskanie produktów minimalnie przetworzonych. Opisano badania i procedury pozwalające na ocenę skuteczności dezynfekcji powierzchni mięsa rybiego.

**Abstract.** Abstract: Publication describes selected topics related to the project and practical implementation of the system based on the solid-state UV-C sources (UV-C LED) designated for the experiments in the area of food technology, especially for innovative procedures applicable for minimally processed products. Publication describes experiments and procedures suitable for measuring the effectiveness of methods of disinfection of the surface of fish fillet. (**Solid-state sources of the UV-C radiation suitable for selected procedures used in food processing**).

**Słowa kluczowe:** UV-C LED, Deep UV, promieniowanie UV-C, technologia żywności.

**Keywords:** UV-C LED, Deep UV, UV-C emission, food technology.

### Wstęp

Słońce to źródło pełnego spektrum światła, w tym fal radiowych, podczerwieni, światła widzialnego, ultrafioletu, promieni rentgenowskich, promieni gamma i promieni kosmicznych. Ze względu na następstwa działania promieniowania ultrafioletowego na organizmy żywe możemy wyróżnić promieniowanie UV (Ultra Violet):

- UV-C – o długość fali: 100 ÷ 280 nm
- UV-B – o długość fali: 280 ÷ 315 nm
- UV-A – o długość fali: 315 ÷ 380 nm

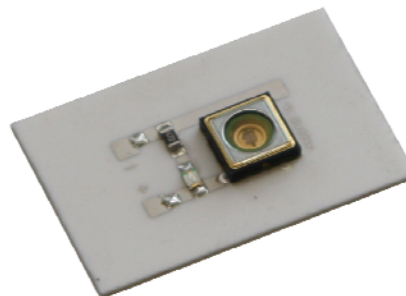
Obserwowany na przestrzeni zwłaszcza ostatnich lat rozwój technologii półprzewodnikowych źródeł promieniowania UV LED spowodował, że coraz bardziej celowym jest jej wykorzystanie do generacji promieniowania UV, w tym promieniowania UV-C będącego przedmiotem zainteresowania autorów artykułu. Promieniowanie UV-C ma działanie polegające za dezaktywacji bakterii, wirusów pleśni oraz grzybów, i może być stosowane w procedurach dezynfekcji i sterylizacji dla potrzeb technologii żywności, medycyny oraz poprawy jakości wody i powietrza. Wiele obecnie dostępnych komercyjnych systemów realizujących powyższe procedury jest realizowane w oparciu o źródła promieniowania bazujące na niskociśnieniowych lampach rtęciowych. W tabeli 1 zestawiono wybrane typy komercyjnych diod LED pracujących w paśmie promieniowania ultrafioletowego UV-C – o długości 278 nm będących ciekawą i proekologiczną alternatywą. Diody te są realizowane w oparciu o technologię AlGaN. Więcej informacji na ich temat można znaleźć w pozycji [1] do [5].

Tabela 1. Zestawienie wybranych typów komercyjnych diod LED pracujących w paśmie promieniowania ultrafioletowego – UV-C – 278 nm

Lp.	Symbol diody	Moc [mW]
1	LEUVA66H70HF00 [1]	70
2	NCSU334A [2]	38.4 ÷ 76.8
3	CL7001C3 [3]	3
4	CL7002C3 [3]	10
5	CL7003C2 [3]	30
6	CL7003C4 [3]	30
7	VLMU35CL00-280 [4]	3.2 ÷ 7.5
8	PB2G-UFLA-C [5]	2.5
9	PBSG-1FLA-C [5]	10

### Praktyczna realizacja systemu generacji promieniowania UV-C LED

Dla potrzeb realizacji projektu wybrano diody NCSU334A [2] o mocy wyjściowej około 50 mW (moc zasilania około 1,75 W). Każdą z diod zamontowano na specjalnie do tego celu zaprojektowanej płytce aluminiowej o wymiarach 20x30 mm. Płytki wyposażono dodatkowo w diody LED emitujące światło o barwie zielonej pozwalające na poprawę bezpieczeństwa i komfortu użytkownika lampy. Na rysunku 1 pokazano szczegóły tego projektu.



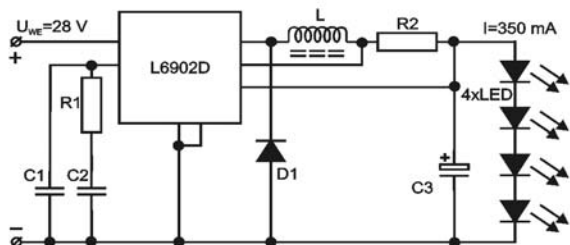
Rys.1. Sposób montażu diody UV-C LED i pomocniczej diody LED.

Dla potrzeb realizacji projektu cztery takie zespoły diodowe zamontowano w specjalizowanym profilu aluminiowym w sposób pozwalający na ich przemieszczanie wzdłuż jego osi jak to pokazano na rysunku 2.



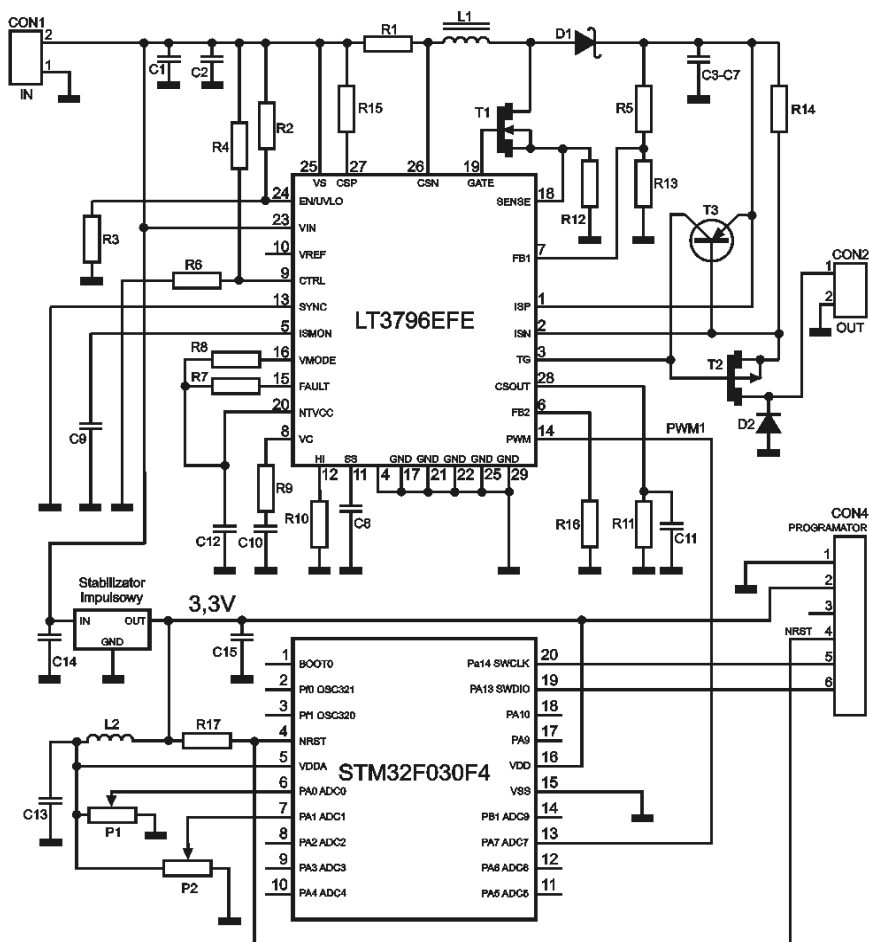
Rys.2. Praktyczna realizacja systemu promieniowania bazującego na diodach UV-C LED typu NCSU334A.

Dla potrzeb zasilania diod LED zaprojektowano i praktycznie zrealizowano dwa typy sterowników. Pierwszy to prosty sterownik nisko kosztowy zrealizowany w oparciu o schemat ideowy przedstawiony na rysunku 3. Zbudowano go w oparciu o specjalizowany układ scalony typu L6902D realizujący funkcję przetwornicy DC/DC typu step-down i źródła prądowego o maksymalnym prądzie wyjściowym 1 A; napięciu wyjściowym  $1,235 \pm 34$  V; napięciu wejściowym:  $8 \div 36$  V. Więcej informacji na ten temat zawarto w pozycji [6]. Do zasilania sterownika zastosowano komercyjny zasilacz impulsowy 28 V/ 0,5 A.



Rys.3. Schemat ideowy sterownika (Drivera LED) diod LED zbudowanego w oparciu o specjalizowany układ scalony typu L6902D.

Drugi sterownik zbudowano w oparciu o specjalizowany układ scalony typu LT3796 EFE oraz mikroprocesor jednokładowy typu STM32F030F4. Jego schemat ideowy przedstawiono na rysunku 4. Układ LT3796EFE to źródło prądowe (driver LED) o szerokim zakresie napięć wejściowych i wyjściowych wyposażone w funkcję sterowania PWM oraz przetwornicę step-up / step-down. Pozwala on na zasilanie łańcuchów diod LED o spadku napięcia do prawie 100 V, przy zasilaniu z zasilacza o dowolnym napięciu z zakresu  $8 \div 100$  V. Więcej informacji na ten temat zawarto w pozycji [7]. Funkcję sterowania zrealizowano w oparciu o mikroprocesor jednokładowy typu STM32F030F4. Pozwala ona na cykliczne sterowanie diod UV-C LED o regulowanym współczynniku wypełnienia i regulowanym czasie jego powtarzania. Regulacja odbywa się za pośrednictwem potencjometrów P1 oraz P2. Zaleca się tu stosowanie potencjometrów dziesięcioobrotowych z licznikiem. Ta wersja zasilania powstała na wyraźne życzenie przedstawicieli Uniwersytetu Rolniczego oraz z myślą o systemach wyposażonych w dużą liczbę diod UV-C LED.



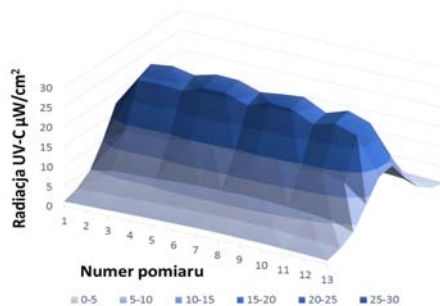
Rys.4. Schemat ideowy sterownika (drivera LED) diod LED zbudowanego w oparciu o specjalizowany układ scalony typu LT3796EFE oraz mikroprocesor jednokładowy typu STM32F030F4.

### Badanie rozsyłu strumienia promieniowania UV-C LED generowanego przez system

Do badań rozsyłu strumienia promieniowania UV-C LED generowanego przez system zastosowano wielofunkcyjny datalogger typu HD31, będący ręcznym, przenośnym

miernikiem z możliwością rejestracji i pomiaru temperatury, wilgotności, ciśnienia atmosferycznego, różnicy ciśnień, prędkości powietrza, natężenia oświetlenia i promieniowania oraz dwutlenku węgla. Miernik ten został wyposażony w sondę UV-C typu LP471 pozwalającą na

pomiar radiacji UV w zakresie 200 ÷ 280 nm (max @ 250 nm); 10n ÷ 200 mW/cm<sup>2</sup>. - odpowiednio x10 wynik w W/m<sup>2</sup>. Pomiaru były dokonywane w odległości 15 cm od czoła sytemu w rastrze 3 cm wzdłuż obu osi systemu. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 5.



Rys.5. Przykładowe wyniki badań rozsyłu strumienia promieniowania UV generowanego przez system w odległości 15 cm od jego czoła.

## Badania biologiczne

### Materiał badawczy

W celu potwierdzenia skuteczności prototypowego systemu promieniowania UV-C LED przeprowadzono eksperyment mający na celu ocenę jego przydatności do dezynfekcji produktów żywnościowych.

Materiałem badawczym były odskórowane filety z makreli Atlantycznej (*Comber scombrus*). Tusze makreli pozyskano w formie mrożonego bloku od lokalnego przedsiębiorstwa przetwórstwa ryb. Dla potrzeb eksperymentu poddano je rozmrożeniu i przechowywaniu w temperaturze 4 °C przez 72 h (analiza ogólnej liczby drobnoustrojów oraz liczby *Pseudomonas*) oraz 168 h (analiza drożdży i pleśni), po czym z tuszy pozyskano odskórowane filety. Próbkę poddano homogenizacji i przeznaczono do dwóch osobnych analiz.

### Ocena skuteczności dezynfekcji powierzchni mięsa rybiego

Każdą próbkę zhomogenizowanego mięsa podzielono na trzy części: próbkę kontrolną (K) która nie była poddana działaniu promieniowania UV-C, próbkę naświetlaną przy pomocy komercyjnego promiennika UV-C (S-UV) o mocy 30 W (TUV 30W/G30 T8, Phillips, Amsterdam, Holandia) oraz próbkę naświetlaną przy pomocy systemu UV-C LED wyposażonego w 4 diody LED UV-C typu NCSU334A (L-UV), o łącznej mocy 0,2 W. W celu przeprowadzenia napromieniowania UV-C, 10 g próbki ryby rozproszono równomiernie na szalce Petriego z tworzywa sztucznego o średnicy 90 mm. Próbkę bez wierzka umieszczono bezpośrednio pod źródłem promieniowania UV-C i napromieniowywano do momentu otrzymania przez próbkę łącznej dawki promieniowania równej  $5,2 \pm 0,1$  mJ/cm<sup>2</sup>. Pomiaru natężenia promieniowania dokonano używając wielofunkcyjnego urządzenia typu datalogger HD31 wyposażonego w sondę UV-C typu LP 471. Odległość próbek od źródła promieniowania oraz natężenie miejscowe wynosiły odpowiednio 50 cm i 130 μW/cm<sup>2</sup> dla S-UV oraz 17 cm i 30 μW/cm<sup>2</sup> dla L-UV.

Po napromieniowaniu próbki poddano analizom mikrobiologicznym zgodnie z normą ISO 6887:-1:2017. Próbkę o masie 10 g wymieszano z 90 ml płynu fizjologicznego z peptonem (Oxoid, Basingstoke, Wielka Brytania) i zhomogenizowano przez 3 min w urządzeniu Stomachera. Roztwory poddano odpowiednim rozcieńczeniom dziesiętnym i dokonano posiewu powierzchniowego na szalce Petriego z agarem PCA (Oxoid, Wielka Brytania) w celu oznaczenia ogólnej liczby

drobnoustrojów, z agarem DRBC (Biomaxima, Warszawa, Polska) w celu oznaczenia liczby drożdży i pleśni oraz agarem *Pseudomonas* Lab-Agar Base (Oxoid, Wielka Brytania) z dodatkiem suplementu CFC (Oxoid, Wielka Brytania) w celu oznaczenia ilości bakterii z rodzaju *Pseudomonas*. Szalki Petriego inkubowano odpowiednio w 30 °C przez 48 h w celu oznaczenia ogólnej liczby drobnoustrojów, w 25 °C przez 120 h w celu oznaczenia liczby drożdży i pleśni oraz w 25 °C przez 48 h w celu oznaczenia liczby bakterii z rodzaju *Pseudomonas*.

### Ocena skuteczności dezynfekcji posianych szalek Petriego

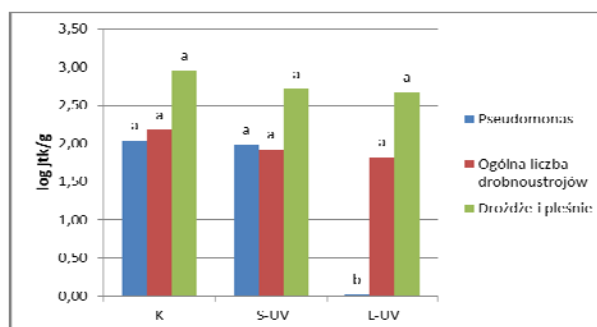
Próbkę nienapromieniowanego zhomogenizowanego mięsa makreli posiano na szalki Petriego zgodnie z tą samą procedurą, jaką opisano w rozdziale „Ocena skuteczności dezynfekcji powierzchni mięsa rybiego”. Po dokonaniu posiewu szalki podzielono na trzy grupy: kontrolną, niepoddaną napromieniowaniu (K), napromieniowywaną przy pomocy komercyjnego promiennika UV-C (S-UV) oraz napromieniowywaną przy pomocy prototypowego systemu wyposażonego w 4 diody LED UV-C (L-UV). Parametry napromieniowania oraz zastosowana procedura była identyczna z tą opisaną w rozdziale „Materiał badawczy”. Dezynfekcję stosowano do momentu otrzymania przez próbkę łącznej dawki promieniowania równej  $5,2 \pm 0,1$  mJ/cm<sup>2</sup>. Inkubację płytek po napromieniowaniu przeprowadzono zgodnie z procedurą opisaną w rozdziale „Materiał badawczy”.

### Analiza statystyczna

Wszystkie analizy zostały wykonane przy użyciu trzykrotnych niezależnych powtórzeń. Do każdej analizy wykorzystano 3 tusze makreli, z których każda została pobrana z innego mrożonego bloku makreli. Analizę statystyczną wykonano przy pomocy programu Statistica v 13,0 (StatSoft, Tulsa, USA). Normalność rozkładu uzyskanych wyników została sprawdzona testem Shapiro-Wilka, a w stosunku do wyników z nienormalnym rozkładem zastosowano transformację Boxa-Coxa. Jednorodność wariancji potwierdzono przy pomocy testu Levene'a. W celu określenia różnic pomiędzy grupami wykonano jednoczynnikową analizę wariancji z testem post-hoc Tukey'a. Wyniki uznawano za statystycznie istotne dla  $p < 0,05$ .

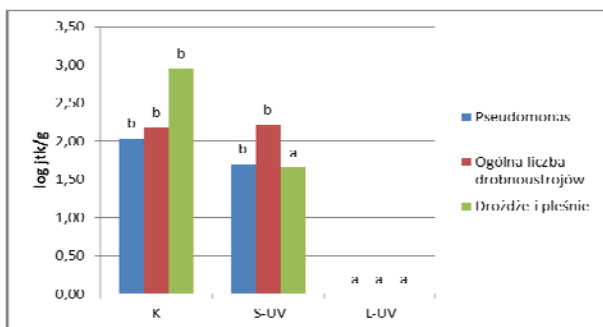
### Wyniki i dyskusja

Wyniki analiz skuteczności dezynfekcji zostały przedstawione na rysunku 6 i 7.



Rys.6. Inaktywacja drobnoustrojów podczas naświetlania mięsa makreli.

K - Kontrola, S-UV – napromieniowanie komercyjnym promiennikiem UV-C, L-UC – napromieniowanie systemem bazującym na diodach UV-CLED, a, b – wyniki dla poszczególnych serii oznaczone inną literą są statystycznie różne ( $p < 0,05$ ), wyniki przedstawione jako 0 oznaczają  $< 50$  jtk/g



Rys.7. Inaktywacja drobnoustrojów podczas naświetlania szalek Petriego.

K - Kontrola, S-UV – napromieniowanie komercyjnym promiennikiem UV-C, L-UV – napromieniowanie systemem bazującym na diodach UV-CLED, a,b – wyniki dla poszczególnych serii oznaczone inną literą są statystycznie różne ( $p < 0,05$ ), wyniki przedstawione jako 0 oznaczają  $< 50$  jtk/g

W przypadku napromieniowania bezpośrednio próbek mięsa ryby widoczny statystycznie istotny efekt można zaobserwować tylko dla liczebności bakterii *Pseudomonas* w przypadku próbek napromieniowanych przy pomocy systemu bazującego na diodach UV-C LED. Bardziej wyraźny efekt dezynfekcji można zaobserwować podczas napromieniowania szalek Petriego, gdzie dla wszystkich badanych mikroorganizmów stwierdzono redukcję drobnoustrojów o co najmniej 2 log jtk/g w przypadku zastosowania systemu bazującego na diodach UV-C LED. W przypadku zastosowania konwencjonalnego promiennika UV-C stwierdzono istotną redukcję jedynie w przypadku liczebności drożdży i pleśni.

W zależności od rodzaju, drobnoustroje wykazują różną odporność na promieniowanie UV-C. Dla przykładu inaktywacja *E. Coliczy Vibrio cholerae* 4 log jtk/g może nastąpić już w przypadku zastosowania fluencji 5 mJ/cm<sup>2</sup>, podczas gdy do inaktywacji takiej samej ilości *Enterocolitica faecium* konieczne jest zastosowanie dawki 17 mJ/cm<sup>2</sup>[8]. Zastosowana w badaniu dawka promieniowania była wystarczająca by zaobserwować efekt na próbkach posianych bezpośrednio na szalki Petriego, jednak mogła być zbyt niska by ten sam efekt zaobserwować podczas obróbki bezpośrednio mięsa ryby. Dla przykładu w badaniach wykonanych przez Bottino i in. [9] zastosowano dawkę 55,83 mJ/cm<sup>2</sup> w celu wydłużenia trwałości pakowanych próżniowo filetów paku czarnopłetwego, uzyskując 50 % wydłużenie trwałości w stosunku do grupy kontrolnej. Co więcej w początkowym stadium przechowywania nawet tak duże dawki nie wykazały istotnego efektu bakteriobójczego, lecz dopiero po 3 dniach przechowywania można było zauważyć różnice powyżej 2 log jtk/g w ilości bakterii psychrofilnych.

Zastosowanie systemu bazującego na diodach UV-C LED było bardziej efektywne w redukcji ilości bakterii niż zastosowanie konwencjonalnej świetlówki UV-C. Może to być związane z inną długością fali jaka jest emitowana przez oba źródła (odpowiednio 254 oraz 278 nm dla S-UV oraz L-UV), jako że różne długości fali mogą być bardziej lub mniej efektywne przy inaktywacji określonych rodzajów mikroorganizmów [10]. Efektywność dezynfekcji można byłoby dodatkowo zwiększyć stosując obróbkę pulsacyjnym światłem UV-C, które umożliwia osiągnięcie takiego

samego efektu antymikrobiologicznego przy zastosowaniu nawet do połowy łącznej dawki radiacji [11].

Wadą zastosowanego modelu badawczego było zbyt niskie zanieczyszczenie mikrobiologiczne użytego materiału badawczego, co uniemożliwiło dokładne określenie o ile log jtk/g nastąpiła redukcja w badanym materiale. Przyszłe badania powinny zostać wykonane w celu potwierdzenia skuteczności dezynfekcji przy pomocy L-UV na próbkach żywności o wyższym zanieczyszczeniu mikrobiologicznym oraz przy zastosowaniu różnych dawek promieniowania. Dodatkowo należy porównać wpływ naświetlania przez L-UV oraz S-UV na stopień oksydacji produktów spożywczych poddanych obróbce.

#### Podziękowania

Autorzy dziękują firmie PXM za udostępnienie wybranych elementów mechanicznych wykorzystanych przy praktycznej realizacji projektu.

**Autorzy:** dr inż. Wojciech Grzesiak, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Elektronowej oddział w Krakowie, ul. Zabłocie 39, 30-701 Kraków, E-mail: [wojciech.grzesiak@ite.lukasiewicz.gov.pl](mailto:wojciech.grzesiak@ite.lukasiewicz.gov.pl); dr inż. Piotr Guzdek, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Elektronowej oddział w Krakowie, ul. Zabłocie 39, 30-701 Kraków, E-mail: [piotr.guzdek@ite.lukasiewicz.gov.pl](mailto:piotr.guzdek@ite.lukasiewicz.gov.pl); dr Jan Kulawik, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Elektronowej oddział w Krakowie, ul. Zabłocie 39, 30-701 Kraków, E-mail: [jan.kulawik@ite.lukasiewicz.gov.pl](mailto:jan.kulawik@ite.lukasiewicz.gov.pl); mgr Piotr Maćków, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Elektronowej oddział w Krakowie, ul. Zabłocie 39, 30-701 Kraków, E-mail: [piotr.mackow@ite.lukasiewicz.gov.pl](mailto:piotr.mackow@ite.lukasiewicz.gov.pl); mgr inż. Jacek Piekarski, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Elektronowej oddział w Krakowie, ul. Zabłocie 39, 30-701 Kraków, E-mail: [jacek.piekarski@ite.lukasiewicz.gov.pl](mailto:jacek.piekarski@ite.lukasiewicz.gov.pl); mgr inż. Paulina Guzik, Uniwersytet Rolniczy - Wydział Technologii Żywności, ul. Balicka 122, 30-149 Kraków, E-mail: [paulina93@o2.pl](mailto:paulina93@o2.pl); dr inż. Piotr Kulawik prof.UR., Uniwersytet Rolniczy - Wydział Technologii Żywności, ul. Balicka 122, 30-149 Kraków, E-mail: [piotr.kulawik@urk.edu.pl](mailto:piotr.kulawik@urk.edu.pl)

#### LITERATURA

- [1] Witryna internetowa: <http://www.lginnotek.com/pl/>, dostęp luty 2020
- [2] Witryna internetowa: <https://www.nichia.co.jp/>, dostęp luty 2020
- [3] Witryna internetowa: <http://www.cel.com>, dostęp luty 2020
- [4] Witryna internetowa: <http://www.vishay.com>, dostęp luty 2020
- [5] Witryna internetowa: <https://www.prolightopto.com/en>, dostęp luty 2020
- [6] Witryna internetowa: [https://www.st.com/content/st\\_com/en/products/power-management/dc-dc-switching-converters/buck-regulators/l6902.html](https://www.st.com/content/st_com/en/products/power-management/dc-dc-switching-converters/buck-regulators/l6902.html), dostęp luty 2020
- [7] Witryna internetowa: <https://www.analog.com>, dostęp luty 2020
- [8] Lopez-Malo, A., & Palou, E. (2005). „*Ultraviolet light and food preservation.*” W: Novel food processing technologies, 405-422, CRC Press, Boca Raton.
- [9] Bottino, F. D. O., Rodrigues, B. L., de Nunes Ribeiro, J. D., Lázaro, C. A. D. L. T., & Conte - Junior, C. A. (2017). “*Influence of UV - C Radiation on Shelf Life of Vacuum Package Tambacu (Colossomamacropomum x Piaractusmesopotamicus) Fillets.*” Journal of Food Processing and Preservation, 41(4), e13003.
- [10] Beck, S. E., Hull, N. M., Poepping, C., & Linden, K. G. (2018). “*Wavelength-dependent damage to adenoviral proteins across the germicidal UV spectrum.*” Environmental science & technology, 52(1), 223-229.
- [11] Ozer, N. P., & Demirci, A. (2006). “*Inactivation of Escherichia coli O157: H7 and Listeria monocytogenes inoculated on raw salmon fillets by pulsed UV - light treatment.*” International journal of food science & technology, 41(4), 354-360.