

PATRYCJA SIEDLARZ ¹
PIOTR STEFAŃSKI ²
PRZEMYSŁAW MATYSIK ²
ZYGMUNT NITA ²
KRYSTYNA RYBKA ¹

¹ Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin — Państwowy Instytut Badawczy, 05-870 Radzików

² Hodowla Roślin Strzelce Grupa IHAR Sp. z o.o., ul. Główna 20, 99-307 Strzelce

Wpływ różnych oświetlaczy LED na indeks kiełkowania ziarna pszenicy uzyskanego w etapie szklarniowym procesu hodowlanego SSD*

The effect of different LED illuminators on the germination index of wheat grains obtained in the greenhouse stage of the SSD breeding process

W procesie hodowli zbóż metodą SSD (ang.: *Single Seed Descent*) w celu skrócenia cyklu hodowlanych często zbierane są niedojrzałe ziarniaki. Celem prowadzonych badań było sprawdzenie czy na kiełkowanie ziarniaków zebranych w 23 dniu po kwitnieniu, z roślin uprawianych w szklarni, wpływają widma światła generowane przez: 1) różne lampy diodowe stosowane w czasie uprawy zbóż w szklarni oraz 2) różne oświetlacze monochromatyczne stosowane w czasie suszenia nasion. Materiał do badań stanowiły dwie odmiany pszenicy jarej: Harenda i Tybalt. Rośliny uprawiano w zacienionej szklarni o kontrolowanych warunkach temperatury ($22 \pm 3^\circ\text{C}$) i wilgotności ($80\% \pm 5\%$) a jako oświetlaczy używano: wysokoprężnej lampy sodowej HPS (kontrola) i dwóch typów oświetlaczy LED-owych: zbudowanego w oparciu o diody niebieskie i czerwone oraz oświetlacza zbudowanego w oparciu o białe diody. Kłosa zbierano w 23 dniu po kwitnieniu, zgodnie z metodyką stosowaną w procesach hodowlanych. Wyłuskane ziarniaki umieszczano pod monochromatycznymi źródłami światła (niebieskiego, zielonego i czerwonego), poddawano suszeniu przez okres 10 dni w temperaturze 25°C , a następnie kiełkowano. Zliczano indeks kiełkowania (GI), całkowitą liczbę skiełkowanych ziarniaków oraz liczbę ziarniaków, które nie wytworzyły kielka i zostały porażone chorobami grzybowymi w czasie trwania doświadczenia. Stwierdzono, że oświetlanie ziarniaków w czasie suszenia poprawiało indeks kiełkowania i wpłynęło na wzrost liczby skiełkowanych nasion, przy czym światło zielone indukowało najbardziej równomierne kiełkowanie ($\geq 70\%$), niezależnie od

* Wyniki były prezentowane jako poster na XIII Ogólnopolskiej Konferencji „Nauka dla Hodowli Zbóż” w Zakopanem 30.01-3.02.2017. Praca została wykonana w ramach grantu finansowanego przez NCBiR nr PBS3/B8/19/2015 i może stanowić część doktoratu mgr inż. P. Siedlarz.

rodzaju oświetlania stosowanego w czasie wzrostu roślin, natomiast światło niebieskie (Royal Blue) najsilniej wpływało na dynamikę kiełkowania wyrażaną przez indeks kiełkowania a efekt był zależny od oświetlacza użytego do wzrostu roślin. Oświetlacz LED zbudowany w oparciu o niebieskie i czerwone diody użyty w trakcie wzrostu roślin w połączeniu ze światłem niebieskim użytym w trakcie suszenia ziarna pozwolił uzyskać najlepsze wyniki GI u obu badanych odmian pszenicy. Uzyskane rezultaty upoważniają do stwierdzenia, iż możliwe jest znalezienie oświetlaczy LED lepszych niż standardowe lampy HPS dla potrzeb hodowli zbóż oraz że doświetlanie ziarniaków w trakcie suszenia poprawia ich kiełkowanie. Potrzebna jest standaryzacja procedur.

Słowa kluczowe: diody emitujące światło, GI, indeks kiełkowania, LED, *Triticum aestivum* L., uprawa szklarniowa

During the SSD (Single Seed Descent) process of cereal breeding unripe kernels are often collected to shorten breeding cycles. Present studies were undertaken to check whether the germination of kernels harvested on the 23rd day after pollination from plants grown in a greenhouse is influenced: 1) by different light spectra used during cereal cultivation in the greenhouse and 2) by different single light bands used during seed drying. The materials for studies consisted of 2 spring wheat cultivars: Harenda and Tybalt. The plants were grown in a shadowed greenhouse with controlled temperature ($22 \pm 3^\circ\text{C}$) and humidity ($80\% \pm 5\%$) and illuminated by HPS lamp (control) and two types of LED illuminators: based on blue and red LEDs and based on white LEDs. The ears were harvested on 23rd day after flowering, according to the methodology used in field experiments. The threshed kernels were placed under monochromatic light sources (blue, green and red), dried for a period of 10 days at 25°C and then germinated. The germination index (GI), the total number of germinated kernels and the number of kernels that did not germinate and became infected by fungal diseases during the experiment, were counted. It was found that lightening of seeds during drying improved the germination index and total number of germinated seeds. The green light induced the most uniform germination ($\geq 70\%$) independently from the light used during wheat growth, while the blue light (Royal Blue) improved germination of seeds taken from plants cultivated under LED illuminator based on blue and red diodes. Obtained results confirmed that it was possible to find LED illuminator better than standard HPS lamp for cereal cultivation and that lightening of the kernels during drying improved their germination. Standardization of procedures would be needed.

Key words: germination index, GI, greenhouse cultivation, LED, light emitting diodes, *Triticum aestivum* L.

Stosowane skróty: DAP (ang. Days After Pollination) — ilość dni po zapyleniu; GI (ang. Germination Index) — indeks kiełkowania; HPS (ang. High-Pressure Sodium Lamp) — wysokoprężna lampa sodowa; LED (ang. Light Emitting Diodes) — diody emitujące światło; PAR (ang. Photosynthetic Active Radiation) - promieniowanie czynne fotosyntetycznie; PPFD (ang. Photosynthetic Photon Flux Density) — gęstość strumienia fotonów; wykorzystywanych w fotosyntezie; SD (ang. Standard Deviation) — odchylenie standardowe; SSD (ang. Single Seed Descent) — wysiew pojedynczych ziarniaków

WSTĘP

Procesy hodowli zbóż są ciągle modyfikowane w celu skrócenia okresu wytwarzania nowych odmian (Ortiz i in., 2007). W metodzie opierającej się na liniach czystych, wyprowadzanych przez 5–6 pokoleniowy wysiew pojedynczych ziarniaków (SSD, ang. Single Seed Descent) przyspieszenie procesu osiąga się przez wysiew trzech a nawet, w przypadku form jarych, czterech pokoleń w ciągu roku. Jedną z powszechnie

stosowanych praktyk jest zbieranie niedojrzałych ziarniaków, ich suszenie, kiełkowanie i rozmnażanie.

Zdolność niedojrzałych nasion do kiełkowania zależy od stopnia rozwoju, w którym zostały zebrane (Bentsink i Koornneef, 2008; Bewley i Black, 1994). W warunkach naturalnych ziarna zbóż muszą osiągnąć dojrzałość fizjologiczną związaną z prawie całkowitym odwodnieniem i przejść przez okres tzw. spoczynku aby uzyskać prawidłową zdolność kiełkowania (Pokojska i Grzelak, 1984). Jednakże nawet bardzo niedojrzałe ziarniaki osiągają zdolność do kiełkowania już 5–7 dni po zapyleniu (DAP, ang. Days After Pollination). Okres ich kiełkowania trwa zwykle bardzo długo i w przypadku jęczmienia jarego lub pszenicy ozimej wynosi więcej niż 50 dni. Siewki pozyskane w ten sposób są zazwyczaj bardzo słabe (Grzesiuk i Kulka, 1981; Grzesiuk i Kulka, 1988). We wczesnej fazie młeczej, 9–15 DAP, gdy zawartość wody w ziarniakach waha się w granicach 65–40% możliwe jest ich kiełkowanie z uzyskaniem normalnie rozwijającej się rośliny, zdolnej do reprodukcji (Lityński, 1982). Niedojrzałe ziarniaki mają zazwyczaj największą zdolność do kiełkowania 30–40 DAP na początku dojrzałości woskowej kiedy to ich uwodnienie kształtuje się w granicach 35–20%. Czterdziestoprocentowe uwodnienie uzyskują ziarniaki pszenicy już ok. 16 DAP i ten stan uwodnienia utrzymuje się ok. 7–10 dni. Ziarniaki wtedy zebrane wymagają suszenia, by wykiełkować. Suszone ziarniaki zebrane w tym czasie mogą kiełkować nawet w 80%. Gdy zawartość wody w ziarnie maleje w skutek dojrzewania, suszenie przed kiełkowaniem obniża zdolność do kiełkowania. Około 30 DAP, gdy wilgotność ziarna spada do ~25%, zdolność do kiełkowania niesuszonych ziarniaków może wynosić nawet 100%. Ziarniaki zebrane w tej fazie, poddane suszeniu kiełkują znacznie słabiej w ~20% (Bewley, 1982). Po około dziesięciodniowym okresie stosunkowo wysokiej zdolności kiełkowania pojawia się drugi okres niskiej zdolności kiełkowania związany z definitywnym zasychaniem ziarniaków, gdy zawartość wody spada do $\leq 12\%$. Ta faza odwodnienia jest uważana za początek spoczynku późniejszego. U innych gatunków zbóż obserwuje się takie same zależności; np. u pszenżyta wzrost zdolności do kiełkowania następuje po 15 DAP, a maksymalną efektywność procesu uzyskuje się między 18 a 25 DAP, w zależności od sezonu i odmiany. Również u jęczmienia okres efektywnego kiełkowania uzyskują ziarniaki w 16–25 DAP (Bewley i Black, 1994; Pokojska i Grzelak, 1984).

W nowoczesnej hodowli zbóż pojawia się pytanie, jaki wpływ na proces kiełkowania niedojrzałych ziarniaków może mieć oświetlenie wykorzystywane w szklarniach w czasie uprawy roślin w procesie SSD. Od dawna znany jest wpływ światła na kluczowe procesy wzrostu i rozwoju roślin (Kopcewicz, 1980); wpływ interakcji światła i hormonów roślinnych na rozwój wegetatywny i generatywny roślin został ostatnio przeanalizowany przez Warpeha i Montgomery (2016).

W obecnej publikacji została zaprezentowana ocena wpływu światła generowanego przez różnego typu oświetlacze LED-owe, wykorzystywane w czasie wzrostu i rozwoju roślin pszenicy, w kombinacji z pojedynczym pasmem światła zastosowanym w czasie suszenia niedojrzałych ziarniaków, zebranych w 23 dniu po zapyleniu, na proces kiełkowania.

MATERIAŁY I METODY

Materiał do badań stanowiły dwie genetycznie ustabilizowane odmiany pszenicy jarej (*Triticum aestivum*, L.): Harenda i Tybalt. Ziarniki wysiane zostały po 3×10 sztuk dla każdego wariantu oświetlenia, dla każdej odmiany, w 73-dołkowe multiplaty (Folmax, Warszawa, Polska) wypełnione ziemią ogrodniczą. Multiplaty podlewano systemem podsiąkowym co drugi dzień. Badania były prowadzone w zaciemnionej szklarni, w kontrolowanych warunkach: temp. $22 \pm 3^\circ\text{C}$, wilgotność $80\% \pm 5\%$ w Hodowli Roślin Strzelce-Grupa IHAR ($52^\circ 18' 41,0''\text{N}$ $19^\circ 24' 22,4''\text{E}$). Multiplaty zostały umieszczone pod 150 W wysokoprężną lampą sodową (HPS) (warunki kontrolne) oraz pod trzema prototypami oświetlaczy LED-owych produkcji Neonica, Sp. z o.o. (Łódź, Poland) oraz SpectroLight, Tomasz Braczkowski (Łódź, Poland), które charakteryzowały się podobną irradancją spektralną ($700 \times [\text{mW} \times \text{m}^{-2} \times \text{nm}^{-1}]$), jednakże różniły się natężeniem promieniowania, zarówno całkowitym [$\text{W} \times \text{m}^{-2}$] jak i fotosyntetycznie aktywnym: PAR [$\text{mW} \times \text{m}^{-2}$] i PPFd [$\mu\text{mol} \times \text{m}^{-2} \times \text{s}^{-1}$]. Lampę HPS wybrano jako kontrolę, gdyż jest powszechnie używana w szklarniach HR-Strzelce, natomiast oświetlacze LED wybrano ze względu na rodzaj diod użytych do ich konstrukcji. Oświetlacz 100 W Neonica GrowyLed posiadał diody niebieskie i czerwone, natomiast do oświetlaczy SpectroLight wykorzystano diody białe. Na początku doświadczenia wykonano pomiar widma i natężenia światła przy użyciu spektrometrii produkcji GL Optic, Sp. z o.o. (Poznań, Polska), który został wykalibrowany tak, by umożliwić pomiar różnych parametrów: irradancji spektralnej [$\text{mW} \times \text{m}^{-2} \times \text{nm}^{-1}$], natężenia światła w modelu ludzkiej percepcji wzrokowej [lx], radiancji (wartości bezwzględnej natężenia promieniowania) [$\text{W} \times \text{m}^{-2}$] oraz fotosyntetycznie aktywnej radiancji PAR (ang.: Photosynthetic Active Radiation) [$\text{mW} \times \text{m}^{-2}$] i gęstości strumienia elektronów aktywnych fotosyntetycznie PPFd (ang.: Photosynthetic Photon Flux Density) [$\mu\text{mol} \times \text{m}^{-2} \times \text{s}^{-1}$]. Spektromierz umożliwiał jednoczesną rejestrację widma promieniowania (Elvidge i in., 2010). Oświetlacze zostały rozmieszczone tak, by zapewnić równomierne oświetlenie roślin. Pomiarów spektralnych były wykonane w odległości 90 cm od źródła światła. Stanowiska uprawy roślin były izolowane za pomocą kurtyny zaciemniającej. Ze względów technicznych, rośliny były uprawiane w fotoperiodzie 12/12 h dzień/noc (Stefański i in., 2018).

Ziarniki zebrano 23 dni po kwitnieniu, w fazie mleczonej, gdy zawierały 65–50% wody, i poddano suszeniu przez 10 dni w temperaturze 25°C , co jak wcześniej zbadano, gwarantowało uzyskanie przez ziarniki stałej masy przy końcowej wilgotności 1215% (Małuszyńska i Rybka, 2016). W czasie suszenia stosowano 3 oświetlacze LED o pojedynczym widmie: niebieskim (Royal Blue), zielonym i czerwonym, wybrane na podstawie badań wstępnych (dane nie publikowane) przy arbitralnie ustalonym fotoperiodzie 16/8 h dzień/noc. Ziarniki kontrolne suszono bez dostępu światła dziennego. Suszenie prowadzono w klimatyzowanym pomieszczeniu bez okien, do którego wstawiono światłoszczelne namioty z poszczególnymi oświetlaczami. Sprawdzono, że w każdym z namiotów panowała temp. $+25^\circ\text{C}$, oświetlacze LED zostały skonstruowane tak, by energię termalną wypromieniowywać w górę, a w każdym namiocie był zainstalowany wentylator wymuszający wydmuch powietrza do klimatyzo-

wanego pomieszczenia. Nie zarejestrowano wzrostu temperatury w skutek pracy oświetlacza.

Wysuszone ziarniaki kiełkowano w 3 powtórzeniach po 40 nasion, na szalkach Petriego wyłożonych bibułą. Kiełkowanie prowadzono w ciągu 21 dni, w temperaturze pokojowej ($25^{\circ}\text{C} \pm 1$), dodając codziennie 0,5 ml H_2O do szalki i zmieniając bibułę w przypadku pojawienia się zakażenia. W przeprowadzonym doświadczeniu ziarniaki kiełkowano w destylowanej wodzie, nie stosując KNO_3 do przełamania spoczynku. Oceny kiełkowania ziarniaków dokonano przez porównanie indeksów kiełkowania (GI, ang.: Germination Index), całkowitego procentu skiełkowanych ziarniaków oraz liczby ziarniaków, które nie wytworzyły kiełka i zostały porażone chorobami grzybowymi w czasie trwania doświadczenia. Indeks kiełkowania to wskaźnik, który odzwierciedla dynamikę tego procesu i jest wyrażany jako suma ilorazów procentu skiełkowanych ziarniaków i kolejnych dni doświadczenia, wg wzoru:

$$GI = \sum_{n=1}^{n=21} \frac{\text{procent skiełkowanych ziarniaków}}{n} \quad (\text{Kolasieńska, 2008}).$$

Analizę statystyczną wykonano w środowisku R. Objęła ona wszystkie oświetlacze: kontrolną lampę HPS oraz oświetlacze LED. Wartości statystyk F podano dla $p \leq 0,01$ (***) oraz $p \leq 0,05$ (**). Na rysunku 1 oraz w tabeli 4 podano odchylenie standardowe w postaci słupków błędów. Badania prowadzono w ramach zadań o charakterze przemysłowym w ramach grantu NCBiR.

WYNIKI I DYSKUSJA

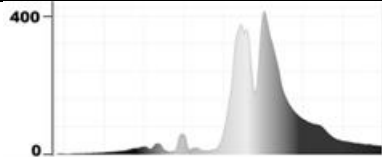
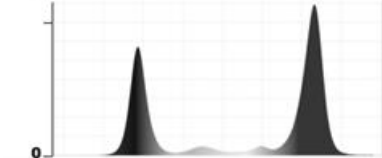
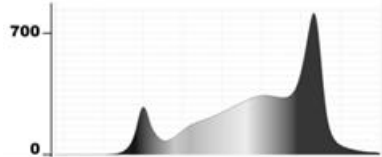
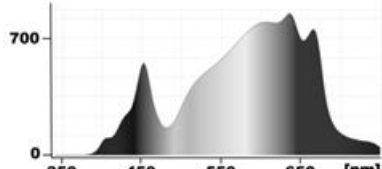
Przed rozpoczęciem doświadczenia źródła światła zostały porównane na podstawie pomiarów natężenia oraz widma (tab. 1). W doświadczeniu wykorzystano prototypy rynkowe oświetlaczy polskich producentów; nie ingerowano w widma tych lamp diodowych. Irradiancja spektralna (względna moc oświetlaczy) LED była podobna, ok. 700 [$\text{mW} \times \text{m}^{-2} \times \text{nm}^{-1}$], natomiast lampy sodowej była ok. 40% słabsza. Również natężenie radiometryczne HPS jak i promieniowania fotosyntetycznie aktywnego było mniejsze niż oświetlaczy LED. Lampy diodowe charakteryzowały się podobną irradancją maksymalną, jednakże różniły się pozostałymi parametrami. Natężenie źródła światła w znormalizowanym modelu ludzkiej percepcji wzrokowej jest wyrażane w luksach [lx] (Tabaka i Derlecki, 2012; Ritchie, 2010) i ten wskaźnik był bardzo zróżnicowany (tab. 1). Najśłabsze natężenie, wg. modelu ludzkiej percepcji wzrokowej, generował oświetlacz zbudowany w oparciu o diody niebieskie i czerwone (GrowyLED), natomiast pięciokrotnie silniejsze, oświetlacze zbudowane w oparciu o diody białe, co jest związane z widmem światła generowanego przez te diody. Lampa HPS generowała widmo o jasności pośredniej. Ponieważ lampa HPS została skonstruowana jako źródło światła o widmie dobrze odbieranym przez ludzkie oko, jej temperatura barwowa jest ciepła. Temperatura barwowa to miara wrażenia barwy danego źródła światła i wg. normy PN-EN 12464-1 temperatura barwowa poniżej 3300 K jest barwą ciepłą, w zakresie 3300-5300 K barwą neutralną, a powyżej 5300 K barwą chłodną (Yeh i Chung, 2009; Pattinson i in., 2016). Dla lampy diodowej generującej dwukolorowy strumień światła niemożliwe było

określenie temperatury barwowej. Oświetlacze LED-owe zbudowane w oparciu o diody białe generowały światło o neutralnej temperaturze barwowej.

Bezwzględna wartość iradiancji, czyli wielkości strumienia promieniowania, odpowiadająca mocy jaką przenosi promieniowanie przez płaszczyznę jednostkową [$W \times m^{-2}$], nazywana również natężeniem lub intensywnością źródła światła, była prawie dwukrotnie wyższa dla lamp zbudowanych w oparciu o białe diody w porównaniu z lampami zbudowanym w oparciu o diody czerwone i niebieskie, i prawie trzykrotnie wyższa w porównaniu z lampą HPS (tab. 1).

Tabela 1

Charakterystyka źródeł światła wykorzystanych do uprawy pszenicy w warunkach szklarniowych w zaciemnionej części szklarni przy sztucznym świetle: HPS (kontrola) oraz oświetlacze LED: Neonica GrowyLED (zbudowany w oparciu o diody niebieskie i czerwone) oraz SpectroLight-1 i SpectroLight-2 (zbudowane w oparciu o diody emitujące białe światło). Pomiarów dokonano 90 cm poniżej źródła światła
Characteristics of light sources used for wheat growing in greenhouse conditions in shadowed part of the greenhouse with artificial light: HPS (control) and LED illuminators: Neonica GrowyLED (based on blue and red LEDs) and SpectroLight-1 and SpectroLight-2 (based on diodes emitting white light).
Measurements were done 90 cm below the light source

Iradiancja spektralna i widmo Spectral irradiance and spectrum $mW \times m^{-2} \times nm^{-1}$	Oświetlacz Illuminator	Natężenie Intensity lx	Temperatura barwowa K Colour temperature K	Strumień promieniowania Radian flux		
				radiometr. radiometric $W \times m^{-2}$	PAR $mW \times m^{-2}$	PPFD $\mu mol \times m^{-2} \times s^{-1}$
	HSP 150 W	11176	2225	35	21	160
	NeonicaGrovyLED	4702	n.d.	49	39	229
	Spectro-Light-1	22890	3247	90	60	428
	Spectro-Light-2	22595	3454	81	51	365

PAR — radiancja fotosyntetycznie aktywna (ang.: Photosynthetic Active Radiation)

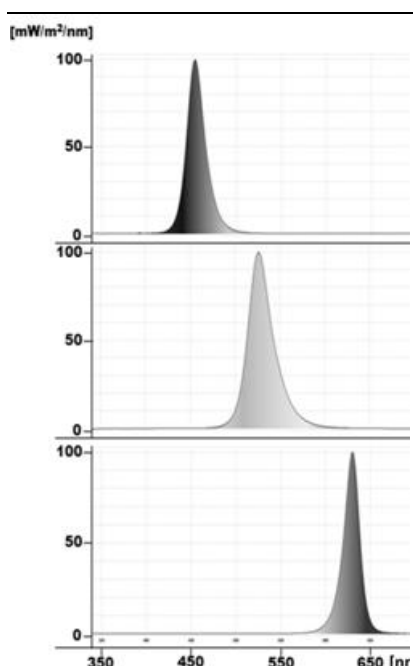
PPFD — strumień fotonów aktywnych fotosyntetycznie (ang.: Photosynthetic Photon Flux)

Uszeregowanie oświetlaczy pod względem mocy promieniowania, zarówno całkowitego jak i fotosyntetycznie aktywnego wyrażanego jako $[W \times m^{-2}]$ było zgodne z szeregiem ustalonym przez wielkość strumienia fotonów PPF $[\mu mol \times m^{-2} \times s^{-1}]$ (tab. 1). Strumień fotonów generowanych przez źródła światła jest wartością bezwzględną i z lampy HPS był prawie o 25% słabszy niż z oświetlacza o widmie niebiesko-czerwonym, pomimo iż wartości mierzone w luksach dla lampy HPS były dwukrotnie większe. Ponieważ różne długości fali świetlnej mają różną energię (im większa długość fali, tym energia fali mniejsza) nie istnieje dokładnie liniowy przelicznik pomiędzy jednostkami w których mierzy się natężenie źródeł światła. Dlatego też nie jest możliwa prawidłowa, wizualna ocena natężenia strumieni światła fotosyntetycznie aktywnego.

W 23 dniu po kwitnieniu zbierano niedojrzałe ziarniaki i suszono je pod oświetlaczami generującymi światło monochromatyczne. Do suszenia ziarniaków wybrano 3 (niebieski Royal Blue, zielony, czerwony) oświetlacze monochromatyczne (tab. 2).

Tabela 2

Charakterystyka źródeł światła LED (niebieski, zielony, czerwony) wykorzystanych w czasie suszenia niedojrzałych ziarniaków pszenicy uzyskanych w warunkach szklarniowych i zebranych w 23 dniu po kwitnieniu. Pomiarów dokonano na poziomie szalek, w których kielkowano nasiona
Characteristics of LED light sources (Royal Blue, green, red) used for drying of unripened wheat kernels collected on 23rd day after flowering. Measurements were made at Petri dishes level, where seeds were germinated

	LED	Maksimum Colour peak nm	PPFD $\mu mol \times m^{-2} \times s$	Radiometr. Radiometric $W \times m^{-2}$	PAR $mW \times m^{-2}$
	niebieski Royal Blue	455	6,5	1,70	1,59
	zielony green	524	6,5	1,45	0,64
	czerwony red	631	6,5	1,25	0,89

PAR — radiancja fotosyntetycznie aktywna (ang.: Photosynthetic Active Radiation)

PPFD — gęstość strumienia fotonów aktywnych fotosyntetycznie (ang.: Photosynthetic Photon Flux Density)

Oświetlacze te wybrano na podstawie wyników doświadczenia pilotażowego, na podstawie wstępnych, najbardziej obiecujących wyników. Ustawiono je tak, by generowały taką samą liczbę fotonów PPFD o bardzo niskim natężeniu 6,5 [$\mu\text{mol}\times\text{m}^{-2}\times\text{s}^{-1}$] (Hoffmann i in., 2016; Meng i Runkle, 2017). Pomimo takiej samej liczby generowanych fotonów, zgodnie z prawami fizyki, moc oświetlaczy monochromatycznych była różna, malała wraz z rosnącą długością fali i była: najwyższa dla światła niebieskiego, pośrednia dla zielonego i najniższa dla światła czerwonego. Natomiast wartość fotosyntetycznie czynnej radiancji (PAR) była wyższa u oświetlacza generującego czerwone światło w porównaniu z oświetlaczem zielonym, co wynika z definicji radiancji fotosyntetycznie aktywnej czyli promieniowania wychwytywanego przez anteny chlorofilowe. Anteny chlorofilowe absorbują światło czerwone i niebieskie, światło zielone ma znaczenie głównie fotomorfogenetyczne (Golovatskaya i Karnachuk, 2015) i stąd PAR dla równych strumieni fotonów: mniejszy dla światła zielonego w porównaniu z czerwonym.

Tabela 3

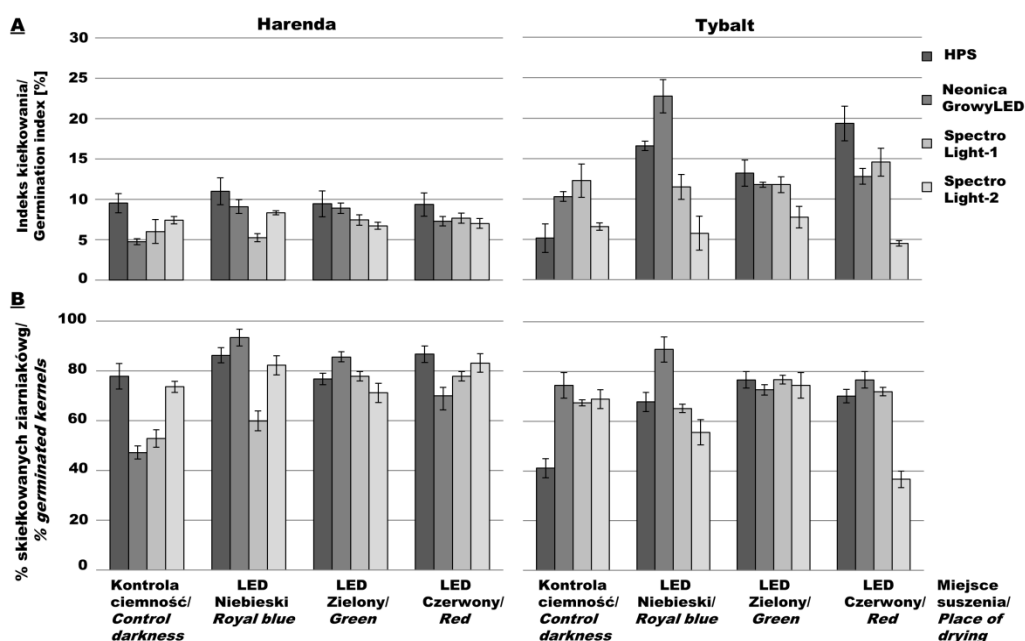
Wpływ czynników (oświetlacze wykorzystane w czasie wzrostu roślin oraz światło w czasie suszenia ziarniaków) a także ich interakcji na wartość statystyk F dla $\rho \leq 0,01$ (*) oraz $\rho \leq 0,05$ (**), charakteryzujących indeks kiełkowania oraz liczbę skielkowanych i martwych ziarniaków (tj. liczbę ziarniaków, które nie wytworzyły kielka i zostały porażone chorobami grzybowymi w czasie trwania doświadczenia) oraz ziarniaków nieskielkowanych, odmian pszenicy Harenda i Tybalt użytych do badania wpływu źródeł światła stosowanych w czasie wzrostu roślin oraz w trakcie suszenia, na kiełkowanie uzyskanych nasion**

Effect of factors (illuminators used during growth of plants, light during seeds drying) and their interaction on the F values for $\rho \leq 0,01$ (*) and $\rho \leq 0,05$ (**) characterizing the germination index, number of germinated and dead kernels (i.e. number of kernels that did not germinated and were infected with fungal diseases during the experiment) and non-germinated kernels of wheat cultivars Harenda and Tybalt, used to study the effects of light sources used during plant growth and during seeds drying, on germination of the obtained seeds**

Odmiana Cultivar	Czynnik Factor	Indeks kiełkowania Germination index	Skielkowane ziarniaki Germinated kernels	Martwe ziarniaki Dead kernels	Nieskielkowane ziarniaki Non-germinated kernels
Harenda	Oświetlacze wykorzystywane w uprawie Lightings used for plant growing	222,52 ***	7,15 **	25,83 ***	32,97 ***
	Światło w czasie suszenia Light during seeds drying	17,36 ***	12,86 ***	1,52	22,98 ***
	Oświetlacze wykorzystywane w uprawie * Światło w czasie suszenia Lightings used for plant growing * Light during seeds drying	11,60 ***	3,40 **	2,35 **	6,66 ***
	Oświetlacze wykorzystywane w uprawie Lightings used for plant growing	105,79 ***	8,56 ***	11,15 ***	10,19 ***
Tybalt	Światło w czasie suszenia / Light during seeds drying	25,20 ***	14,33 ***	1,66	7,41 ***
	Oświetlacze wykorzystywane w uprawie * Światło w czasie suszenia Lightings used for plant growing * Light during seeds drying	19,32 ***	7,19 ***	2,24 **	7,50 ***
	Oświetlacze wykorzystywane w uprawie Lightings used for plant growing				

Kiełkowanie ziarników uzyskanych w ramach doświadczenia było zróżnicowane i zależało zarówno od rodzaju lamp wykorzystywanych w uprawie, światła stosowanego w czasie suszenia niedojrzałych ziarników jak i interakcji obydwu czynników (tab. 3). Istotna ($p \leq 0,05$) wartość statystyk F, charakteryzujących indeks kiełkowania oraz sumę skielkowanych i martwych ziarników wyliczone dla odmian pszenicy Harenda oraz Tybałt wskazują, że zarówno światła stosowane w czasie wzrostu roślin jak i w trakcie suszenia niedojrzałych ziarników, a także ich interakcja mają wpływ na dynamikę kiełkowania uzyskanych nasion i na całkowitą liczbę skielkowanych oraz martwych ziarników (tj. liczbę ziarników, które nie wytworzyły kielka i zostały porażone chorobami grzybowymi w czasie trwania doświadczenia) (tab. 3).

Pomimo, iż parametry fizyczne charakteryzujące lampę HPS były słabsze niż oświetlaczy LED (tab. 1), parametry kiełkowania ziarników nie zawsze były gorsze (rys. 1).



Rys. 1. Indeks kiełkowania (A) oraz całkowita liczba skielkowanych ziarników [%] (B) po 21 dniach odmian pszenicy Harenda i Tybałt uprawianych w warunkach szklarniowych w zaciemnionej części szklarni przy sztucznym świetle: HPS (kontrola) oraz oświetlacze LED: Neonica GrowyLED (zbudowany w oparciu o diody niebieskie i czerwone) oraz SpectroLight-1 i SpectroLight-2 (zbudowane w oparciu o diody emitujące białe światło), zebranych w 23 dniu po zapyleniu oraz wysuszonych w warunkach różniących się oświetleniem (kontrola - ciemność oraz LED niebieski, zielony, czerwony).

Znaczniiki odpowiadają \pm SD

Fig. 1. Germination index (A) and total number of germinated seeds [%] (B) of wheat cultivars Harenda and Tybałt, grown in greenhouse conditions in shadowed part of the greenhouse with artificial light: HPS (control) and LED illuminators: Neonica GrowyLED (based on blue and red LEDs) and SpectroLight-1 and SpectroLight-2 (based on diodes emitting white light), collected on 23rd day after pollination and dried in conditions differed by lighting (control- darkness and LEDs: Royal Blue, green and red). Tags match \pm SD

Indeks kiełkowania (GI) niedojrzałych ziarniaków był bezwzględnie największy dla roślin odmiany Tybalt uprawianych pod oświetlaczem generującym dwupasmowe widmo światła (Neonica GrowyLED) i ziarniaków suszonych w świetle niebieskim (rys. 1). Natomiast u odmiany Harenda najwyższe GI uzyskano dla ziarniaków suszonych w monochromatycznym świetle niebieskim a pochodzących z roślin uprawianych pod lampą HPS, z wynikiem porównywalnym w granicach błędu, do oświetlacza LED-owego zbudowanego w oparciu o diody niebieskie i czerwone (Neonica GrowyLED). Całkowita liczba skielkowanych ziarniaków była największa dla roślin uprawianych pod Neonica GrowyLED i ziarniaków suszonych pod niebieskim oświetlaczem. Uzyskany wynik wskazuje, że rośliny uprawiane pod oświetlaczami generującymi głównie dwubarwną wiązkę światła o długościach fali kompatybilnych dla anten chlorofilowych rozwijają się wystarczająco dobrze by wejść w fazę rozwoju generatywnego i wydać nasiona.

Zastosowanie lamp diodowych jest już faktem w ogrodnictwie (Mitchell, 2015), jednakże pozyskiwanie nasion z roślin uprawianych pod oświetlaczami LED-owymi i ich propagowanie nie jest takie oczywiste. Obecnie stawiamy pytanie, czy oświetlanie nasion światłem monochromatycznym może wpłynąć na ich lepsze kiełkowanie. Przeprowadzone doświadczenia z niedojrzałym ziarnem zbóż zbieranym z pola wskazują na pozytywny wpływ światła stosowanego w czasie suszenia ziarniaków na ich kiełkowanie (Małuszyńska i Rybka, 2016). Zaobserwowano różnicę odmianową w indeksie kiełkowania niedojrzałych ziarniaków w warunkach bez KNO_3 , w zależności od spektrum światła stosowanego w czasie wzrostu roślin, całkowita liczba skielkowanych ziarniaków nie odzwierciedlała tego tak wyraźnie. Kiełkowanie ziarniaków odmiany Harenda było bardziej równomierne, niezależnie od źródła światła stosowanego zarówno w czasie wzrostu roślin jak i w trakcie suszenia niedojrzałych ziarniaków (rys. 1). Należy również podkreślić, iż nie uzyskano wyniku całkowicie negatywnego typu: brak ziarniaków, brak kiełkowania bądź wszystkie ziarniaki porażone przez choroby grzybowe (rys. 1 i tab. 4).

Oświetlanie ziarniaków w czasie suszenia poprawiło indeks kiełkowania i wpłynęło na wzrost liczby skielkowanych nasion. Ziarniaki suszone pod zielonym LED skielkowały najbardziej równomiernie, $\geq 70\%$, niezależnie od warunków oświetlania roślin w czasie wzrostu. Światło zielone pełni funkcje fotomorfogenetyczne (Golovatskaya i Karnachuk, 2015) i zbadanie procesów zachodzących w niedojrzałych ziarniakach poddanych suszeniu w tym świetle może stać się celem dalszych doświadczeń. Światło niebieskie Royal Blue stosowane przy suszeniu ziarniaków najsilniej wpływało na dynamikę kiełkowania ziarniaków wyrażaną przez GI a efekt był zależny od oświetlacza użytego do wzrostu roślin. Z warunków Neonica GrowyLED \times Royal Blue uzyskano najlepsze wyniki. Światło niebieskie prócz energii dostarczanej do anten chlorofilowych pełni funkcje sygnałne, gdyż jest absorbowane również przez kryptochromy. Wiadomym jest, iż światło niebieskie pełni funkcję sygnałną dla ekspresji genu dioksygenazy 9-cis-epoksykarotenoidowej, ze szlaku syntezy ABA i jednocześnie hamowania ekspresji ABA 8'-hydroxylazy przyczyniając się do wzrostu stężenia ABA w nasionach i utrzymania stanu spoczynku (Barrero i in., 2014; Cope i in., 2014). W naszym doświadczeniu niebieskie światło o bardzo niskim natężeniu, na granicy rozpoznawalności przez fotoreceptory (Meng i Runkle, 2017) zastosowane w trakcie suszenia przyczyniło się do

nieznacznie lepszego kiełkowania takich ziarniaków w porównaniu z ziarniakami suszonymi pod czerwonym światłem. Jednakże trzeba wziąć pod uwagę, że tutaj istotne było współdziałanie rodzaju doświetlania w szklarni ze światłem użytym przy suszeniu ziarniaków. W standardowym układzie doświadczalnym, w przypadku dojrzałych nasion, to czerwone światło rozpoznawane przez fitochromy jest czynnikiem sygnałnym kiełkowania (Chen i in., 2004). Regulacja spoczynku nasion może być sterowana przez działanie zarówno niebieskiego, jak i zielonego światła i wpisuje się na długą listę zmian fotomorfo-genetycznych zależnych od zielonego światła a przebiegających szlakami niezależnymi od kryptochromów (Goggin i in., 2008; Golovatskaya i Karnachuk, 2015; Smith i in., 2017). Udowodniono, że nasiona *Lolium rigidum* nie kiełkują na świetle, jednakże światło niebieskie i zielone indukują kiełkowanie (Goggin i Steadman, 2012; Golovatskaya i Karnachuk, 2015). Również krótkie naświetlanie światłem zielonym indukuje kiełkowanie nasion *Cistaceae*, *Compositae*, *Labiatae*. W tym doświadczeniu badano *Hordeum vulgare* jako jedyny gatunek zbóż i również stwierdzono pozytywny wpływ krótkich zielonych impulsów na kiełkowanie (Luna i in., 2004; Golovatskaya i Karnachuk, 2015). W chwili obecnej autorzy nie potrafią przeprowadzić spekulacji wyjaśniającej zaobserwowane zjawisko. Zagadnienie wymaga dalszych doświadczeń a kierunek badań wpływu zmian potencjału oksydacyjno-redukcyjnego na zdolność kiełkowania wydaje się bardzo zasadny w świetle licznych doniesień literaturowych (Bewely, 1997; Nonogaki i in., 2010).

Tabela 4

Procent ziarniaków porażonych przez choroby grzybowe (średnia ± SD) wykrytych w czasie kiełkowania nasion, które zostały pozyskane z roślin pszenicy (odmiany: Harenda i Tybalt) uprawianych w warunkach różniących się oświetleniem: HSP, Neonica GrowyLED, SpectroLight-1, SpectroLight-2 oraz zostały wysuszone w warunkach różniących się oświetleniem (Kontrola: ciemność, bez dostępu światła dziennego oraz LED: niebieski, zielony, czerwony)
Dead kernels percent (mean ± SD) detected during germination of seeds from wheat plants (cultivars: Harenda and Tybalt) grown in shadowed greenhouse conditions differing in the light source: HSP, Neonica GrowyLED, SpectroLight-1, SpectroLight-2. Seeds of Harenda^{cult} and Tybalt^{cult} and dried in conditions differing in lighting (Control: darkness with no daylight, LED: Royal Blue, Green, Red)

Światło Light	HSP		Neonica		SpectroLight- 1		SpectroLight- 2	
	Harenda	Tybalt	Harenda	Tybalt	Harenda	Tybalt	Harenda	Tybalt
Martwe ziarniaki [% ±SD] — Dead kernels [% ±SD]								
Kontrola — Control								
Ciemność Darkness	4,4 ±1,9	17,8 ±3,8	1,4 ±2,4	0,0 ±0,0	5,6 ±2,0	8,8 ±4,1	8,1 ±2,0	2,2 ±1,9
LED								
Niebieski Royal Blue	5,2 ±2,7	16,7 ±2,7	0,0 ±0,0	1,1 ±1,9	5,8 ±2,1	4,5 ±1,9	7,8 ±1,9	2,2 ±1,9
Zielony Green	5,8 ±2,1	4,4 ±1,9	2,2 ±3,8	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	2,3 ±2,0	14,4 ±5,1	2,2 ±1,9
Czerwony Red	2,2 ±1,9	6,3 ±2,4	2,2 ±1,9	1,1 ±1,9	2,2 ±1,9	7,9 ±1,9	6,7 ±1,3	7,8 ±1,9

Rodzaj sztucznego oświetlenia ma znaczący wpływ na wzrost, kondycję i plon roślin. Zakłada się, że zastosowanie półprzewodnikowych diod emitujących światło (LED- light

emitting diodes) może wpłynąć na poprawę rozwoju roślin uprawianych w szklarniach. W procesie hodowli zbóż metodą SSD oczekiwana jest poprawa wydajności. Względy ekonomiczne i ekologiczne wynikające z zastosowania oświetlaczy LED są bezdyskusyjne, gdyż diody charakteryzują się mniejszym zapotrzebowaniem na energię elektryczną oraz dłuższą żywotnością (10 lat) w porównaniu ze standardowymi lampami HPS (3 lata) (T. Braczkowski, informacja ustna) oraz mogą charakteryzować się dowolnie zaprojektowanym widmem światła. W doświadczeniu wykazano, że na kiełkowanie niedojrzałych ziarniaków wpływają różne widma światła stosowane w czasie uprawy zbóż w szklarni oraz różne pojedyncze pasma światła stosowane w czasie suszenia nasion.

WNIOSKI

Rodzaj lamp wykorzystanych w czasie wzrostu roślin pszenicy, w trakcie suszenia niedojrzałych ziarniaków a także ich interakcja miały wpływ na dynamikę kiełkowania (GI) oraz całkowitą liczbę skiełkowanych ziarniaków:

1. Światło zielone stosowane w trakcie suszenia niedojrzałych ziarniaków indukowało najbardziej równomierne kiełkowanie ($\geq 70\%$), niezależnie od rodzaju oświetlacza stosowanego w czasie wzrostu roślin.
2. Światło niebieskie Royal Blue najsilniej wpływało na dynamikę kiełkowania wyrażaną przez indeks kiełkowania (GI), a efekt był zależny od oświetlacza użytego w czasie wzrostu roślin. Najlepsze efekty uzyskano z interakcji oświetlacza LED-ego zbudowanego w oparciu o niebieskie i czerwone diody, użytego w trakcie wzrostu roślin, w połączeniu ze światłem niebieskim użytym w trakcie suszenia niedojrzałego ziarna.
3. Światło pod którym były suszone ziarniaki nie wpłynęło na liczbę ziarniaków, które nie skiełkowały i uległy porażeniu przez choroby grzybowe.

Uzyskane wyniki wskazują, że jest możliwe skonstruowanie lamp diodowych, pod którymi zboża w hodowli SSD będą rozwijały się lepiej niż pod standardowymi lampami HPS oraz że doświetlanie niedojrzałych ziarniaków w trakcie suszenia poprawia ich kiełkowanie.

LITERATURA

- Barrero J. M., Downie A. B., Xu Q., Gubler F. 2014. A Role for Barley CRYPTOCHROME1 in Light Regulation of Grain Dormancy and Germination. *The Plant Cell* 26 (3):1094 — 1104.
- Bentsink L., Koornneef M. 2008. Seed Dormancy and Germination. *The Arabidopsis Book* / American Society of Plant Biologists 6:e0119.
- Bewley J. D. 1997. Seed Germination and Dormancy. *The Plant Cell* 9 (7):1055 — 1066.
- Bewley J. D. 1982. Dormancy. In: *Physiology and Biochemistry of Seeds in Relation to Germination*. Bewley J. D., Black M. (ed.) Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York: 60 — 125.
- Chen M., Chory J., Fankhauser C. 2004. Light Signal Transduction in Higher Plants. *Annual Review of Genetics* 38 (1): 87 — 117.
- Cope K. R., Snowden M. C., Bugbee B. 2014. Photobiological interactions of blue light and photosynthetic photon flux: Effects of monochromatic and broad-spectrum light sources. *Photochemistry and Photobiology* 90 (3): 574 — 584.

- Elvidge C. D., Keith D. M., Tuttle B.T., Baugh K. E. 2010. Spectral Identification of Lighting Type and Character. *Sensors* 10: 3961 — 3988.
- Goggin D. E., Steadman K. J., Powles S. B. 2008. Green and blue light photoreceptors are involved in maintenance of dormancy in imbibed annual ryegrass (*Lolium rigidum*) seeds. *New Phytologist* 180 (1): 81 — 89.
- Goggin D. E., Steadman K. J. 2012. Blue and green are frequently seen: responses of seeds to short- and mid-wavelength light. *Seed Sci. Res.* 22 (1): 27 — 35.
- Golovatskaya I., Karnachuk R. 2015. Role of green light in physiological activity of plants. *Russian J. Plant Physiology* 62 (6): 727 — 740.
- Grzesiuk S., Kulka K. 1981. Kiełkowanie nasion o różnym stopniu dojrzałości. *W: Fizjologia i biochemia nasion*. PWRiL Warszawa: 400 — 402 ss.
- Grzesiuk S., Kulka K. 1988. Zależność kiełkowania ziarniaków od ich właściwości i wpływu czynników środowiskowych. *W: Biologia ziarniaków zbóż*. Grzesiuk S., Kulka K. (ed.) PWN Warszawa: 445 — 455.
- Hoffmann A. M., Noga G., Hunsche M. 2016. Alternating high and low intensity of blue light affects PSII photochemistry and raises the contents of carotenoids and anthocyanins in pepper leaves. *Plant Growth Regulators* 79 (3): 275 — 285.
- Kolasińska K. 2008. Wpływ naturalnych metod zaprawiania na zdolność kiełkowania i wigor zbóż jarych wyprodukowanych na ekologicznych plantacjach nasiennych. *Biul. IHAR* 247: 15 — 30.
- Kopcewicz J. 1980. Rola fitohormonu we wzroście i rozwoju roślin. *Wiad. Bot.* 24 /1: 67 — 84.
- Lityński M. 1982. Dojrzewanie i spoczynek nasion. In: *Biologiczne podstawy nasiennictwa*. Wyd. 2 popr. Lityński, M. (ed.) PWN Warszawa: 36 — 64.
- Luna B., Perez B., Fernandez-Gonzalez F., Moreno J. M. 2004. Sensitivity to green safelight of 12 Mediterranean species. *Seed Sci. Technol.* 32: 113 — 117.
- Małuszyńska E., Stefański P., Matysik P., Nita Z., Rybka K. 2016. Does illumination of non-mature cereal kernels during drying affect the germination ability? *Plant Breeding and Seed Science* 74: 13 — 23.
- Meng Q., Runkle E. S. 2017. Moderate-intensity blue radiation can regulate flowering, but not extension growth, of several photoperiodic ornamental crops. *Environmental and Experimental Botany* 134:12 — 20.
- Mitchell C. A. 2015. Academic Research Perspective of LEDs for the Horticulture Industry. *HortScience* 50 (9): 1293 — 1296.
- Nonogaki H., Bassel G. W., Bewley J. D. 2010. Germination-Still a mystery. *Plant Science* 179 (6): 574 — 581.
- Ortiz R., Trethowan R., Ferrara G., Iwanaga M., Dodds J., Crouch J., Crossa J., Braun H.-J. 2007. High yield potential, shuttle breeding, genetic diversity, and a new international wheat improvement strategy. *Euphytica* 157: 365 — 384.
- Pattinson C. L., Allan A. C., Staton S. L., Thorpe K. J., Smith S. S. 2016. Environmental Light Exposure Is Associated with Increased Body Mass in Children. *PLoS ONE* 11: e0143578.
- Pokojska H., Grzelak K. 1994. Development of dormancy in triticale seeds under field conditions. *Plant Breed Seed Sci.* 38: 127 — 135.
- Ritchie R. 2010. Modelling photosynthetic photon flux density and maximum potential gross photosynthesis. *Photosynthetica* 48: 596 — 609.
- Smith H. L., McAusland L., Murchie E. H. 2017. Don't ignore the green light: exploring diverse roles in plant processes. *Journal of Experimental Botany* 68 (9): 2099 — 2110.
- Stefański P., Siedlarz P., Matysik P., Nita Z., Rybka K. 2017. Przydatność oświetlacza LED zbudowanego w oparciu o białą diodę w hodowli zbóż. *Biul. IHAR (w recenzjach)*.
- Tabaka P., Derlecki S. 2012. Analysis of electrical parameters of light sources used by household and municipal customers. *Electr. Rev.* 88: 207 — 212.
- Warpeha K. M., Montgomery B. L. 2016. Light and hormone interactions in the seed-to-seedling transition. *Env. Exp. Bot.* 121: 56 — 65.
- Yeh N., Chung J.-P. 2009. High-brightness LEDs- Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 13: 2175 — 2180.