

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

KRYSTYNA RYBKA ²♦

¹ Hodowla Roślin Strzelce Grupa IHAR Sp. z o.o., ul. Główna 20, 99-307 Strzelce

² Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin — Państwowy Instytut Badawczy, Radzików

Przydatność źródeł światła zbudowanych w oparciu o diody charakteryzujące się widmem ciągłym światła białego wzbogaconym o pasmo niebieskie w hodowli zbóż*

The usefulness of light sources based on diodes characterized by a continuous spectrum of white light enriched with a blue band in cereal breeding

Nowoczesna hodowla zbóż odbywa się pod wielką presją czasu. Dlatego też do przyspieszenia procesów hodowlanych używa się szklarni, które w naszej szerokości geograficznej wymagają doświetlenia. Pomysł zastosowania źródeł światła z wbudowanymi diodami LED w szklarniach staje się powszechny w ogrodnictwie ze względu na właściwości fizyczne LED, które pozwalają na zmniejszenie zużycia energii oraz na precyzyjne dostosowanie widma światła do wymagań uprawianych roślin. Zastosowanie oświetlaczy LED w procesach hodowli zbóż jest nowością. W artykule zaprezentowano wyniki uzyskane przy użyciu źródła światła LED, zbudowanego w oparciu o diody emitujące białe światło, w porównaniu z oświetlaczem sodowym i światłem dziennym. Wykazano, że oświetlacz LED może być wykorzystywany do oświetlenia szklarni w procesach hodowli zbóż. Przyrosty siewek oraz terminy kłoszenia były porównywalne pomiędzy roślinami uprawianymi pod lampami: HPS oraz LED i jednocześnie akceptowalnie większe niż parametry uzyskane dla roślin uprawianych w letnim świetle dziennym.

Słowa kluczowe: LED, *Triticum aestivum*, *Hordeum vulgare*, *Avena sativa*, szklarnia

*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 stanowi część doktoratu P. Stefańskiego

♦autor do korespondencji: k.rybka@ihar.edu.pl

Modern cereal crops breeding takes place under great pressure of time. Therefore, greenhouses are used to accelerate the breeding process which, in our latitude, requires lighting. The idea of using LEDs in greenhouses is becoming popular in horticulture due to LEDs physical properties, which allow on reduction of electricity consumption and on precise adjustment of the light spectrum to the requirements of cultivated plants. The usage of LED lightings in cereal breeding is a novelty. This article presents results obtained using the LED illuminator, based on white light emitting diodes in comparison to the high pressure sodium lamp (HPS) and a daylight. It has been shown that the LED illuminator can be used as a light source in greenhouses designed for cereals breeding. The seedlings elongation growth and number of days to heading were comparable between plants grown under HPS and LEDs and were greater in acceptable rate than results obtained for plants grown under summer daylight.

Key words: LED, *Triticum aestivum*, *Hordeum vulgare*, *Avena sativa*, greenhouse

WPROWADZENIE

W klasycznej hodowli zbóż na wytworzenie odmiany potrzebne było ponad 15 lat, dziś natomiast uzyskanie odmiany jest możliwe w przeciągu 5 lat (Ortiz i in., 2007). Wynika to ze zmiany metod hodowlanych, wprowadzeniu metodyk SSD (ang. Single Seed Descent) oraz DH (ang. Double Haploids), które dzięki zastosowaniu szklarni pozwalają na prowadzenie prac przez cały rok, a nie jedynie w sezonie wegetacyjnym. Jednym z ważnych elementów nowoczesnej szklarni w naszej szerokości geograficznej jest oświetlenie. Możliwość wykorzystania nowoczesnych systemów oświetlaczy zbudowanych w oparciu o diody emitujące światło (LED) jest tematem niniejszego artykułu.

Obecnie w szklarniach najczęściej stosuje się lampy sodowe (HPS) z powodu ich dużej mocy. W rzeczywistości jednak emitują one światło, które w małej części jest kompatybilne z wymaganiami fotosyntetycznymi roślin. HPS nie emitują światła niebieskiego (450–470 nm) a maksymalne natężenie ich widma kumuluje się w zakresie barwy pomarańczowej (ok. 600 nm). Dodatkową wadą lamp sodowych są straty ciepłe wynikające z relatywnie niskiej efektywności (Tabaka i Derlecki, 2012; Gruszecki i in., 2012). Stąd pomysł budowania oświetlaczy z diodami LED i instalowania ich w szklarniach, co staje się powszechne w ogrodnictwie (Owen i Lopez, 2015). Wyszukiwarka Google dla zapytania „szklarnia Grow LED” dała ponad 2,5 mln wpisów w styczniu 2014, natomiast w marcu 2016 ponad 40 mln. Wzrost liczby firm produkujących oświetlacze szklarniowe wynika z rozwoju technologii produkcji oświetlaczy LED, gdyż takie lampy prócz różnorodności barw dają wyraźnie odczuwalne korzyści ekonomiczne dla użytkowników oświetlaczy. W 2014 roku przyznano Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki za wynalezienie wydajnej diody emitującej niebieskie światło (Heber, 2014; Nanishi, 2014). Największymi walorami diod LED są ich właściwości fizyczne: bardzo niskie zużycie energii oraz wydłużona żywotność w porównaniu do systemów oświetleniowych powszechnie stosowanych w szklarniach (Tabaka i Darlecki, 2012). Dodatkowo światło emitowane przez pojedynczy LED charakteryzuje się widmem o bardzo wąskim paśmie i w związku z tym spektrum oświetlaczy może być dostosowane do potrzeb poszczególnych upraw (Darko i in., 2014), co może wpływać na zmniejszone zużycie energii elektrycznej (Yeh i Chung, 2009). Niezwykłą i ważną zaletą oświetlaczy

LED jest niska bezwładność, co oznacza, że od razu po włączeniu uzyskują one pełną moc świecąc z zaplanowanym natężeniem. Zapewnia to możliwość precyzyjnego sterowania za pomocą mikroprocesorów. Obecnie diody LED są z ekonomicznego punktu widzenia najbardziej efektywnym źródłem światła sztucznego co powoduje, iż rośnie zapotrzebowanie na takie źródła światła (Tabaka i Darlecki, 2012; Wojciechowska i in., 2015; Wojciechowska i in., 2016).

Pierwsze eksperymenty z użyciem czerwonej diody LED w uprawie zbóż zostały przeprowadzone w latach '90 ubiegłego wieku. Stwierdzono, że światło niebieskie (uzyskane wówczas ze świetlówek, gdyż niebieskie diody nie były jeszcze produkowane na skalę przemysłową) i czerwone w stosunku 1: 9 daje możliwość uzyskania plonów pszenicy porównywalnych z wynikami uzyskanymi przy użyciu świetlówek szklarniowych (Goins i in., 1997). Mimo, że literatura naukowa dotycząca fotomorfogenezy jest bardzo bogata, nie ma systematycznej wiedzy na temat metod uprawy rośliny rolniczych pod panelami LED (Mitchell, 2015; Kong i Okajima, 2016). W obecnej publikacji prezentowane są wstępne badania porównawcze wpływu oświetlacza LED na wzrost siewek zbóż.

MATERIAŁY I METODY

Do badań wykorzystano odmiany genetycznie ustabilizowane — pszenicę jarą Kamelia (*Triticum aestivum* L.), jęczmień jary Radek (*Hordeum vulgare* L.) i owies Bingo (*Avena sativa* L.). Nasiona zostały wysiane w multiplatach 73 komórkowych, w 7 powtórzeniach każdego gatunku. Badania prowadzone były w szklarni Hodowli Roślin Strzelce Sp. z o.o. Grupa IHAR w Strzelcach (52° 18'41, 0"N 19° 24'22, 4"E). Eksperyment został rozpoczęty 25 czerwca 2015 roku i był prowadzony 9 tygodni. Multiplaty zostały umieszczone w komorze szklarniowej, w której była zainstalowana lampa LED oraz lampa sodowa. Pod każdą z nich multiplaty były ustawione według tego samego schematu natychmiast po siewie. Kontrolę stanowiły rośliny ustawione w szklarni pod naturalnym światłem słonecznym. Rośliny rosły w średniej temperaturze 22°C i przy wilgotności 80%. W doświadczeniu zastosowano oświetlacz LED 520W produkcji SpectroLight, Tomasz Braczkowski, zbudowany w oparciu o diody emitujące białe światło oraz lampę sodową HPS 600W (High Pressure Sodium) ze źródłem światła Lucalox™.

Natężenie światła mierzono w odległości 1 m od źródła. Widmo światła było mierzone za pomocą spektrometriem wyprodukowanego przez GL Optic Sp. z o.o. (Puszczykowo, Polska). Oświetlacze zostały zainstalowane w taki sposób, żeby zapewnić jednolite natężenie światła na powierzchni zajętej przez multiplaty. Komory szklarniowe były zacienione czarną folią w celu zminimalizowania przenikania promieni słonecznych, aby określić pod którym oświetlaczem był prawidłowy wzrost siewek zbóż. Rośliny były uprawiane w cyklu dnia i nocy 12/12 h z oświetleniem włączonym od 7 do 19. Wysokość siewek była mierzona 3 razy w odstępach 7 dni począwszy od 7 dnia po kiełkowaniu.

WYNIKI I DYSKUSJA

Przed rozpoczęciem doświadczenia źródła światła zostały porównane na podstawie pomiarów natężenia oraz widma (tab. 1, rys. 1).

Tabela 1

Podstawowa charakterystyka źródeł światła (natężenie [lx] i $[\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$, radiancja $[\text{W m}^{-2}]$ i radiancja fotosyntetycznie aktywna (PAR) $[\text{mW m}^{-2}]$) wykorzystanych w doświadczeniu: kontrola - światło dzienne (przykładowe widmo), HPS 600 W, Oświetlacz LED 540 W oraz temperatura barwowa tych źródeł. Podano wartości dla całego mierzonego spektrum 350–750 [nm] oraz z podziałem na zakresy: 430–480 [nm] (światło niebieskie), 505–560 [nm] (światło zielone), 640–750 [nm] (światło czerwone). Analiza widma i całkowanie wartości mierzonych parametrów dla poszczególnych zakresów widma zostało wykonane przy użyciu oprogramowania Spektroradiometru GL-Optic
Basic characteristics of light sources (intensity [lx] and $[\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$, radiance $[\text{W m}^{-2}]$ and photosynthetically active radiation (PAR) $[\text{mW m}^{-2}]$) as well as a color temperature of whole spectrum [K] of light sources used in the experiment: daylight-control (example spectrum), HPS 600 W and LED 540 W illuminator. The values for the entire measured spectrum 350–750 [nm] in parallel with ranges: 430–480 [nm] (blue light), 505–560 [nm] (green light), 640–750 [nm] (red light) are given. Spectrum analysis and integration of the measured parameter values for individual spectral ranges was made using the GL-Optic Spectroradiometer software

Źródło światła Light source	Natężenie światła Light intensity		Radiancja Radiation	PAR — Radiancja fotosynt. aktywna Photosynthetic Active Radiation	Temperatura barwowa Color temperature
	[lx]	$[\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$	$[\text{W m}^{-2}]$	$[\text{mW m}^{-2}]$	[K]
Kontrola — światło dzienne* — Control — day light *					
Zakres — range [nm]:					
350–750	105000	1891	499	289	5728
430–480	3113	261	68	64	
505–560	38799	298	68	29	
640–750	2478	440	136	68	
HPS 600 W					
Zakres — range [nm]:					
350–750	13468	192	42	25	2631
430–480	79	7	2	2	
505–560	1204	8	2	1	
640–750	367	41	10	6	
LED 520 W					
Zakres — range [nm]:					
350–750	36564	529	115	72	3280
430–480	499	49	13	12	
505–560	10820	81	18	8	
640–750	1008	103	22	15	

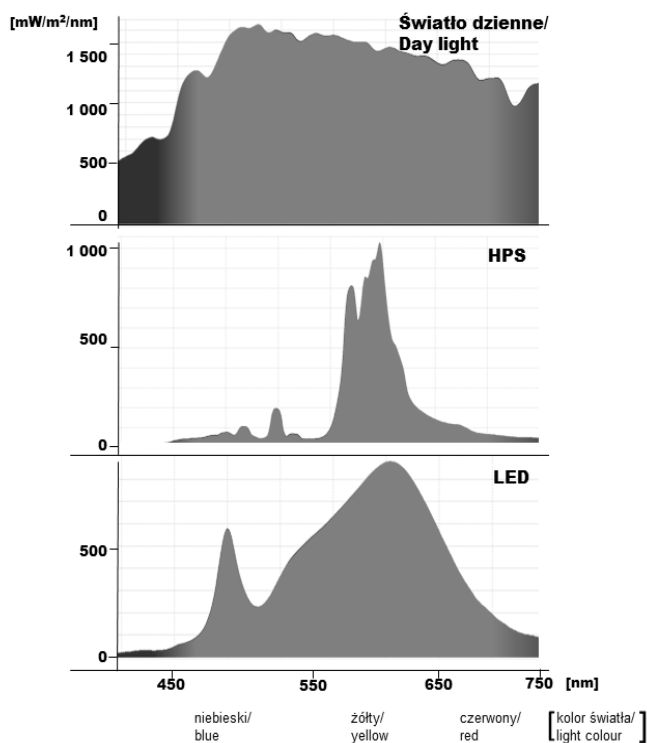
* wartość przykładowa, pomiar 2016.04.17 godz. 11.40

* example value measured 2016.04.17 at 11.40 AM

Natężenie światła mierzono w dwóch różnych jednostkach: gęstości strumienia fotonów wykorzystywanych w fotosyntezie (PPFD — Photosynthetic Photon Flux Density) oraz natężenia światła widzianego przez ludzkie oko. PPFD jest zdefiniowany jako liczba fotonów promieniowania fotosyntetycznie aktywnego (PAR) padających na jednostkę powierzchni w określonym czasie i wyrażany jest w $[\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$, podczas gdy natężenie oświetlenia odbieranego przez wzrok ludzki jako „jasność źródła światła”,

w znormalizowanym modelu ludzkiej percepcji wzrokowej wyrażane jest w luksach [lx] (Ritchie, 2010). Do pomiaru widma i natężenia wykorzystywane są spektrometry, które w zależności od sposobu kalibracji umożliwiają pomiar różnych parametrów: np. w fotografii wykorzystywane są światłomierze pozwalające na ocenę natężenia światła w [lx], a w badaniach z zakresu fizjologii roślin mierniki PAR. Wykorzystany przez nas spektrometr umożliwił pomiar zarówno PPF, PAR jak i natężenia światła w luksach, przy jednoczesnej rejestracji widma światła widzialnego poszczególnych źródeł.

Jak widać z tabeli 1, postrzegana przez wzrok ludzki, jasność sztucznego światła była wielokrotnie mniejsza w porównaniu do światła słonecznego: lampy LED 2,8 a HPS 7,8 razy.



Rys. 1. Rozkład widmowy promieniowania (względne natężenie promieniowania w funkcji długości fali) [mW/m²/nm] źródeł światła stosowanych w doświadczeniu do uprawy roślin pszenicy, jęczmienia i owsa w warunkach szklarniowych: światło dzienne (Kontrola) oraz w zaciemnionej części szklarni światło sztuczne: HPS 600 W (lampa sodowa) i oświetlacz LED 520 W produkcji SpectroLight Tomasz Braczkowski, zbudowany w oparciu o diody emitujące białe światło

Fig. 1. Spectral distribution of radiation (relative intensity of radiation as a function of wavelength) [mW/m²/nm] of light sources used in the experiment for growing wheat, barley and oat under greenhouse conditions: daylight (control) and in the darkened part of the greenhouse artificial light: HPS 600 W (sodium lamp) and LED 520 W illuminator by SpectroLight Tomasz Braczkowski, based on diodes emitting white light

Natomiast proporcja strumienia fotosyntetycznie aktywnych fotonów [$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$] sztucznych źródeł światła była jeszcze mniejsza w porównaniu z widmem światła dziennego: w przypadku lampy LED 3,6 a w przypadku HPS prawie dziesięciokrotnie. W konsekwencji natężenie strumienia światła generowanego przez lampę LED, wyrażane we wszystkich porównywanych wielkościach fizycznych: zarówno w [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], [mW m^{-2}] jak i w [$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$] były prawie trzykrotnie wyższe w porównaniu z HPS. Natomiast proporcje natężenia światła, a w zasadzie jego jasności [lx] w modelu ludzkiej percepcji wzrokowej, wynosiły kolejno: HPS/ LED/ światło dzienne: 1/ 2,7 / 7,8. Natomiast analogiczna proporcja w porównaniu strumienia fotonów [$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$] wynosiła: 1/ 2,7 / 11,8. Proporcja: HPS/ światło dzienne, jest korzystniejsza dla HPS w przypadku jasności strumienia wyrażanych w [lx]. Różnica wynika z selektywnego sposobu działania ludzkiego oka i jego większej czułości na światło zielone i żółte. To drugie stanowi główną część widma generowanego przez HPS (Elvidge i in., 2010). Natomiast różnice pomiędzy całkowitą radiancją [W m^{-2}] a radiancją fotosyntetycznie aktywną (PAR) [m W m^{-2}] (tab. 1), dla każdego ze źródeł, wynikają z faktu, iż PAR to zakres widma absorbowanego w sposób selektywny przez anteny chlorofilowe, z maksimami absorpcji w zakresie światła niebieskiego: 465 i 454 [nm] oraz w zakresie światła czerwonego: 642 i 662 [nm], dla chlorofilu *a* oraz *b*, odpowiednio. Tak więc jedynie niewielka część radiancji z zakresu widzialnego jest kompatybilna z antenami chlorofilowymi (Gruszecki i in., 2012). Przeprowadzona dyskusja pokazuje, że dla celów uprawy roślin w szklarniach należy wykonywać pomiary porównawcze strumieni fotonów PPFD i radiancji fotosyntetycznie aktywnej za pomocą dedykowanych mierników, gdyż ocena natężenia światła „na oko” może być bardzo złudna, szczególnie w przypadku źródeł światła o różnej charakterystyce.

Testowane w doświadczeniu źródło światła LED posiadało wyższe parametry natężenia, PPFD oraz PAR przy deklarowanym mniejszym poborze mocy w porównaniu z HPS, gdyż duża część widma HPS jest emitowana jako ciepło, w zakresie podczerwieni. Tak więc efektywność energetyczna lampy LED była wyższa niż HPS. Szczegółowe badania energetycznej efektywności źródeł światła LED w porównaniu z lampami HPS zostały przeprowadzone przez Wojciechowską (Wojciechowska i in., 2015; Wojciechowska i in., 2016) dla szklarniowej uprawy sałaty. Autorzy stwierdzili, że najefektywniejszymi były źródła światła charakteryzujące się widmem dwupasmowym o proporcji pasma czerwonego (R) do niebieskiego (B) 90R/10B. Dowiedli, że źródła światła zbudowane w oparciu o diody emitujące ciągłe widmo były mniej efektywne niż oświetlacze HPS, w przypadku, gdy porównywano ilość energii elektrycznej [kWh] potrzebnej na wytworzenie 100 [g] zielonej masy (17,2 vs. 10,6 [kWh/100 g]). Również ilość poboru energii elektrycznej w czasie realizacji doświadczenia wynosił: 441 [W] w przypadku źródeł światła o widmie białym emitowanym przez LED, 648 dla HPS oraz 278 w przypadku źródła o charakterystyce 90R/10B.

W przypadku źródeł światła wykorzystywanych w szklarniach w procesach hodowli zbóż nie chodzi o ilość plonu (ziarna), a tym bardziej o ilość zielonej masy uzyskanej z 1 m^2 powierzchni szklarniowej a o jak najkrótszy czas potrzebny na wejście w fazę rozwoju generatywnego oraz o zwięzły pokrój roślin, dyktowany łatwością pielęgnacji obiektów

niskich. W związku z tym pobór mocy jest wystarczającym parametrem do porównań efektywności energetycznej źródeł światła stosowanych w szklarniach hodowli zbóż. W ogrodnictwie ważne są również aspekty fizjologiczne i biochemiczne wpływające na ilość i jakość plonu, a nawet socjologiczne, ze względu na komfort pracy ludzi obsługujących szklarnię (Ou i in., 2015; Gaston i in., 2015; Pattinson i in., 2016; (Wojciechowska i in., 2015)). W naszym doświadczeniu różnica w deklarowanym przez producentów poborze mocy wynosiła 10%.

Nie tylko intensywność strumieni światła sztucznego lecz również ich spektra należy uwzględniać w porównaniach (Wojciechowska i in., 2015). Widmo światła słonecznego, które było kontrolą w niniejszym doświadczeniu, charakteryzuje się ciągłym zakresem od około 380 nm (barwa fioletowa granicząca z promieniami UV) do około 780 nm (daleka czerwień granicząca z podczerwienią) (rys. 1). Rozkład widmowy światła słonecznego ma wahania proporcji poszczególnych fal, ze zmianami wynikającymi z położenia Ziemi względem Słońca w cyklu dobowym i rocznym a także ze względu na zachmurzenie (Ge i in., 2011). Sztuczne światło generowane przez oświetlacze niekoniecznie musi charakteryzować się widmem ciągłym (Pocock, 2015). Zależnie od typu oraz od producenta może charakteryzować się różnymi proporcjami poszczególnych zakresów fal (rys. 1, tab. 1). Lampa LED zastosowana w doświadczeniu, w porównaniu z HPS, charakteryzowała się dwukrotnie wyższym natężeniem w zakresie światła czerwonego (640–750 [nm]), siedmiokrotnie w zakresie światła niebieskiego (430–480 [nm]) i przeszło dziewięciokrotnie w zakresie światła zielonego (505–550 [nm]). Ośmiokrotnie jaśniejsze niż HPS światło słoneczne, w zakresie widma światła czerwonego miało dziesięciokrotnie wyższą radiancję, a w zakresie światła niebieskiego i zielonego prawie 40-krotnie wyższą. Proporcje światła niebieskie : zielone : czerwone wynosiły w przypadku światła dziennego 1 : 1,14 : 1,69. Dla lampy HPS: 1 : 1,21 : 5,95 oraz dla LED źródła światła: 1 : 1,63 : 2,06.

Diody generujące widmo ciągłe stosuje się z powodu fotomorfogenetycznych właściwości światła o barwie zielonej oraz ze względu na komfort pracy obsługi szklarni (Golovatskaya i Karnachuk, 2015; Zhang i in., 2016). Promieniowanie emitowane przez lampę sodową, to w przeszło połowie promieniowanie ciepłe, a w zakresie widzialnym w 90% to światło żółte (560–620 nm) nie absorbowane przez chlorofil. Lampa sodowa nie generuje w zasadzie światła niebieskiego i jedynie w nikłym procencie światło czerwone (rys. 1) (Tabaka i Derlecki, 2012; Elvidge i in., 2010). Oświetlacz LED został zbudowany z wykorzystaniem tzw. diody białej, dającej widmo ciągłe i został wzbogacony światłem niebieskim z widocznym pikiem w zakresie 475 nm. Proporcja światła niebieskiego do czerwonego była ok. 40% większa w porównaniu z typową lampą sodową (Randal i Lopez, 2014). Zastosowanie tzw. „białej diody” miało na celu upodobnienie widma generowanego przez źródło LED do widma światła słonecznego. Dodanie do zakresów kompatybilnych z antenami chlorofilowymi (niebieskiego i czerwonego) widma ciągłego z dużym udziałem światła żółtego, spoza zakresu bezpośrednio absorbowanego przez anteny chlorofilowe a dominującego w powszechnie stosowanych lampach HPS (Cope i Bugbee, 2013), ma również na celu upodobnienie widma źródła światła LED do HPS, gdyż sprawdza się ono w uprawach szklarniowych.

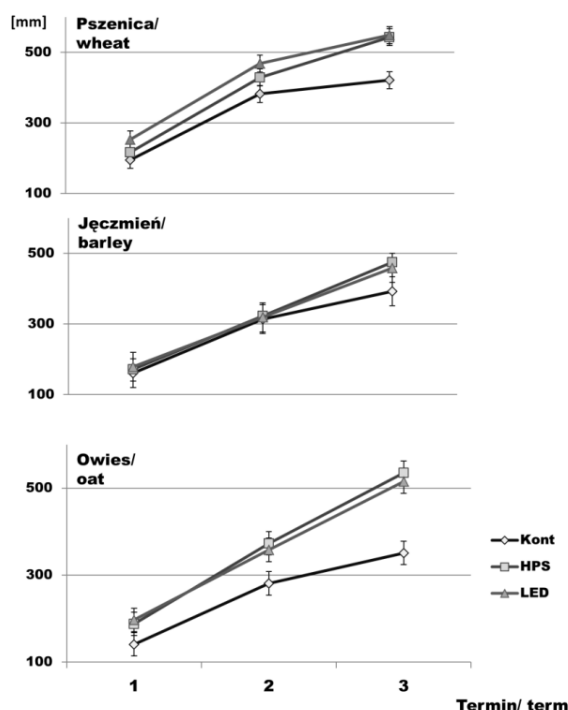
Ostatnie doniesienia (Han i in., 2017) wskazują że zastosowanie widma czerwono-żółtoniebieskiego w uprawie sałaty daje 2–3-krotne przyspieszenie wzrostu liści i suchej masy. Jednocześnie widmo tzw. „białej diody” obejmuje zakres światła zielonego, o funkcji fotomorfogenetycznej, którego znaczenie dla prawidłowego wzrostu i rozwoju roślin jest coraz szerzej badane (Glovatskaya i Karnachuk, 2015). Spektrum ciągle generowane przez tzw. „biały LED” zostało wzbogacone o pasmo niebieskie nie tylko ze względu na anteny chlorofilowe lecz z tego względu, że światło niebieskie jest rozpoznawane przez kryptochromy i wpływa na zahamowanie wzrostu elongacyjnego hipokotyli (Ahmad i in., 2002; Christophe i in., 2006). W hodowli szklarniowej zbóż, która prowadzona jest w celu przyspieszenia procesów ssd (single seed descent), oczekiwanym, wygodnym w pielęgnacji pokrojem roślin są rośliny niskie i zwarte, w sytuacji, gdy rośliny zbożowe uprawiane są na stołach szklarniowych.

Ponieważ naturalne światło słoneczne jest optymalne dla prawidłowego wzrostu i rozwoju roślin w warunkach naturalnych, w niniejszym doświadczeniu kontrolę stanowiły rośliny stojące w niezacienionej i nieoświetlanej części szklarni, gdyż doświadczenie prowadzono w czasie wiosenno-wczesnoletnim.

Tempo wzrostu wegetatywnego oceniano na podstawie wysokości roślin mierzonych w 7-dniowych interwałach. Po pierwszym tygodniu obserwacji największą wysokość pszenicy i owsa osiągnęły rośliny pod lampą LED (rys. 2), przy czym różnica dla roślin oświetlanych sztucznymi źródłami światła nie była istotna statystycznie. Natomiast najmniejszą wysokością, średnio o ok. 20%, charakteryzowały się rośliny kontrolne tych gatunków.

Po 14 dniach wzrostu w sztucznym świetle siewki pszenicy i owsa wydłużyły się w porównaniu z kontrolą, natomiast przyrost siewek jęczmienia przebiegał z równą intensywnością we wszystkich wariantach doświadczenia. W 21 dniu doświadczenia rośliny pszenicy uprawiane pod oświetleniem sztucznym, niezależnie od jego rodzaju, były wyższe ok. 25% w porównaniu do roślin kontrolnych, jednakże ich przyrost był nieznacznie mniejszy niż przyrost jęczmienia i owsa, które cechowało liniowe tempo przyrostu. W przypadku owsa różnica pomiędzy tempem wzrostu w świetle naturalnym w porównaniu do sztucznego była jeszcze wyraźniejsza niż u pszenicy i wynosiła ok. 40%. (rys. 2). Zastosowanie sztucznych źródeł światła w podobny sposób wpływało na pokrój roślin, w ramach gatunku. Nie zaobserwowano zdecydowanie silniejszego zahamowania wzrostu elongacyjnego w skutek wzbogacenia widma LED o pasmo niebieskie. Uzyskane wyniki są zgodne z ostatnimi doniesieniami literaturowymi, dotyczącymi 7 różnych gatunków roślin zarówno warzywnych jak i zbóż, w tym pszenicy, badanych w zmiennym świetle generowanym przez źródła LED-owe zbudowane w oparciu o białą diodę (Snowden i in., 2016). W przytoczonym doświadczeniu wykazano, że przeszło dwukrotny wzrost natężenia światła niebieskiego nie powodował zahamowania wzrostu pszenicy w przeciwieństwie do innych badanych gatunków, niezależnie od wielkości całkowitego strumienia fotonów (PPFD). Poza tym, nie zaobserwowano wyraźnego wpływu światła zielonego na wzrost roślin, przy zmianie jego udziału w widmie od 0% do 30% oraz brak zahamowania wzrostu roślin uprawianych w świetle, które w 93% składało się z pasma zielonego. Zjawisko to

tłumaczono odpowiedzią typu „shade avoidance” (Snowden i in., 2016). Podsumowując, nie zauważono dużej różnicy w pokroju roślin w zależności od stosowanego sztucznego źródła światła.



Rys. 2. Wysokość siewek pszenicy, jęczmienia i owsa [mm] w warunkach szklarniowych w świetle dziennym (Kont.) oraz w zaciemnionej części szklarni w świetle sztucznym: HPS 600 W (lampa sodowa) i oświetlacz LED 520 W, zbudowany w oparciu o diody emitujące białe światło. Pomiary wykonano w dniach: 7, 14 i 21 wzrostu roślin, oznaczonych jako Termin 1, 2 i 3 (odpowiednio).

Na wykresach zaznaczono wartości statystycznie istotnych najmniejszych różnic (LSD) dla $P \geq 95\%$.
 Fig. 2. Height of wheat, barley and oat seedlings [mm] grown under greenhouse conditions with lightings: daylight (control, marked as Kont) and in the darkened part of the greenhouse artificial light sources: HPS 600 W (sodium lamp) and LED 520 W, based on diodes emitting white light. Measurements were made on days 7, 14 and 21 of plant growth, marked as term 1, 2 and 3 (respectively). The charts show the least significant difference (LSD) values for $P \geq 95\%$

Drugim celem doświadczenia była odpowiedź na pytanie, czy testowane lampy wpływają na termin kłoszenia. Wbrew obawom stwierdzono, że zastosowane światło LED nie spowodowało spowolnienia rozwoju morfologicznego w porównaniu do oświetlacza HPS (tab. 2). W przypadku jęczmienia liczba dni do kłoszenia była mniejsza niż u roślin uprawianych pod HPS, a jedynie o 1 dzień dłuższa niż u roślin kontrolnych. Natomiast w przypadku pszenicy i owsa zmiany morfologiczne przebiegały w jednakowym tempie pod obydwooma sztucznymi źródłami światła.

Tabela 2

Liczba dni do kłoszenia roślin pszenicy, jęczmienia i owsa uprawianych w warunkach szklarniowych w świetle dziennym (Kontrola) oraz w zaciemnionej części szklarni w świetle sztucznym: HPS 600 W (lampa sodowa) i oświetlacz LED 520W produkcji SpectroLight Tomasz Braczkowski, zbudowany w oparciu o diody emitujące białe światło

The number of days to heading of wheat, barley and oat seedlings grown under greenhouse conditions with lightings: daylight (Control) and in the darkened part of the greenhouse artificial light sources: HPS 600 W (sodium lamp) and LED 520W illuminator by SpectroLight Tomasz Braczkowski, based on diodes emitting white light

Źródło światła Light source	Liczba dni do kłoszenia Number of days to heading		
	pszenica — wheat	jęczmień — barley	owies — oat
Kontrola (światło dzienne) Control (daylight)	57	55	58
HPS	59	58	59
LED	59	56	59

OBSERWACJE I WNIOSKI

1. Nie zauważono różnic wpływu rodzaju porównywanych oświetlaczy (HPS vs. źródło światła LED, o widmie ciągłym wzbogaconym o pasmo niebieskie) na wzrost elongacyjny siewek zbóż. Przyrosty siewek uprawianych w sztucznym świetle były większe ok. 25% u pszenicy i ok. 40% u jęczmienia i owsa, niż u siewek kontrolnych, uprawianych w naturalnym świetle dziennym.
2. Zauważono różnice wpływu rodzaju światła sztucznego na tempo zmian morfologicznych u jęczmienia. Rośliny jęczmienia, uprawiane pod oświetlaczem LED-owym zbudowanym w oparciu o białą diodę, wykłosiły się 2 dni wcześniej niż rośliny jęczmienia uprawiane pod oświetlaczem HPS i o 1 dzień później niż rośliny kontrolne uprawiane w świetle dziennym. Termin kłoszenia pszenicy i owsa był niezależny od źródła światła sztucznego. W porównaniu z kontrolą u owsa był on o 1, a u pszenicy o 2 dni późniejszy.
3. Oświetlacz LED zbudowany w oparciu o białą diodę może być stosowany w szklarniach przeznaczonych do hodowli zbóż, gdyż uzyskane wyniki są porównywalne z wynikami spod lampy HPS, a tempo rozwoju w sposób znaczący nie jest wolniejsze w porównaniu z warunkami światła dziennego.

LITERATURA

- Christophe A., Mouliat B., Varlet-Grancher C. 2006. Quantitative contributions of blue light and PAR to the photocontrol of plant morphogenesis in *Trifolium repens* (L.). *J. Exp. Bot.* 57: 2379 — 2390.
- Cope K. R., Bugbee B. 2013. Spectral Effects of Three Types of White Light-emitting Diodes on Plant Growth and Development: Absolute versus Relative Amounts of Blue Light. *HortScience* 48: 504 — 509.
- Darko E., Heydarizadeh P., Schoefs B., Sabzalian M. R. 2014. Photosynthesis under artificial light: The shift in primary and secondary metabolism. *Phil. Trans. R. Soc. B: Biol. Sci.* 369: e 20130243.
- Elvidge C. D., Keith D. M., Tuttle B. T., Baugh K. E. 2010. Spectral Identification of Lighting Type and Character. *Sensors* 10: 3961 — 3988.

- Gaston K. J., Visser M. E., Hölker F. 2010. The biological impacts of artificial light at night: the research challenge. *Phil. Trans. R. Soc. B: Biol. Sci.* 370: e20140133.
- Ge S., Smith R. G., Jacovides C. P., Kramer M. G., Carruthers R. I. 2011. Dynamics of photosynthetic photon flux density (PPFD) and estimates in coastal northern California. *Theor. Appl. Climatol.* 105: 107 — 118.
- Goins G. D., Yorio N. C., Sanwo M. M., Brown C. S. 1997. Photomorphogenesis, photosynthesis, and seed yield of wheat plants grown under red light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental blue lighting. *J. Exp. Bot.* 48: 1407 — 1413.
- Golovatskaya I., Karnachuk R. 2015. Role of green light in physiological activity of plants — review. *Russ. J. Plant Physiol.* 62: 727 — 740.
- Gruszecki W. I., Zubik M., Luchowski R., Grudzinski W., Gryczynski Z., Gryczynski I. 2012. Spectroscopy of photosynthetic pigment-protein complex LHCII. *Acta Phys. Polonica A*, 121: 397 — 400.
- Han T., Vaganov, V., Cao, S., +7, Tu, M., 2017. Improving “color rendering” of LED lighting for the growth of lettuce. *Nature Scientific Reports* 7:45944, DOI: 10.1038/srep45944; <https://www.nature.com/articles/srep45944.pdf>.
- Heber J. 2014. Nobel Prize: Akasaki, Amano & Nakamura. *Nat. Phys.* 10: 791 — 791.
- Kong S., Okajima K. 2016. Diverse photoreceptors and light responses in plants. *J. Plant Res.* 129: 111 — 114.
- Mitchell C. A. 2015. Academic Research Perspective of LEDs for the Horticulture Industry. *HortScience* 50: 1293 — 1296.
- Nanishi Y. 2014. Nobel Prize in Physics: The birth of the blue LED. *Nat. Photon.* 8: 884 — 886.
- 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.
- Ou J., Liu X., Li X., Li M., Li W. 2015. Evaluation of NPP-VIIRS Nighttime Light Data for Mapping Global Fossil Fuel Combustion CO(2) Emissions: A Comparison with DMSP-OLS Nighttime Light Data. *PLoS ONE* 10: e0138310.
- Owen W. G., Lopez R. G. 2015. End-of-production Supplemental Lighting with Red and Blue Light-emitting Diodes (LEDs) Influences Red Pigmentation of Four Lettuce Varieties. *HortScience* 50: 676 — 684.
- 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.
- Pocock T. 2015. Light-emitting Diodes and the Modulation of Specialty Crops: Light Sensing and Signaling Networks in Plants. 2015. *HortScience* 50: 1281 — 1284.
- Ritchie R. 2010. Modelling photosynthetic photon flux density and maximum potential gross photosynthesis. *Photosynthetica* 48: 596 — 609.
- Snowden, M. C., Cope, K. R., Bugbee, B. 2016. Sensitivity of seven diverse species to blue and green light: interactions with photon flux. *PLoS ONE* 11, e0163121.
- Tabaka P., Derlecki S. 2012. Analysis of electrical parameters of light sources used by household and municipal customers. *Electr. Rev.* 88: 207 — 212.
- Wojciechowska R., Długosz-Grochowska O., Kołton A., Żupnik M. 2015. Effects of LED supplemental lighting on yield and some quality parameters of lamb's lettuce grown in two winter cycles. *Scientia Horticulturae* 187: 80 — 86.
- Wojciechowska R., Kurpaska S., Malinowski M., Sikora J., Krakowiak-Bal A., Długosz-Grochowska O. 2016. Effect of supplemental LED lighting on growth and quality of *Valerianella locusta* L. and economic aspects of cultivation in autumn cycle. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus* 15: 233 — 244.
- 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.
- Zhang S. X., Huang D. D., Yi X. Y., Zhang S., Yao R., Li C.G., Liang A., Zhang X. P. 2016. Rice yield corresponding to the seedling growth under supplemental green light in mixed light-emitting diodes. *Plant Soil Environ.* 62: 222 — 229.