

Krzysztof KLAMKOWSKI
Waldemar TREDER
Jadwiga TREDER
Andrzej PUTERNICKI
Edmund LISAK

WPŁYW DOŚWIETLANIA LAMPAMI SODOWYMI I LED NA AKTYWNOŚĆ FOTOSYNTETYCZNA ORAZ WZROST ROŚLIN POMIDORA

STRESZCZENIE *Rośliny pomidora uprawiane w szklarni w okresie jesienno-zimowym (listopad – grudzień) doświetlano przy pomocy lamp sodowych lub LED (diody emitujące światło czerwone, niebieskie oraz w zakresie bliskiej podczerwieni). Kombinację kontrolną stanowiły rośliny rosnące w warunkach naturalnego światła. Przeprowadzono pomiary intensywności wymiany gazowej oraz natężenia zielonej barwy liści (względna zawartość chlorofilu). Po zakończeniu doświadczenia wykonano analizę budowy morfologicznej roślin mierząc masę organów roślinnych, wysokość roślin, średnicę pędu oraz powierzchnię liści. Doświetlanie roślin spowodowało zwiększenie natężenia wymiany gazowej i zawartości chlorofilu w liściach a także intensywniejszy wzrost. Ponadto wykazano zróżnicowanie pomiędzy roślinami z kombinacji doświetlanych. Rośliny doświetlane przy pomocy diod elektroluminescencyjnych były wyższe, miały większą masę, a w ich liściach stwierdzono więcej chlorofilu w porównaniu kombinacją, w której użyto lamp sodowych.*

Słowa kluczowe: wymiana gazowa, fotosynteza, chlorofil, fotomorfogeneza

dr inż. Krzysztof KLAMKOWSKI¹⁾
e-mail: krzysztof.klamkowski@inhort.pl

**prof. dr hab. Waldemar TREDER¹⁾, dr Jadwiga TREDER¹⁾
mgr inż. Andrzej PUTERNICKI²⁾, mgr inż. Edmund LISAK²⁾**

1) Instytut Ogrodnictwa w Skierniewicach
2) Zakład Techniki Świetlnej i Promieniowania Optycznego,
Instytut Elektrotechniki w Warszawie

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 256, 2012

1. WSTĘP

Światło jest jednym z najważniejszych czynników środowiskowych wywierających silny wpływ na procesy życiowe roślin [2, 9, 13]. Promieniowanie świetlne jest wykorzystywane przez rośliny jako źródło energii podczas fotosyntezy. Wpływa także na szereg innych, niezależnych od fotosyntezy procesów związanych ze wzrostem i rozwojem roślin (fotomorfogeneza). Procesy te zachodzą przez cały cykl życiowy rośliny, od kiełkowania poprzez rozwój wegetatywny (wydłużanie pędów, rozwój liści), rozwój generatywny (kwitnienie i owocowanie) po starzenie się roślin. W wielu pracach wykazano istnienie silnej zależności pomiędzy dostępnością światła a produktywnością roślin [15, 24]. Niedostateczna ilość i/lub nieodpowiedni skład spektralny światła może powodować nie tylko ograniczenie wielkości uzyskiwanego plonu, ale również pogorszenie jego jakości [27].

Polska znajduje się w strefie klimatu umiarkowanego, charakteryzującego się deficytem (z punktu widzenia potrzeb roślin) naturalnego światła słonecznego w okresie jesienno-zimowym oraz wczesną wiosną. Dlatego też doświetlanie roślin z wykorzystaniem sztucznych źródeł światła jest od wielu lat stosowanym, choć droгим środkiem intensyfikacji szklarniowej produkcji roślinnej.

Wydatki na energię cieplną oraz elektryczną stanowią ok. 10 – 30% całkowitych kosztów produkcji roślinnej pod osłonami [19]. Większość energii zużywanej w uprawach szklarniowych jest nadal otrzymywana ze spalania paliw kopalnych, co wywiera negatywny wpływ na środowisko naturalne. Dlatego też nowe technologie doświetlania, które charakteryzują się obniżoną energochłonnością i umożliwiają zwiększenie wartości uzyskiwanego plonu, znajdują się w centrum zainteresowania producentów roślin.

Obecnie w produkcji ogrodniczej najczęściej stosowana jest wysoko- i niskoprężna lampa sodowa (HPS), która charakteryzuje się wysoką skutecznością świetlną i relatywnie długim okresem użytkowania [4, 21]. Niesprzyjające warunki ekonomiczne (wysokie ceny nośników energii) ograniczają jednak w znacznym stopniu wprowadzenie tych lamp do szerokiej uprawy produkcyjnej. Należy również podkreślić, że widmo światła w tych lampach określone jest przez ich konstrukcję i trudno je modyfikować. Ponadto lampy te wydzielają duże ilości ciepła, co przy niewłaściwej eksploatacji może powodować uszkodzenia termiczne uprawianych roślin. Dlatego też obecnie prowadzi się intensywne badania nad alternatywnymi rozwiązaniami w dziedzinie doświetlania roślin światłem sztucznym.

W ostatnich latach coraz szersze zastosowanie w praktycznych rozwiązaniach oświetleniowych znajdują półprzewodnikowe źródła światła (LED) [21].

Przewagą tego rozwiązania nad innymi sztucznymi źródłami światła jest możliwość łatwej optymalizacji widma promieniowania modułów LED. Wykorzystanie diod elektroluminescencyjnych pozwala na budowanie opraw oświetleniowych o dowolnych charakterystykach widmowych (poprzez integrację odpowiednich proporcji promieniowania o różnych barwach), które mogą być dostosowane do potrzeb danego gatunku. Inne zalety ich stosowania to: mniejsze rozmiary pojedynczego źródła światła, duża trwałość i niezawodność, coraz lepsza skuteczność świetlna, minimalna emisja ciepła [15, 19, 21]. Wszystkie te cechy pozwalają przypuszczać, że powszechne zastosowanie diod w technologiach szklarniowych jest tylko kwestią czasu.

W Polsce, wśród warzyw uprawianych pod osłonami, pomidor klasyfikuje się na pierwszym miejscu ze względu na zajmowaną powierzchnię. Pomidor jest rośliną o wysokich wymaganiach cieplnych oraz świetlnych. Uprawa w warunkach niedoboru światła powoduje słaby wzrost, opóźnia wytwarzanie gron kwiatowych oraz ogranicza kwitnienie i zawiązywanie owoców. Ważnym czynnikiem warunkującym prawidłowy wzrost i wysokie plonowanie roślin jest jakość materiału nasadzeniowego. Uzyskanie rozsady pomidora o właściwych parametrach wymaga zarówno utrzymania optymalnej temperatury wzrostu jak i zapewnienia jej dobrych warunków świetlnych. Przygotowując rozsadę w miesiącach zimowych i wczesnowiosennych należy mieć na uwadze fakt, iż dostępność światła jest wtedy zwykle znacznie niższa od wymaganej. Niezbędne staje się więc uzupełnienie światła dziennego światłem sztucznym [6, 7]. Zabieg ten ma na celu zwiększenie intensywności fotosyntezy, a w rezultacie przyspieszenie wzrostu i zwiększenie plonowania roślin.

W dostępnej literaturze znajduje się niewiele danych na temat możliwości wykorzystania półprzewodnikowych źródeł światła (jako zamienników światła sodowego) do doświetlania rozsady pomidora. Celem podjętych badań była ocena wpływu doświetlania światłem sodowym oraz LED na wymianę gazową liści oraz wybrane parametry budowy morfologicznej roślin pomidora.

2. MATERIAŁY I METODYKA

Badania przeprowadzono w szklarni doświadczalnej Instytutu Ogrodnictwa w Skierniewicach. Doświadczenie rozpoczęto dnia 15.11.2011. Materiał roślinny stanowiły siedmiodniowe szczepione siewki pomidora odmiany 'Admiro'. Po 2 tygodniach rośliny z multipalet przesadzono do doniczek o pojemności 1,2 dm³ wypełnionych mieszaniną substratu torfowego oraz piasku (3:1), po czym przeniesiono do dwóch komór szklarniowych wyposażonych w zróżnicowany system doświetlania:

(i) lampy sodowe o mocy 400 W (LADYBIRD 400, żarówka Lucalox LU400W/PSL). Jedna lampa zamontowana nad stołem uprawowym.

(ii) oprawy LED DAPLON-plus (skonstruowane w Instytucie Elektrotechniki) o mocy 110 W, emitujące światło w zakresach widmowych: czerwonym (68,5%), niebieskim (28,4%) i bliskiej podczerwieni (3,1%). Dwie oprawy umieszczone nad stołem uprawowym.

Oba typy lamp zostały zamontowane w sposób zapewniający zrównoważenie poziomów powierzchniowej gęstości fotonów na stołach uprawowych. Natężenie napromieniowania w komorach doświetlanych, mierzone po rozpoczęciu doświadczenia na poziomie górnych liści siewek pomidora wynosiło $170 \pm 20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Doświetlanie było włączane w trakcie dnia (godziny 6 – 18) gdy natężenie promieniowania docierającego do szklarni było niższe od 200 W m^{-2} . Rośliny rosnące w warunkach naturalnego światła (bez sztucznego doświetlania) stanowiły kontrolę. Warunki wzrostu monitorowane były przez skomputeryzowany system sterujący temperaturą i wilgotnością powietrza oraz nawadnianiem roślin. System sterujący rejestrował również zużycie energii elektrycznej przez lampy w trakcie doświetlania.

W celu oceny stanu fizjologicznego roślin przeprowadzono pomiary natężenia wymiany gazowej oraz intensywności zielonej barwy liści. Pomiary wymiany gazowej (natężenie fotosyntezy i transpiracji) wykonano dwukrotnie podczas trwania doświadczenia (6 i 27.12.2011) przy wykorzystaniu analizatora LCpro+ (ADC BioScientific, Wielka Brytania). Parametry w komorze pomiarowej ustawiono tak aby były zbliżone do warunków panujących w otoczeniu, w celu uniknięcia konieczności długotrwałej aklimatyzacji liścia w komorze (natężenie napromieniowania $156 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, temperatura $19 \text{ }^\circ\text{C}$, stężenie CO_2 430 vpm). Natężenie zielonej barwy liści (względna zawartość chlorofilu) mierzono przy użyciu miernika CCM-200 (Opti-Sciences, USA) pięciokrotnie, w odstępach tygodniowych począwszy od 29.11.2011. Według wielu autorów [20, 22, 30] pomiary tego typu mogą być alternatywą dla kosztownych analiz prowadzonych metodami chemicznymi. Umożliwiają wykonanie szybkiej i niedestrukcyjnej oceny zawartości chlorofilu w liściach oraz stanu odżywienia roślin azotem.

Po zakończeniu badań (28.12.2011) wykonano ocenę budowy morfologicznej roślin pomidora. Przeprowadzono pomiary świeżej masy części nadziemnej roślin, średnicy pędu (mierzoną poniżej pierwszego liścia) oraz powierzchni liści. Do pomiaru powierzchni liści wykorzystano zestaw do analizy obrazu z oprogramowaniem WinDias 2.0 (Delta-T Devices, Wielka Brytania).

Wyniki opracowano statystycznie za pomocą analizy wariancji. Do oceny istotności różnic między średnimi użyto wielokrotnego testu rozstępu Duncana przyjmując poziom istotności 5%. Obliczenia wykonano przy użyciu programu Statistica 7.1 (StatSoft, USA).

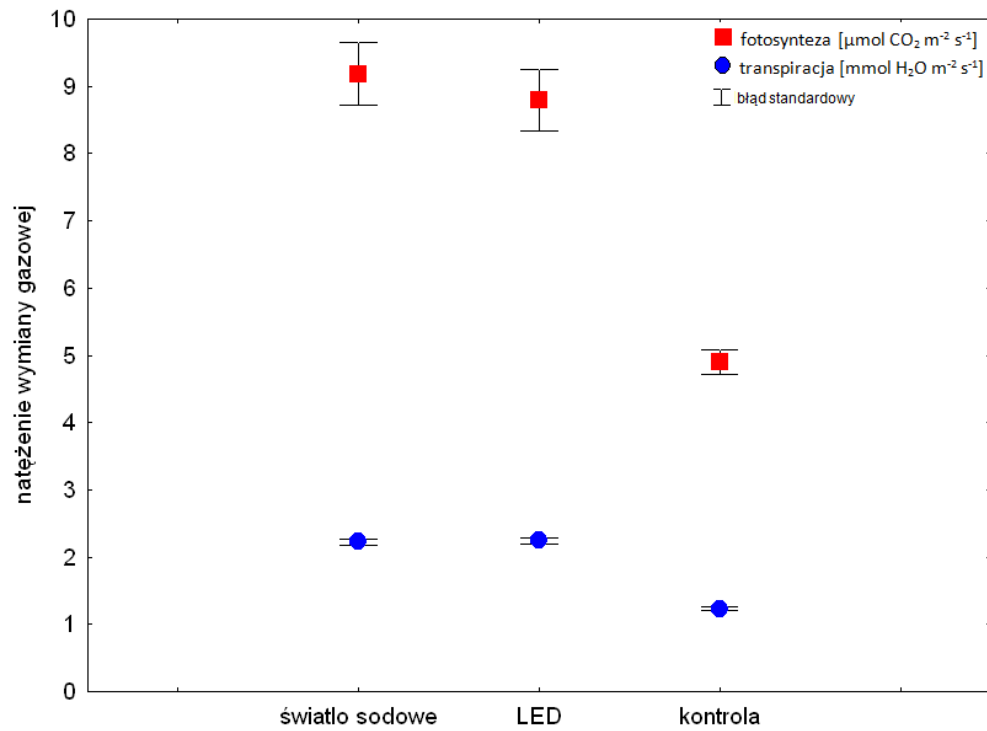
3. WYNIKI I DYSKUSJA

Niekorzystne warunki świetlne występujące w okresie jesienno-zimowym oraz wczesną wiosną sprawiają, że przebieg procesów asymilacyjnych jest ograniczony, co wpływa negatywnie na wzrost i akumulację biomasy przez rośliny. Uzyskane wyniki badań wskazują, że wprowadzając do uprawy dodatkowe źródło światła można uzyskać zwiększenie wydajności fotosyntezy roślin.

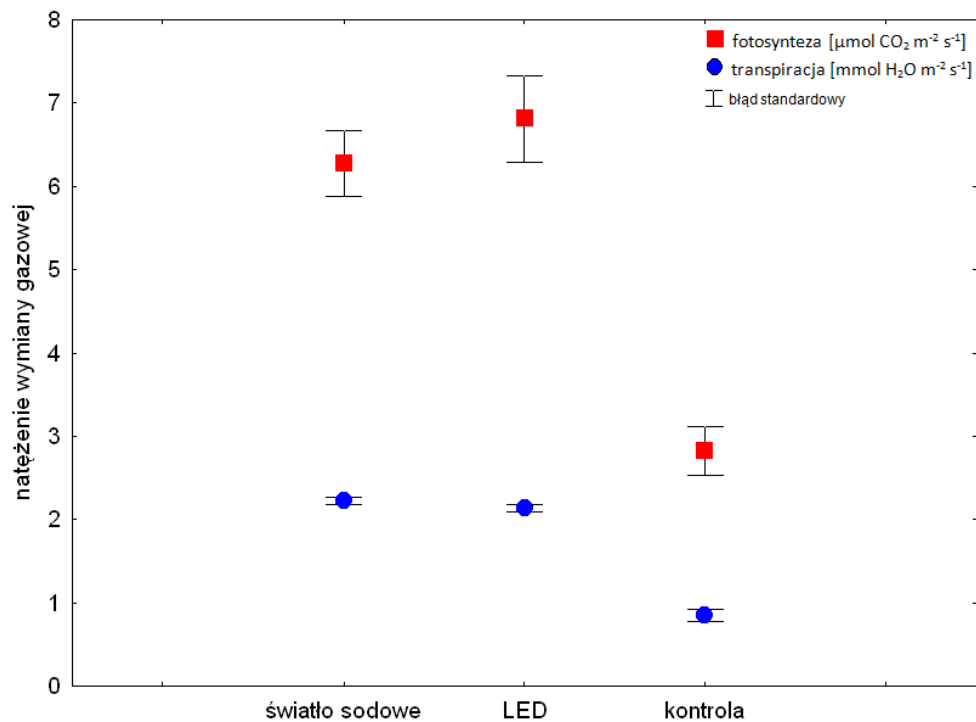
W doświadczeniu zarejestrowano znaczące różnice w intensywności wymiany gazowej pomiędzy roślinami doświetlanymi oraz kontrolnymi (bez doświetlania). W pierwszym terminie pomiarowym (3 tygodnie od posadzenia roślin) natężenie fotosyntezy roślin doświetlanych lampami sodowymi lub LED było wyższe o ok. 80% w porównaniu z kontrolą (rys. 1). Jeszcze większe różnice stwierdzono w drugim terminie pomiarowym (6 tygodni od rozpoczęcia doświadczenia). Intensywność fotosyntezy była tu ponad dwukrotnie wyższa przy doświetlaniu światłem sztucznym w porównaniu z kombinacją kontrolną (rys. 2). Podobne zależności wykazano w przypadku transpiracji, procesu o istotnym znaczeniu dla gospodarki wodnej roślin [12]. Natężenie transpiracji u roślin doświetlanych było istotnie wyższe w porównaniu z kontrolą (rys. 1, 2). W żadnym z terminów pomiarowych nie stwierdzono natomiast istotnych różnic w natężeniu wymiany gazowej (zarówno fotosyntezy jak i transpiracji) pomiędzy roślinami doświetlanymi lampami sodowymi i LED (rys. 1, 2).

Światło jest istotnym czynnikiem wpływającym na różnicowanie się chloroplastów i podjęcie przez nie aktywności fotosyntetycznej [11]. Sprawne działanie aparatu fotosyntetycznego, zdolnego do szybkiej adaptacji do zmieniających się warunków środowiska, zależy m.in. od obecności barwników asymilacyjnych, przede wszystkim chlorofili. Zmiany zawartości chlorofilu w liściach mogą być rezultatem niedoboru substancji odżywczych lub oddziaływania warunków środowiskowych, m.in. niedostatku światła słonecznego podczas wzrostu roślin [20].

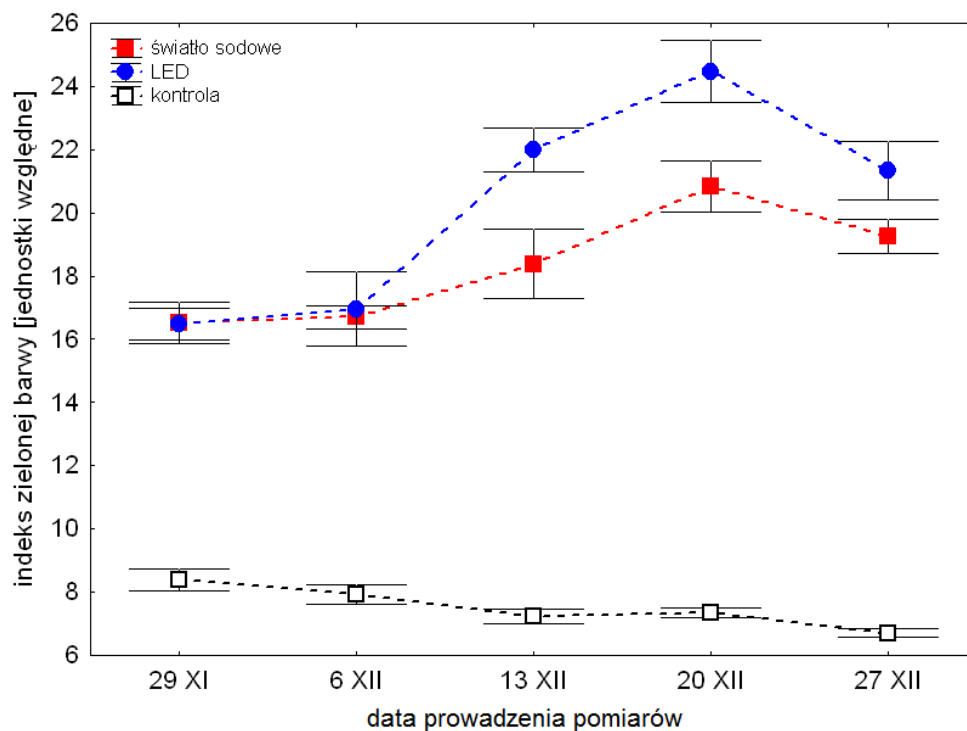
We wszystkich terminach pomiarowych najniższe wartości indeksu zielonej barwy liścia stwierdzono w przypadku pomidora z kombinacji kontrolnej (rys. 3). Niska zawartość chlorofilu u roślin z tej grupy wynikała z niedostatku światła, które u gatunków okrytonasiennych jest istotnym czynnikiem inicjującym i kontrolującym syntezę tego barwnika [17]. Silna redukcja tempa asymilacji CO₂ oraz niewielka zawartość chlorofilu w liściach niedoświetlanych pomidorów wskazuje na słabo wykształcony aparat fotosyntetyczny u tej grupy roślin (pomiaru dla wszystkich kombinacji były prowadzone w tych samych warunkach świetlnych), co miało swoje konsekwencje w zahamowaniu ich wzrostu.



Rys. 1. Natężenie wymiany gazowej roślin pomidora w zależności od zastosowanego doświetlania (1 termin pomiarowy)



Rys. 2. Natężenie wymiany gazowej roślin pomidora w zależności od zastosowanego doświetlania (2 termin pomiarowy)



Rys. 3. Natężenie (indeks) zielonej barwy liści pomidora w zależności od zastosowanego doświetlenia

W trakcie trwania doświadczenia stwierdzono znaczące różnice we względnej zawartości chlorofilu pomiędzy roślinami doświetlanymi różnymi źródłami światła (rys. 3). Począwszy od 4 tygodnia po posadzeniu roślin (3 termin pomiarowy), wyższe wartości indeksu zielonej barwy wykazano u roślin doświetlanych światłem LED. Obserwowane zróżnicowanie może mieć związek z charakterystyką widmową promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez zastosowane źródła światła. Na przebieg procesów fizjologicznych i biochemicznych roślin wpływa nie tylko ilość ale również jakość (skład spektralny) docierającego światła. Na przykład, Liu i współautorzy [13] zaobserwowali ograniczenie zawartości barwników asymilacyjnych w liściach oraz natężenia fotosyntezy pomidora drobnoowocowego uprawianego w warunkach światła monochromatycznego barwy czerwonej. W wielu badaniach wykazano, że niebieskie światło odgrywa istotną rolę podczas biosyntezy chlorofilu [10, 25, 28]. Zastosowana w niniejszym doświadczeniu oprawa LED emitowała światło o znaczącym udziale promieniowania niebieskiego, co mogło mieć stymulujący wpływ na proces syntezy chlorofilu w liściach pomidora. Obserwacje tego typu spowodowały, że w wielu obecnie stosowanych lampach sodowych lub oprawach LED uzupełnia się widmo emitowanego promieniowania o niezbędną ilość światła niebieskiego [3, 16, 18, 31].

Wyższa zawartość chlorofilu w przypadku roślin doświetlanych światłem LED nie miała wpływu na intensywność fotosyntezy (rys. 1, 2). W kilku pracach wykazano, że zależność pomiędzy zawartością chlorofilu a natężeniem fotosyntezy jest zmienna i może zależeć od gatunku i odmiany (np. charakterystyki anatomicznej liścia), fazy rozwojowej czy wpływu warunków zewnętrznych [8, 14]. W niniejszej pracy intensywność wymiany gazowej roślin doświetlanych światłem sodowym i LED nie różniła się, co wskazuje na zbliżoną wydajność aparatu fotosyntetycznego roślin z tych kombinacji.

Rośliny są w stanie wykryć subtelne zmiany w jakości światła dzięki obecności systemu fotoreceptorów, reagujących na określone sygnały świetlne, co w następstwie inicjuje określone zmiany rozwojowe [29]. Rozsada pomidora powinna mieć zwarty pokrój, sztywny pęd, krótkie międzywęzła i dobrze wykształcone, intensywnie zielone liście. Gwarantuje to optymalny rozwój systemu korzeniowego roślin po przesadzeniu oraz umożliwia uzyskanie wczesnego plonu o wysokiej jakości [7]. Produkcja rozsady pomidora odbywa się jednak najczęściej w okresie zimowym przy niewystarczającym dostępie światła, co może skutkować zahamowaniem wzrostu roślin oraz zaburzeniami w ich dalszym rozwoju [1]. W naszych badaniach najsilniejsze zahamowanie wzrostu wykazano u roślin niedoświetlanych (tab. 1). Niska wydajność fotosyntezy spowodowała, że rośliny te miały znacznie mniejszą wysokość, świeżą masę organów i powierzchnię liści, a ich pędy były cieńsze w porównaniu z roślinami doświetlanymi.

TABELA 1

Wybrane parametry budowy morfologicznej roślin pomidora w zależności od zastosowanego doświetlania

Kombinacja	Świeża masa części nadziemnej [g]	Średnica pędu [mm]	Liczba liści [szt. roślina ⁻¹]	Powierzchnia liści [cm ² roślina ⁻¹]	Wysokość rośliny [cm]
Światło sodowe	78,44 b	7,87 a	9,07 b	1790,84 a	41,07 b
LED	104,01 a	8,23 a	10,25 a	1777,31 a	54,93 a
Kontrola	14,57 c	5,33 b	6,60 c	584,03 b	27,27 c

Średnie w kolumnach oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie przy $P < 0,05$ według testu t-Duncana

W doświadczeniu stwierdzono także istotne różnice w budowie morfologicznej roślin pomidora doświetlanych sztucznym światłem o różnym pochodzeniu (tab. 1). Rośliny wystawione na działanie światła LED charakteryzowały się większą świeżą masą organów nadziemnych oraz liczbą liści. Były także

wyższe. Obserwowane różnice we wzroście mogły wynikać z charakterystyki spektralnej światła wytwarzanego przez zastosowane źródła (oprawa LED zawierała diody emitujące promieniowanie z zakresu dalekiej czerwieni) [5, 26]. Lampy sodowe, powszechnie stosowane w szklarni emitują światło o wystarczającym natężeniu i spektrum dla prawidłowego przebiegu procesu fotosyntezy. Widmo ich jednak charakteryzuje się niedoborem w zakresie barwy niebieskiej i dalekiej czerwieni (w porównaniu ze światłem słonecznym) [18, 21]. Według Menarda i współautorów [18] długotrwałe doświetlanie roślin takim światłem może prowadzić do zaburzeń w przebiegu procesów fizjologicznych, a w efekcie do nieprawidłowego rozwoju roślin.

Uzyskane wyniki potwierdzają obserwacje innych autorów o istotnym znaczeniu spektralnej jakości światła używanego dla doświetlania uprawianych roślin. Przykładowo, uzupełnienie emitowanego widma o światło niebieskie spowodowało zwiększenie akumulacji biomasy ogórka [18], papryki [5] oraz stymulowało rozwój sadzonek truskawki [23]. W badaniach Brazaityte i współautorów [3, 4] odpowiedź fotomorfogenetyczna roślin warzywnych zależała od charakterystyki widmowej zastosowanego oświetlenia. Autorzy ci stwierdzili pozytywny wpływ doświetlania diodami emitującymi światło zielone (jako dodatku do standardowej oprawy LED o diodach czerwonych, niebieskich i dalekiej czerwieni) na wzrost i rozwój roślin ogórka oraz przeciwny efekt (hamowanie wzrostu) w sytuacji gdy widmo światła zostało uzupełnione promieniowaniem UV [3]. Odmienną reakcję zaobserwowano na roślinach pomidora. Dodatek promieniowania UV wzmacniał wzrost roślin, natomiast uzupełnienie widma o światło zielone nie było korzystne dla rozwoju rozsady pomidora [4]. Podane przykłady wskazują, że zależności te są skomplikowane i ich wyjaśnienie wymaga dalszych badań z wykorzystaniem metod analitycznych z dziedziny fizjologii roślin, biochemii i biologii molekularnej.

W trakcie prowadzenia eksperymentu wykonano pomiary energochłonności zastosowanych źródeł światła. Sumaryczny czas doświetlania roślin w trakcie uprawy wynosił ok. 428 h, co stanowiło ok. 79% wszystkich godzin, podczas których system doświetlania był aktywny. Zużycie energii w tym okresie przez oprawy LED było o ponad 45% niższe w porównaniu do lamp sodowych.

4. PODSUMOWANIE

W naszych badaniach wykazano, że energooszczędne półprzewodnikowe źródła światła można z powodzeniem wykorzystać w uprawie pomidora zamiast mniej wydajnych wysokoprężnych lamp sodowych. Rośliny rosnące

w warunkach doświetlania lampami LED charakteryzowały się wysoką intensywnością fotosyntezy oraz szybkim wzrostem. Rośliny te miały jednak mniej zwarty pokrój (były wyższe i posiadały dłuższe międzywęzła) niż rośliny doświetlane lampami sodowymi, co może utrudniać prowadzenie uprawy. Z tego powodu konieczne są dalsze prace nad doborem optymalnej jakości światła emitowanego przez oprawy LED dla danej uprawy (dobór diod o odpowiedniej charakterystyce spektralnej i o odpowiednim udziale poszczególnych barw w widmie ogólnym oprawy oświetleniowej). Wielu autorów podkreśla, że z uwagi na różnorodność reakcji fotomorfo-genetycznych, zakres spektralny emitowanego światła powinien być dopasowany do konkretnego gatunku roślin uprawnych.

LITERATURA

1. Atherton J.G., Rudich J.: The tomato crop. A scientific basis for improvement. Chapman and Hall, London, New York, 1986.
2. Blom T.J., Ingratta F.J.: The effect of high pressure sodium lighting on the production of tomatoes, cucumbers and roses. *Acta Hort.*, 148, 905-914, 1984.
3. Brazaitytė A., Duchovskis P., Urbonavičiūtė A., Samuolienė G., Jankauskienė J., Kasiulevičiūtė-Bonakėrė A., Bliznikas Z., Novičkovas A., Breivė K., Žukauskas A.: The effect of light-emitting diodes lighting on cucumber transplants and after-effect on yield. *Zemdirbyste-Agriculture*, 96(3), 102-118, 2009.
4. Brazaitytė A., Duchovskis P., Urbonavičiūtė A., Samuolienė G., Jankauskienė J., Sakalauskaitė J., Šabajevienė G., Sirtautas R., Novičkovas A.: The effect of light-emitting diodes lighting on the growth of tomato transplants. *Zemdirbyste-Agriculture*, 97(2), 89-98, 2010.
5. Brown C.S., Schuerger A.C., Sager J.C.: Growth and photomorphogenesis of pepper plants under red light-emitting diodes with supplemental blue or far-red lighting. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 120(5), 808-13, 1995.
6. Gajc-Wolska J., Kowalczyk K., Hemka L., Bujalski D, Karwowska R.: Wpływ doświetlania lampami sodowymi i metalohalogenkowymi na wybrane parametry fizjologiczne roślin pomidora (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Prace Instytutu Elektrotechniki*, 245, 223-231, 2010.
7. Głowacka B.: Wpływ barwy światła na wzrost rozsady pomidora (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Acta Scien. Pol.*, seria Hortorum Cultus, 1(2), 93-100, 2002.
8. Gratani L., Pesoli P., Crescente M.F.: Relationship between photosynthetic activity and chlorophyll content in an isolated *Quercus Ilex* L. tree during the year. *Photosynthetica*, 35(3), 445-451, 1998.
9. Hendriks J.: Supplementary lighting for greenhouse. *Acta Hortic.*, 312, 65-76, 1992.
10. Kamiya A., Ikegami I., Hase E.: Effects of light on chlorophyll formation in cultured tobacco cells I. Chlorophyll accumulation and phototransformation of protochlorophyll(ide) in callus cells under blue and red light. *Plant Cell Physiol.*, 22, 1385-1396, 1981.
11. Kasemir H.: Control of chloroplast formation by light. *Cell Biol Int Rep.*, 3(3), 197-214, 1979.
12. Klamkowski K., Treder W.: Influence of a rootstock on intensity of transpiration rate and dynamics of changes of an apple tree leader growing under different soil water regimes. *J. Fruit Orn. Plant Res.*, 10, 31-39, 2002.

13. Liu X.Y., Chang T.T., Guo S.R., Xu Z.G., Li J.: Effect of different light quality of LED on growth and photosynthetic character in cherry tomato seedling. *Acta Hort.*, 907, 325-330, 2011.
14. Marini R.P.: Do net gas exchange rates of green and red peach leaves differ? *HortSci.* 21, 118-120, 1986.
15. Massa G.D., Kim H-H., Wheeler R.M., Mitchell C.A.: Plant productivity in response to LED lighting. *HortSci.*, 43(7), 1951-1956, 2008.
16. Matsuda R., Ohashi-Kaneko K., Fujiwara K. Goto E., Kurata K.: Photosynthetic characteristics of rice leaves grown under red light with or without supplemental blue light. *Plant Cell Physiol.*, 45(12), 1870-1874, 2004.
17. Matters G.L., Beale S.I.: Blue-light-regulated expression of genes for two early steps of chlorophyll biosynthesis in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Plant Physiol.*, 109(2), 471-479, 1995.
18. Menard C., Dorais M., Hovi T., Gosselin A.: Developmental and physiological responses of tomato and cucumber to additional blue light. *Acta Hort.*, 711, 291-296, 2006.
19. Mitchell C.A., Both A.J., Bourget M.C, Burr J.F., Kubota C, Lopez R.G., Morrow R.C., Runkle E.S.: LEDs: The future of greenhouse lighting!. *Chronica Horticulturae*, 52(1), 6-12, 2012.
20. Netto A.T., Campostrini E., Goncalves de Oliveria J., Bressan-Smith R.E.: 5: Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll a fluorescence and SPAD-502 readings in coffee leaves. *Sci. Hort.*, 104, 199-209, 2005.
21. Puternicki A.: Zastosowanie półprzewodnikowych źródeł światła do wspomaganie wzrostu roślin. *Prace Instytutu Elektrotechniki*, 245, 69-86, 2010.
22. Rodriguez I.R., Miller G.L.: Using a chlorophyll meter to determine the chlorophyll concentration, nitrogen concentration, and visual quality of St. Augustine grass. *HortSci.*, 35, 751-754, 2000.
23. Samuolienė G., Brazaitytė A., Urbonavičiūtė A., Šabajevienė G., Duchovskis P.: The effect of red and blue light component on the growth and development of frigo strawberries. *Zemdirbyste-Agriculture*, 97(2), 99-104, 2010
24. Selga M., Vitola A., Kristkalne S., Gubar, G.D.: Accumulation of photosynthates in chloroplasts under various irradiance and mineral nutrition of cucumber plants. *Photosynthetica*, 17(2), 171-175, 1983.
25. Shin K.S., Murthy H.N., Heo J.W., Hahn E.J., Paek K.Y.: The effect of light quality on the growth and development of in vitro cultured *Doritaenopsis* plants . *Acta Physiol. Plant.*, 30(3), 339-343, 2008.
26. Smith H.: Physiological and ecological function within the phytochrome family. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 46, 289-315, 1995.
27. Starck Z., Chołuj D., Niemyska B.: Fizjologiczne reakcje roślin na niekorzystne czynniki środowiska. *Wydawnictwo SGGW, Warszawa*, 1995.
28. Tibbits T.W., Morgan D.C., Warrington J.J.: Growth of lettuce, spinach, mustard and wheat plants under four combinations of high-pressure sodium, metal halide and tungsten halogen lamps at equal PPF. *J. Am. Hort. Sci.*, 108, 622-630, 1983.
29. Ward J.M., Cufr C.A., Denzel M.A., Neff M.M.: The Dof transcription factor OBP3 modulates phytochrome and cryptochrome signaling in *Arabidopsis*. *Plant Cell*, 17, 475-485, 2005.
30. Yadava U.L.: A rapid and nondestructive method to determine chlorophyll in intact leaves. *HortSci.* 21, 1449-1450, 1986.

31. Yorio N.C., Goins G.D., Kagie H.R., Wheeler R.M., Sager J.C.: Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation. *HortSci.*, 36, 380–383, 2001.

Rękopis dostarczono dnia 24.03.2012 r.

INFLUENCE OF SUPPLEMENTARY LIGHTING WITH HIGH PRESSURE SODIUM AND LED LAMPS ON GROWTH AND SELECTED PHYSIOLOGICAL PARAMETERS OF TOMATO TRANSPLANTS

Krzysztof KLAMKOWSKI, Waldemar TREDER,
Jadwiga TREDER, Andrzej PUTERNICKI, Edmund LISAK

ABSTRACT *The objective of the study was to evaluate the physiological response and growth of tomato transplants grown under different light treatment. During cultivation period (November – December), the transplants received supplemental artificial lighting provided by standard high-pressure sodium lamps (HPS) or high-power solid-state lighting modules with red, blue and far red LEDs. Quantum irradiance in both combinations was maintained at the same level. The third group of plants (control combination) was grown under the natural light (without supplemental lighting). The following measurements were taken: leaf gas exchange (net photosynthesis and transpiration rate), leaf greenness index (relative chlorophyll content) and the most important morphological parameters (fresh weight of plant organs, leaf surface area, plant height). The results showed that supplemental illumination using LED or HPS light sources affected growth and physiological responses of tomato plants. The higher rates of gas exchange and leaf greenness index as well as enhanced growth were found in the plants grown under conditions of artificial lighting (compared to control ones). Additionally, significant differences (as a result of light spectral quality) were found between the plants lighted with HPS lamps or LED modules. LED lighting resulted in the stem elongation, greater weight of plant organs and higher chlorophyll content in the leaves. The obtained results proved that HPS lamps can be replaced by LEDs in greenhouse lighting systems. However, much work still has to be done to optimize lighting spectrum of LED modules for the cultivation of the specific crop species.*

Keywords: *gas exchange, photosynthesis, chlorophyll, photomorphogenesis*