

**WPLYW DOŚWIETLANIA
DIODAMI ELEKTROLUMINESCENCYJNYMI (LED)
NA MORFOLOGIĘ, ZAWARTOŚĆ CHLOROFILU
ORAZ AKTYWNOŚĆ FOTOSYNTETYCZNA
SADZONEK TRUSKAWKI (*FRAGARIA* × *ANANASSA* DUCH.)**

EFFECT OF LED LIGHT IRRADIATION ON MORPHOLOGY,
CHLOROPHYLL CONTENT AND PHOTOSYNTHETIC ACTIVITY
OF STRAWBERRY (*FRAGARIA* × *ANANASSA* DUCH.) CUTTINGS

Danuta Wójcik^{ORCID}, Monika Markiewicz^{ORCID}, Bożena Matysiak^{ORCID}, Iwona Sowik^{ORCID}

Instytut Ogrodnictwa – PIB
ul. Konstytucji 3 Maja 1/3, 96-100 Skierniewice
e-mail: danuta.wojcik@inhort.pl

Abstract

Manipulating the light characteristics with LEDs (light-emitting diodes) allows the regulation of various aspects of plant growth and development. The aim of the study was to investigate the effect of supplementary irradiation with LEDs emitting blue, red or far-red light on the growth, chlorophyll content, and photosynthetic activity of *in vitro*-derived plants of two strawberry cultivars with different photoperiod requirements, short-day cultivar ‘Elsanta’ and photoneutral cultivar ‘Selva’. Supplementary irradiation with blue light significantly affected the growth parameters of plants of the photoneutral strawberry ‘Selva’, but had no effect on the growth of ‘Elsanta’ plants. Exposure to blue light did not affect the chlorophyll content index (CCI) or the maximum efficiency of the photochemical reaction of photosystem II (Fv/Fm) of any strawberry cultivars. Red and far-red light supplementary irradiation did not significantly affect plant growth, but it improved the Fv/Fm parameter in both strawberry cultivars after 57 days of the experiment. Irradiation with red and far-red light inhibited the formation of runners, while blue light limited their development by 50%.

Key words: photomorphogenesis, short-day strawberry cultivar, photoneutral strawberry cultivar, Fv/Fm, chlorophyll content index

WSTĘP

Truskawka (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) jest jedną z najważniejszych uprawnych roślin jagodowych na świecie. W roku 2020 światowa produkcja owoców truskawki osiągnęła ponad 8,8 miliona ton (FAOSTAT). Polska, z produkcją roczną wynoszącą 167 tysięcy ton (FAOSTAT 2019), jest znaczącym producentem tych owoców na świecie, drugim w Unii Europejskiej. W ostatnich latach zyskuje na znaczeniu sterowana uprawa truskawki pod osłonami, która dla tego gatunku jest technologicznie najbardziej zaawansowana spośród roślin jagodowych (Samtani i in. 2019; Warner i in. 2021).

Kontrolowane warunki temperatury i światła w połączeniu z precyzyjnym nawadnianiem, nawożeniem i nowoczesną ochroną pozwalają na sterowanie wzrostem i rozwojem w taki sposób, aby rośliny zaowocowały w pożądanym przez producentów terminie (Samtani i in. 2019; Warner i in. 2021). Dzięki wprowadzeniu zmian w technologii produkcji oraz zastosowaniu odmian powtarzających owocowanie możliwe jest wydłużenie okresu pozyskiwania truskawek od kwietnia aż do października, a tym samym wzrasta opłacalność produkcji tych owoców.

Światło w życiu roślin pełni fundamentalną rolę stanowiąc źródło energii do fotosyntezy oraz bodziec w procesach fotomorfogenetycznych (Tripathi i in. 2019). Rośliny rejestrują zmiany w natężeniu, jakości i kierunku padania światła za pośrednictwem fotoreceptorów. Światło o zakresie fal 420–450 nm (niebieskie) oraz 600–700 nm (czerwone) jest najbardziej efektywne w kwestii wpływu na wzrost, rozwój i plonowanie roślin (Nadalini i in. 2017). Głównymi fotoreceptorami roślinnymi są fitochromy, receptory światła czerwonego, które absorbują światło czerwone, dalekiej czerwieni i przekazują sygnał za pośrednictwem szlaków transdukcji do czynników regulujących różne etapy cyklu rozwojowego roślin (Kowalewska i Mostowska 2015; Montgomery 2016; Tripathi i in. 2019). Istotne znaczenie w odpowiedzi fotomorfogenetycznej roślin ma stan fotostacjonarny fitochromu w roślinie, czyli stosunek fitochromu aktywnego Pfr do całkowitej puli fotoreceptora (Pr + Pfr), który zależy od proporcji światła czerwonego do dalekiej czerwieni (R/FR) docierającego do roślin (Stutte 2009; Demotes-Mainard i in. 2016). Odpowiedź fenotypowa roślin na światło czerwone, daleką czerwień i stosunek R/FR może się różnić w zależności od gatunku i warunków wzrostu roślin (Demotes-Mainard i in. 2016). Za percepcję światła niebieskiego/UV-A odpowiadają kryptochromy i fototropiny (Kowalewska i Mostowska 2015; Montgomery 2016). Kompozycja światła niebieskiego, czerwonego i dalekiej czerwieni kontroluje wzrost i rozwój roślin, wpływa między innymi na takie procesy jak rozkrzewianie, wzrost elongacyjny, rozwój liści i kwitnienie, a także na fotosyntezę oraz syntezę chlorofilu (Park i Runkle 2019). Precyzyjne manipulowanie spektrum światła, w jakim rosną rośliny, dzięki zastosowaniu diod elektroluminescencyjnych (LED) umożliwia regulowanie różnych aspektów wzrostu i rozwoju roślin podczas ich uprawy (Stutte 2009; Nadalini i in. 2017).

Diody elektroluminescencyjne są obecnie szeroko stosowane w sterowanej uprawie roślin, są również użytecznym narzędziem dla naukowców zajmujących się badaniami nad efektywną uprawą różnych gatunków roślin, w tym truskawki. Wyniki tych badań wskazują, że doświetlanie roślin truskawki światłem niebieskim, czerwonym, dalekiej czerwieni lub kombinacją tych światła ma pozytywny wpływ na wzrost roślin, ich owocowanie oraz jakość owoców (Samuolienė i in. 2010; Choi i in. 2015; Zahedi i Sarikhani

2016; Yoshida i in. 2016; Nadalini i in. 2017; Zheng i in. 2019; Stuemky i Uchanski 2020). Warner i in. (2021) opisują możliwość wpływania na metabolizm wtórny truskawki, jakość uzyskiwanych owoców oraz ich właściwości antyoksydacyjne poprzez odpowiednie manipulowanie natężeniem oraz jakością światła podczas wzrostu roślin w kontrolowanych warunkach. W ostatnim czasie w tzw. fabrykach roślin wykorzystujących lampy LED w kontrolowanych warunkach produkowane są sadzonki truskawki dla upraw komercyjnych (Zheng i in. 2019).

Ze względu na wymagania w stosunku do fotoperiodu, odmiany truskawki dzielone są na genotypy dnia krótkiego oraz fotoneutralne (Castro i in. 2015), przy czym klasyfikacja wyłącznie w oparciu o fotoperiod w przypadku truskawki nie jest wystarczająca, ponieważ istotne znaczenie w indukcji kwitnienia u tego gatunku ma również temperatura (Bradford i in. 2010; Massetani i in. 2011; Warner i in. 2021). U odmian dnia krótkiego rozwój pąków kwiatowych indukowany jest w warunkach krótkiego dnia lub w temperaturze niższej niż 15 °C, z kolei odmiany fotoneutralne, które nie są wrażliwe na długość dnia, w sprzyjających warunkach temperaturowych mogą owocować nieprzerwanie przez całe lato i jesień (Castro i in. 2015). Hancock i in. (2008) wśród genotypów powtarzających owocowanie, oprócz odmian fotoneutralnych, wyróżniają grupę odmian dnia długiego, chociaż jednocześnie zaznacza, że rozróżnienie tych genotypów przysparza trudności.

Celem pracy było badanie wpływu doświetlania diodami elektroluminescencyjnymi emitującymi światło niebieskie, czerwone oraz dalekiej czerwieni na wzrost, zawartość chlorofilu oraz aktywność fotosyntetyczną sadzonek dwóch odmian truskawki, różniących się wymaganiami w stosunku do fotoperiodu.

MATERIAŁ I METODY

Badania prowadzono na sadzonkach dwóch odmian truskawki (*Fragaria × ananassa* Duch.) – ‘Elsanta’, która należy do roślin dnia krótkiego, oraz ‘Selva’, która jest odmianą fotoneutralną. Materiał roślinny do badań pochodził z ustabilizowanych kultur *in vitro*, prowadzonych w warunkach standardowych dla tego gatunku (Boxus 1999). Pędy obu odmian truskawki, namnożone w kulturach tkankowych, były ukorzeniane i jednocześnie aklimatyzowane do warunków *ex vitro* w podłożu kokosowo-perlitowym, w doniczkach typu paper-pot (Ceres). Po 6–8 tygodniach rośliny przesadzono do mieszanki piasku, ziemi kwiatowej (Blumenerde, Athena) i ziemi ogrodowej w stosunku 0,3 : 5 : 1,3. Rośliny nawożono roztworem nawozu rozpuszczalnego Peters® Professional (Scotts). Przez cały okres aklimatyzacji i ukorzeniania rośliny rosły w fitotronie, w kontrolowanej temperaturze 21 °C, przy natęże-

niu napromieniowania kwantowego $75 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Do doświadczeń wykorzystano sadzonki truskawki obu odmian, będące na tym samym etapie rozwoju, z 3–4 nowymi liśćmi, około 2 tygodnie po przesadzeniu.

Sadzonki umieszczono w fitotronie, w temperaturze $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ oraz 12-godzinnym fotoperiodzie (12/12 h dzień/noc), w świetle białym, o natężeniu napromieniowania kwantowego $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Rośliny podzielono na 4 grupy po 120–140 roślin, trzy grupy roślin były doświetlane diodami elektroluminescencyjnymi emitującymi światło niebieskie (450 nm), czerwone (660 nm) lub dalekiej czerwieni (720 nm) przez 6 godzin w ciągu doby. Rośliny kombinacji kontrolnej rosły w świetle białym przez cały czas trwania doświadczenia. Źródłem światła białego dla roślin były świetlówki LED (LED TUBE 18W, ciepła barwa światła, 1650 lm, Spectrum LED). Panele doświetlające z diodami OSRAM emitującymi światło niebieskie, czerwone lub dalekiej czerwieni zostały skonstruowane na potrzeby doświadczenia. Schemat warunków świetlnych eksperymentu przedstawiono w tabeli 1. Doświadczenie prowadzono przez 57 dni i w tym czasie czterokrotnie przeprowadzono pomiary indeksu zawartości chlorofilu (CCI) i fluorescencji chlorofilu (19, 29, 42 i 57 dni po rozpoczęciu doświadczenia). Względną zawartość chlorofilu określono przy użyciu miernika zawartości chlorofilu CCM-200 (Opti-Sciences, USA). Fluorescencję chlorofilu mierzono za pomocą fluorymetru MINI PAM (Walz, Szwajcaria). Określono maksymalną efektywność reakcji fotochemicznej fotosystemu II (współczynnik Fv/Fm). Pomiary wykonano na 10 w pełni rozwiniętych liściach pobranych z roślin z każdej kombinacji doświadczałnej.

Po zakończeniu doświadczenia (dzień 57) zmierzono parametry wzrostu roślin. Z każdej kombinacji doświadczałnej obserwacjom poddano 10 roślin. Wykonano pomiary powierzchni liści i długości ogonków liściowych, obliczono średnią liczbę liści na roślinie oraz liczbę rozłogów. Powierzchnię 10 losowo wybranych, w pełni rozwiniętych liści z każdej kombinacji doświadczałnej określono za pomocą optycznego planimetru Area Meter AM350 (ADC BioScientific). Pomiary długości ogonków liściowych wykonano dla wszystkich liści z 10 badanych roślin z każdej kombinacji doświadczałnej.

Analiza statystyczna

Uzyskane wyniki zostały opracowane statystycznie przez analizę wariancji, a średnie porównano przy użyciu testu Duncana ($p < 0,05$, Statistica 10).

WYNIKI I DYSKUSJA

Doświetlanie sadzonek truskawki odmiany ‘Elsanta’ diodami elektroluminescencyjnymi emitującymi światło niebieskie miało niewielki wpływ na wzrost roślin (tab. 2). Średnia powierzchnia liścia, liczba liści na roślinie

i długość ogonków liściowych nie różniły się statystycznie u roślin kombinacji kontrolnej i doświetlanych światłem niebieskim (tab. 2). Zaobserwowano, że ograniczeniu o 50% uległo wytwarzanie rozłogów (tab. 2). U odmiany ‘Selva’ zauważono znacznie większy wpływ światła niebieskiego na wzrost roślin niż u odmiany ‘Elsanta’. Sadzonki odmiany ‘Selva’ eksponowane na światło niebieskie miały istotnie mniejsze liście oraz znacznie, o połowę, skrócone ogonki liściowe w porównaniu z roślinami kombinacji kontrolnej (tab. 2). Doświetlanie światłem niebieskim nie miało wpływu na zawartość chlorofilu ani na aktywność fotosyntetyczną roślin. Zarówno wartość indeksu zawartości chlorofilu (CCI), jak i maksymalna efektywność reakcji fotochemicznej fotosystemu II, wyrażona współczynnikiem F_v/F_m (rys. 1 i 2), u obu badanych odmian truskawki utrzymywały się na podobnym poziomie jak u roślin kontrolnych.

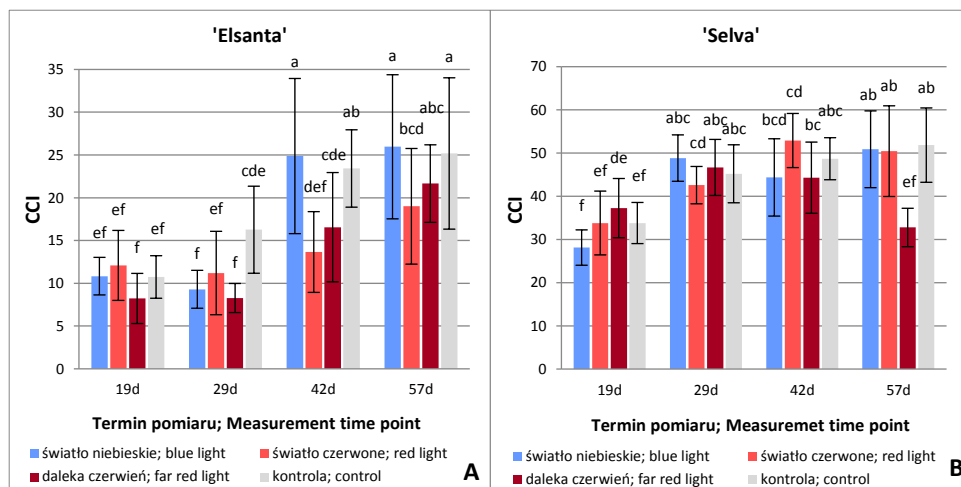
Tabela 1. Schemat warunków świetlnych utrzymywanych podczas doświadczenia
Table 1. The scheme of the light conditions in the experiment

Kombinacja doświadczalna; Experimental combination	Światło – 7.00– 19.00; Light – 7.00 a.m. – 7.00 p.m.		
	7.00 – 13.00; 7.00 a.m. – 1.00 p.m.	13.00 – 19.00; 1.00 p.m. – 7.00 p.m.	
Doświetlanie światłem niebieskim; Supplementary irradiation with blue light	Światło białe; White light $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	Światło białe $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ + światło niebieskie $20 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; White light $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ + blue light $20 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	Ciemność 19.00 – 7.00; Darkness 7.00 p.m. – 7.00 a.m.
Doświetlanie światłem czerwonym; Supplementary irradiation with red light	Światło białe; White light $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	Światło białe $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ + światło czerwone $20 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; White light $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ + red light $20 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	
Doświetlanie światłem Dalekiej czerwieni; Supplementary irradiation with far-red light	Światło białe; White light $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	Światło białe $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ + światło dalekiej czerwieni $10 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; White light $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ + far-red light $10 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	
Kontrola; Control	Światło białe; White light $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$		

Tabela 2. Charakterystyka morfologiczna roślin truskawki odmian ‘Selva’ i ‘Elsanta’ po 57 dniach wzrostu w warunkach doświetlania światłem niebieskim, czerwonym i dalekiej czerwieni oraz roślin kombinacji kontrolnej, rosnących w świetle białym
 Table 2. Morphological characteristics of strawberry plants of ‘Selva’ and ‘Elsanta’ cultivars after 57 days of growth under blue, red and far-red light, and plants of the control combination, growing under white light

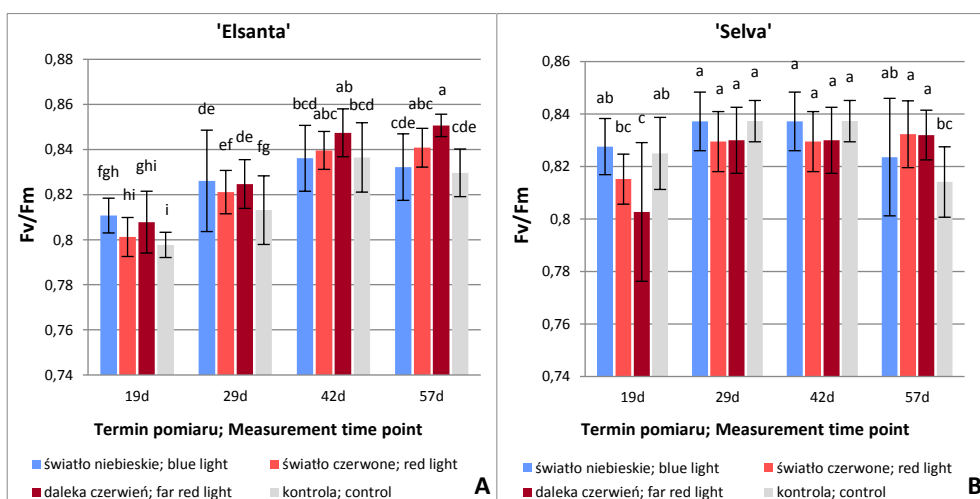
Odmiana; Cultivar	Cecha morfologiczna; Morphological trait	Światło; Light			
		niebieskie; blue	czerwone; red	daleka czerwień; far-red	białe; white
‘Elsanta’	Powierzchnia liścia; Leaf area (cm ²)	25,4 ± 10,7 a*	21,7 ± 14,5 a	20,5 ± 5,6 a	28,2 ± 12,6 a
	Długość ogonków liściowych; Length of leaf petiole (mm)	45,9 ± 8,5 c	56,9 ± 10,3 ab	59,9 ± 8,5 a	50,0 ± 6,8 bc
	Liczba liści na roślinie; Number of leaves per plant	7,5 ± 1,6 a	7,9 ± 1,0 a	7,7 ± 1,5 a	7,9 ± 0,7 a
	Liczba roślin z rozłogami; Number of plants with runners (n = 10)	2	0	0	4
‘Selva’	Powierzchnia liścia; Leaf area (cm ²)	10,4 ± 4,1 b	11,9 ± 4,8 ab	11,3 ± 3,5 ab	16,1 ± 6,7 a
	Długość ogonków liściowych; Length of leaf petiole (mm)	29,0 ± 10,1 b	63,9 ± 7,4 a	55,5 ± 11,3 a	60,9 ± 6,7 a
	Liczba liści na roślinie; Number of leaves per plant	5,1 ± 1,1 b	7,3 ± 1,3 a	5,2 ± 1,2 b	6,5 ± 1,4 a
	Liczba roślin z rozłogami; Number of plants with runners (n = 10)	4	0	0	8

*Średnie dla każdej cechy oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie (p = 0,05, test Duncana);
 Means for each trait marked with the same letter do not differ significantly (p = 0.05, Duncan’s test)



Rysunek 1. Indeks zawartości chlorofilu (CCI) w roślinach truskawki odmian ‘Elsanta’ (A) i ‘Selva’ (B) doświetlanych diodami elektroluminescencyjnymi po 19, 29, 42 i 57 dniach doświadczenia. Średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie ($p = 0,05$, test Duncana)

Figure 1. Chlorophyll content index (CCI) of ‘Elsanta’ (A) and ‘Selva’ (B) strawberry plants irradiated with LEDs after 19, 29, 42 and 57 days of the experiment. Bars marked with the same letter do not differ significantly ($p = 0.05$, Duncan’s test)



Rysunek 2. Maksymalna efektywność reakcji fotochemicznej fotosystemu II (Fv/Fm) w liściach truskawki odmian ‘Elsanta’ (A) i ‘Selva’ (B) doświetlanych diodami elektroluminescencyjnymi po 19, 29, 42 i 57 dniach doświadczenia. Średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie ($p = 0,05$, test Duncana)

Figure 2. The maximal photochemical efficiency of PSII in dark-adapted leaves of ‘Elsanta’ (A) and ‘Selva’ (B) of strawberry plants irradiated with LEDs after 19, 29, 42 and 57 days of the experiment. Bars marked with the same letter do not differ significantly ($p = 0.05$, Duncan’s test)

W badaniach prowadzonych na różnych gatunkach roślin zaobserwowano, że efektem ekspozycji roślin na światło niebieskie jest zahamowanie wzrostu łodygi, zmniejszenie powierzchni liści, wzrost zawartości chlorofilu, a także zwiększenie liczby kwiatów na roślinie (Snowden i in. 2016; Hernández i Kubota 2016; Park i Runkle 2019). Odpowiedź morfogenetyczna roślin na światło niebieskie zależała od jego intensywności. Wraz ze zwiększającą się dawką światła niebieskiego uzyskiwano coraz silniejszy efekt hamowania wzrostu wydłużeniowego, większe zawartości chlorofilu oraz silniejszą indukcję kwitnienia (Park i Runkle 2019). Analogiczne wyniki uzyskaliśmy w naszych badaniach – zmniejszenie powierzchni liści i skrócenie ogonków liściowych sadzonek truskawki doświetlanych światłem niebieskim, przy czym u odmiany fotoneutralnej ‘Selva’ wpływ światła niebieskiego na wzrost był znacznie większy niż u odmiany dnia krótkiego ‘Elsanta’. Z kolei odmienny efekt działania światła niebieskiego zaobserwowano w badaniach prowadzonych przez Nadalinię i in. (2017) na sadzonkach „frigo” truskawki odmiany ‘Elsanta’. Wykazały one, że rośliny rosnące w monochromatycznym świetle niebieskim emitowanym przez lampy LED miały istotnie dłuższe ogonki liściowe oraz znacznie obniżoną zawartość chlorofilu w liściach, zaobserwowano również zwiększenie akumulacji biomasy liści i korzeni w porównaniu roślinami rosnącymi w świetle białym. W eksperymencie Choiego i in. (2015) na roślinach truskawki odmiany ‘Daewang’ doświetlanie diodami emitującymi światło niebieskie spowodowało nieznaczne wydłużenie ogonków liściowych, a także samych blaszek liściowych w porównaniu z roślinami kombinacji kontrolnej. Podobnie jak w naszych badaniach zawartość chlorofilu w liściach truskawki ‘Daewang’ była podobna w roślinach doświetlanych światłem niebieskim i rosnących w świetle białym (Choi i in. 2015). Odmiennie niż w przypadku truskawki odmiany ‘Selva’ Yoshida i in. (2016) wykazali pozytywny wpływ światła niebieskiego na wzrost sadzonek truskawki stale owocującej ‘HS138’, pochodzących z kultur *in vitro*. Rośliny ‘HS138’ rosnące w monochromatycznym świetle niebieskim charakteryzowały się dłuższymi ogonkami liściowymi oraz większą średnią powierzchnią liścia niż rosnące w świetle czerwonym (Yoshida i in. 2016).

U żadnej z badanych odmian truskawki nie zaobserwowano istotnego wpływu doświetlania sadzonek światłem czerwonym na średnią powierzchnię liścia, długość ogonków liściowych i liczbę liści na roślinie, jednak doświetlanie światłem czerwonym całkowicie zahamowało rozwój rozłogów (tab. 2). Indeks zawartości chlorofilu (CCI) w liściach sadzonek ‘Elsanta’ był istotnie niższy niż w roślinach kontrolnych po 42 i 57 dniach eksperymentu (rys. 1A), natomiast u odmiany ‘Selva’ nie zaobserwowano różnic w zawartości chlorofilu między roślinami eksponowanymi na dodatkową dawkę światła czerwonego i roślinami rosnącymi w świetle białym (rys. 1B).

Wartość parametru Fv/Fm w liściach sadzonek 'Elsanta' nie różniła się między roślinami doświetlanymi światłem czerwonym i roślinami kombinacji kontrolnej (rys. 2A). W przypadku odmiany 'Selva' parametr Fv/Fm wykazywał niewielką zmienność przez cały czas trwania eksperymentu, jednak po 57 dniach wartość tego parametru była wyższa u roślin doświetlanych światłem czerwonym niż u roślin kontrolnych (rys. 2B).

W badaniach Nadalinięgo i in. (2017) na sadzonkach „frigo” odmiany 'Elsanta' rosnących w kontrolowanych warunkach, podobnie jak w naszych badaniach, nie zaobserwowano wpływu światła czerwonego na wielkość powierzchni liści oraz długość ogonków liściowych, nastąpił również spadek zawartości chlorofilu w porównaniu z roślinami z kombinacji kontrolnej. U sadzonek truskawki stale owocującej 'HS138' rosnących w świetle czerwonym zaobserwowano obniżoną wydajność fotosyntezy w porównaniu z roślinami rosnącymi w świetle niebieskim (Yoshida i in. 2016). Z kolei w przypadku roślin truskawki odmiany dnia krótkiego 'Elkat' poddanych działaniu monochromatycznego światła czerwonego zaobserwowano stymulację wzrostu elongacyjnego oraz syntezy chlorofilu (Samuolienė i in. 2010). Podobnie u roślin truskawki odmiany 'Daewang' rosnących w tunelu foliowym i doświetlanych diodami emitującymi światło czerwone zaobserwowano istotnie wyższą całkowitą zawartość chlorofilu niż u roślin niedoświetlanych (Choi i in. 2015).

Ekspozycja na dodatkową dawkę światła dalekiej czerwieni spowodowała wydłużenie ogonków liściowych u sadzonek odmiany 'Elsanta' w porównaniu z roślinami w kombinacji kontrolnej, nie miała natomiast wpływu na średnią powierzchnię liścia i liczbę liści na roślinie (tab. 2). U roślin odmiany 'Selva' doświetlanych daleką czerwienią zaobserwowano mniejszą liczbę liści na roślinie niż u roślin kombinacji kontrolnej, powierzchnia liści oraz długość ogonków liściowych nie różniły się istotnie u roślin poddanych doświetlaniu i kontrolnych (tab. 2). Podobnie jak w przypadku światła czerwonego doświetlanie daleką czerwienią całkowicie zahamowało rozwój rozłogów u obu odmian truskawki (tab. 2). Doświetlanie światłem dalekiej czerwieni powodowało istotne obniżenie indeksu zawartości chlorofilu u odmiany 'Elsanta' po 42 dniach, a u odmiany 'Selva' – po 57 dniach trwania doświadczenia (rys. 1). Po 57 dniach maksymalna wydajność fotochemiczna PSII była istotnie wyższa u roślin doświetlanych światłem dalekiej czerwieni niż u roślin kontrolnych obu badanych odmian truskawki (rys. 2).

W przypadku truskawki odmiany dnia krótkiego 'Paros' doświetlanie światłem dalekiej czerwieni miało istotny wpływ na wzrost roślin, spowodowało wydłużenie ogonków liściowych, zwiększenie powierzchni liści, liczby liści na roślinie oraz wzrost zawartości chlorofilu (Zahedi i Sarikhani 2016). Podobnie jak w naszych badaniach u roślin odmiany 'Paros' doświetlanych daleką czerwienią nastąpiło zahamowanie rozwoju rozłogów (Zahedi i Sarikhani 2016).

Jednym z najważniejszych efektów działania światła dalekiej czerwieni na rośliny jest syndrom unikania cienia (Li i in. 2021). Zjawisko to związane jest z wieloma zmianami morfologicznymi w roślinach, takimi jak zwiększenie powierzchni liści, stymulowanie wzrostu elongacyjnego pędów, ograniczenie rozkrzewiania i akumulacja suchej masy, powoduje także szereg zmian fizjologicznych, m.in. wpływa na proces fotosyntezy (Li i in. 2021). Wydłużanie pędów pod wpływem światła dalekiej czerwieni zaobserwowano u różnych gatunków roślin, m.in. u pomidora (Kalaitzoglou i in. 2019) i kabaczka (Yang i in. 2012). Badania Hwanga i in. (2020) wskazują, że wpływ doświetlania światłem dalekiej czerwieni na wzrost siewek jest w dużym stopniu uzależniony od gatunku rośliny. W naszych badaniach doświetlanie daleką czerwinią spowodowało wydłużenie ogonków liściowych u roślin odmiany ‘Elsanta’, natomiast u odmiany ‘Selva’ nie zaobserwowano tego efektu. Doświetlanie światłem dalekiej czerwieni miało również pozytywny wpływ na maksymalną efektywność reakcji fotochemicznej PSII u obydwu badanych odmian truskawki.

Różnice w wynikach naszych badań oraz prezentowanych przez innych autorów mogą być efektem innych warunków świetlnych zastosowanych w doświadczeniu (doświetlanie *vs.* wzrost w świetle monochromatycznym), różnic w natężeniu światła oraz w materiale wyjściowym. W przypadku naszych badań były to rośliny młode, pochodzące bezpośrednio z kultur *in vitro*, a warunki wzrostu pędów podczas mikrorozmnażania mogły wpłynąć na ich odpowiedź morfogenetyczną.

WNIOSKI

1. Stosowanie doświetlania lampami LED emitującymi światło o różnych barwach umożliwia wpływanie na wzrost mikrorozmnażanych sadzonek truskawki rosnących w kontrolowanych warunkach.
2. Doświetlanie światłem niebieskim istotnie wpływa na parametry wzrostu sadzonek pochodzących z kultur *in vitro* truskawki odmiany fotoneutralnej ‘Selva’, ale nie ma istotnego wpływu na wzrost sadzonek odmiany dnia krótkiego ‘Elsanta’.
3. Doświetlanie światłem czerwonym i dalekiej czerwieni całkowicie hamuje rozwój rozłogów obydwu odmian truskawki, światło niebieskie ogranicza tworzenie rozłogów o 50%.
4. Doświetlanie światłem czerwonym i dalekiej czerwieni może wpływać na obniżenie zawartości chlorofilu u sadzonek truskawki, ma jednak pozytywny wpływ na aktywność fotosyntetyczną roślin.

Literatura

- Boxus P. 1999. Micropropagation of strawberry via axillary shoot proliferation. *Plant Cell Culture Protocols. Methods in Molecular Biology* 111: 103–114. DOI: 10.1385/1-59259-583-9:103.
- Bradford E., Hancock J.F., Warner R.M. 2010. Interactions of temperature and photoperiod determine expression of repeat flowering in strawberry. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 135(2): 102–107. DOI: 10.21273/jashs.135.2.102.
- Castro P., Bushakra J.M., Stewart P., Weebadde C.K., Wang D., Hancock J.F. i in. 2015. Genetic mapping of day-neutrality in cultivated strawberry. *Molecular Breeding* 35; 79; 16 s. DOI: 10.1007/s11032-015-0250-4.
- Choi H.G., Moon B.Y., Kang N.J. 2015. Effects of LED light on the production of strawberry during cultivation in a plastic greenhouse and in a growth chamber. *Scientia Horticulturae* 189: 22–31. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.03.022.
- Demotes-Mainard S., Péron T., Corot A., Bertheloot J., Le Gourrierc J., Pelleschi-Travier S. i in. 2016. Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture. *Environmental and Experimental Botany* 121: 4–21. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2015.05.010.
- FAOSTAT 2019. Baza danych. <https://www.fao.org/faostat>
- Hancock J.F., Sjulín T.M., Lobos G.A. 2008. Strawberries. W: Hancock J.F. (red.), *Temperate Fruit Crop Breeding*. Springer, s. 393–438. DOI: 10.1007/978-1-4020-6907-9_13.
- Hernández R., Kubota C. 2016. Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs. *Environmental and Experimental Botany* 121: 66–74. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2015.04.001.
- Hwang H., An S., Lee B., Chun C. 2020. Improvement of growth and morphology of vegetable seedlings with supplemental far-red enriched LED lights in a plant factory. *Horticulturae* 6(4); 109;14 s. DOI: 10.3390/horticulturae6040109.
- Kalaitzoglou P., van Ieperen W., Harbinson J., van der Meer M., Martinakos S., Weerheim K. i in. 2019. Effects of continuous or end-of-day far-red light on tomato plant growth, morphology, light absorption, and fruit production. *Frontiers in Plant Science* 10: 322. DOI: 10.3389/fpls.2019.00322.
- Kowalewska Ł., Mostowska A. 2015. Dzień i noc w życiu roślin. *Kosmos* 64(3): 471–483.
- Li H., Ye W., Wang Y., Chen X., Fang Y., Sun G. 2021. RNA sequencing-based exploration of the effects of far-red light on lncRNAs involved in the shade-avoidance response of *D. officinale*. *PeerJ* 9; e10769; 37 s. DOI: 10.7717/peerj.10769.
- Massetani F., Gangatharan R., Neri D. 2011. Plant architecture of strawberry in relation to abiotic stress, nutrient application and type of propagation system. Husaini A.M., Mercado J.A. (red.), *Genomics, Transgenics, Molecular Breeding and Biotechnology of Strawberry*. Genes, Genomes and Genomics 5(Special Issue 1): 12–23.
- Montgomery B.L. 2016. Spatiotemporal phytochrome signaling during photomorphogenesis: from physiology to molecular mechanisms and back. *Frontiers in Plant Science* 7; 480; 8 s. DOI: 10.3389/fpls.2016.00480.
- Nadalini S., Zucchi P., Andreotti C. 2017. Effects of blue and red LED lights on soilless cultivated strawberry growth performances and fruit quality. *European Journal of Horticultural Science* 82(1): 12–20. DOI: 10.17660/ejhs.2017/82.1.2.

- Park Y., Runkle E.S. 2019. Blue radiation attenuates the effects of the red to far-red ratio on extension growth but not on flowering. *Environmental and Experimental Botany* 168; 103871. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2019.103871.
- Samtani J.B., Rom C.R., Friedrich H., Fennimore S.A., Finn C.E., Petran A. i in. 2019. The status and future of the strawberry industry in the United States. *HortTechnology* 29(1): 11–24. DOI: 10.21273/horttech04135-18.
- Samuolienė G., Brazaitytė A., Urbonavičiūtė A., Šabajevienė G., Duchovskis P. 2010. The effect of red and blue light component on the growth and development of frigo strawberries. *Zemdirbyste-Agriculture* 97(2): 99–104.
- 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(10); e0163121; 32 s. DOI: 10.1371/journal.pone.0163121.
- Stuemky A., Uchanski M.E. 2020. Supplemental light-emitting diode effects on the growth, fruit quality, and yield of two greenhouse-grown strawberry (*Fragaria* × *ananassa*) cultivars. *HortScience* 55(1): 23–29. DOI: 10.21273/hortsci14113-19.
- Stutte G.W. 2009. Light-emitting diodes for manipulating the phytochrome apparatus. *HortScience* 44(2): 231–234. DOI: 10.21273/hortsci.44.2.231.
- Tripathi S., Hoang Q.T.N., Han Y.-J., Kim J.-I. 2019. Regulation of photomorphogenic development by plant phytochromes. *International Journal of Molecular Sciences* 20; 6165; 17 s. DOI: 10.3390/ijms20246165.
- Warner R., Wu B.-S., MacPherson S., Lefsrud M. 2021. A review of strawberry photobiology and fruit flavonoids in controlled environments. *Frontiers in Plant Science* 12; 611893; 13 s. DOI: 10.3389/fpls.2021.611893.
- Yang Z.-C., Kubota C., Chia P.-L., Kacira M. 2012. Effect of end-of-day far-red light from a movable LED fixture on squash rootstock hypocotyl elongation. *Scientia Horticulturae* 136: 81–86. DOI: 10.1016/j.scienta.2011.12.023.
- Yoshida H., Mizuta D., Fukuda N., Hikosaka S., Goto E. 2016. Effects of varying light quality from single-peak blue and red light-emitting diodes during nursery period on flowering, photosynthesis, growth, and fruit yield of everbearing strawberry. *Plant Biotechnology* 33(4): 267–276. DOI: 10.5511/plantbiotechnology.16.0216a.
- Zahedi S.M., Sarikhani H. 2016. Effect of far-red light, temperature, and plant age on morphological changes and induction of flowering of a 'June-bearing' strawberry. *Horticulture, Environment, and Biotechnology* 57(4): 340–347. DOI: 10.1007/s13580-016-0018-8.
- Zheng J., Ji F., He D., Niu G. 2019. Effect of light intensity on rooting and growth of hydroponic strawberry runner plants in a LED plant factory. *Agronomy* 9; 875; 13 s. DOI: 10.3390/agronomy9120875.

Wyniki uzyskano w ramach badań statutowych IO-PIB, temat badawczy nr ZBS/7/2016, realizowany w latach 2016–2020.