

Tomasz CEGIELSKI
Dawid BUJALSKI
Katarzyna KOWALCZYK
Janina GAJC-WOLSKA
Lucyna HEMKA

ZASTOSOWANIE PROGRAMOWANIA EMISJI ŚWIATŁA W DOŚWIETLANIU ŹRÓDŁAMI ELEKTROLUMINESCENCYJNYMI ROŚLIN POMIDORA

STRESZCZENIE *Niniejszy artykuł opisuje system doświetlania upraw, w którym emisja światła jest programowana. Zastosowane półprzewodnikowe źródła światła charakteryzują się widmem dopasowanym do potrzeb roślin oraz energooszczędnością. Działanie systemu pozwala na zbadanie optymalnych parametrów doświetlania uprawy szklarniowej pomidora.*

Słowa kluczowe: oświetlenie roślin, LED, system sterowania
DOI: 10.5604/00326216.1210748

1. WSTĘP

Uprawa roślin warzywnych, a w szczególności pomidorów, poza sezonem letnim w klimacie umiarkowanym jaki panuje w Polsce, wymaga doświetlania światłem sztucznym. Półprzewodnikowe (elektroluminescencyjne) źródła światła [18] przy odpowiednim dobraniu ich parametrów doskonale się do tego nadają. Poniżej opisano

mgr inż. Tomasz CEGIELSKI¹⁾, mgr inż. Dawid BUJALSKI²⁾
e-mail: tc@niviss.com; e-mail: dawid_bujalski@sggw.pl

dr inż. Katarzyna KOWALCZYK²⁾
prof. dr hab. Janina GAJC-WOLSKA²⁾, dr Lucyna HEMKA³⁾

¹⁾ NIVISS PHP Sp. z o.o. Sp. k., ul. Rdestowa 53d, 81-577 Gdynia

²⁾ Katedra Roślin Warzywnych i Leczniczych Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

³⁾ Instytut Elektrotechniki, ul. M. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa

zastosowanie systemu doświetlania, w którym emisja światła może być programowana w wielu aspektach. Umożliwiło to zbadanie wpływu parametrów oświetlenia na wzrost i plonowanie roślin i wybranie optymalnego ich ustawienia pod względem efektu i oszczędności energii.

Udowodniono, że stosując te same oprawy oświetleniowe przy odpowiednim sposobie ich sterowania można uzyskać zbliżony rezultat, zużywając znacznie mniej energii elektrycznej niż przy kontrolowaniu tych opraw jedynie przez standardowy system szklarniowy w zależności od poziomu oświetlenia słonecznego.

Światło jest głównym czynnikiem fizycznym wpływającym na fizjologię roślin, dostarcza energii niezbędnej do przebiegu procesu fotosyntezy oraz wpływa na rozwój roślin poprzez fotomorfogenezę, fototropizm i fotoperiodyzm [20].

Oddziaływanie światła na rośliny jest procesem złożonym, w doświadczeniach, które koncentrują się na makroskopowym obrazie rośliny na ogół rozpatrywany jest wpływ światła niebieskiego i czerwonego na roślinę. Wpływ udziału tych składników w widmie na parametry morfologiczne jest szeroko dyskutowany i wskazuje oddziaływanie zróżnicowane zarówno ze względu na gatunek jak i fazę rozwojową rośliny [6]. Dotychczasowe badania obejmują zarówno analizę wymiany gazowej [15], jak i morfologię [6]. Oddziaływanie światła niebieskiego wykazuje działanie stymulujące różne mechanizmy w roślinie od regulacji transportu wody i mikroskładników po mechanizmy obronne [21] a sygnałowe oddziaływanie światła niebieskiego jest zauważalne już przy niewielkich poziomach jego intensywności. Sygnałowe oddziaływanie światła czerwonego ogranicza się głównie do oddziaływania na receptory fitochromowe i pozostaje w relacji do światła głębokiej czerwieni, ograniczając elongację komórek [2].

Efektywność fotosyntetyczna światła nie jest prostą pochodną jego absorpcji w roślinie. Stwierdzono, że nie zależy ona od długości fali w zakresie PAR [11], jednakże o ile światło czerwone jest absorbowane niemal w całości w aparacie fotosyntetycznym, to światło niebieskie w dużej mierze jest absorbowane w substancjach nieaktywnych fotosyntetycznie (np. antocjany) jak i słabo aktywnych (np. karotenoidy) [6]. Planując niniejsze doświadczenie założono, że głównym donorem energii dla procesu fotosyntezy będą kwanty światła czerwonego, światło niebieskie stanowić ma podstawę do modyfikacji procesów fotomorfogenetycznych oraz oddziaływania sygnałowego.

Zastosowanie zmiennego widma światła w przebiegu wzrostu i rozwoju roślin może pozwolić na wykorzystanie działania sygnałowego światła niebieskiego w sposób następujący – w początkowej fazie wzrostu rośliny winno spowodować zmniejszenie wysokości rośliny i poprawny rozwój systemu korzeniowego [7], w dalszych fazach rozwojowych należy jednak zmniejszyć jego wpływ aby zintensyfikować zakwitanie roślin, a także zwiększyć intensywność fotosyntezy w relacji do ilości pochłanianego światła [14]. Przebieg dzienny widma światła jest modyfikowany przede wszystkim na stymulowanie otwarcia aparatu szparkowego [15] na początku dnia.

Skuteczność stosowania najbardziej popularnych źródeł elektroluminescencyjnych – LED (ang. Light Emitting Diodes) do doświetlania roślin została potwierdzona w badaniach przedstawionych w literaturze [16]. Badania te często dotyczą uprawy pomidorów [9], jest to bowiem najbardziej, w naszej części świata, rozpowszechniony gatunek warzyw, jeśli chodzi o areal upraw szklarniowych. Wykazano też, że nawet w obrębie jednego gatunku optymalne oświetlenie może się istotnie różnić dla odmian uprawnych [10]. Zarówno skład widmowy światła jak i wiek rośliny, wpływają na intensywność przebiegu fotosyntezy [15]. Dlatego w ekofizjologii roślin jest istotne

zapotrzebowanie na narzędzia umożliwiające badanie wpływu różnych parametrów oświetlenia. Takie możliwości daje badaczom przedstawiony w artykule system.

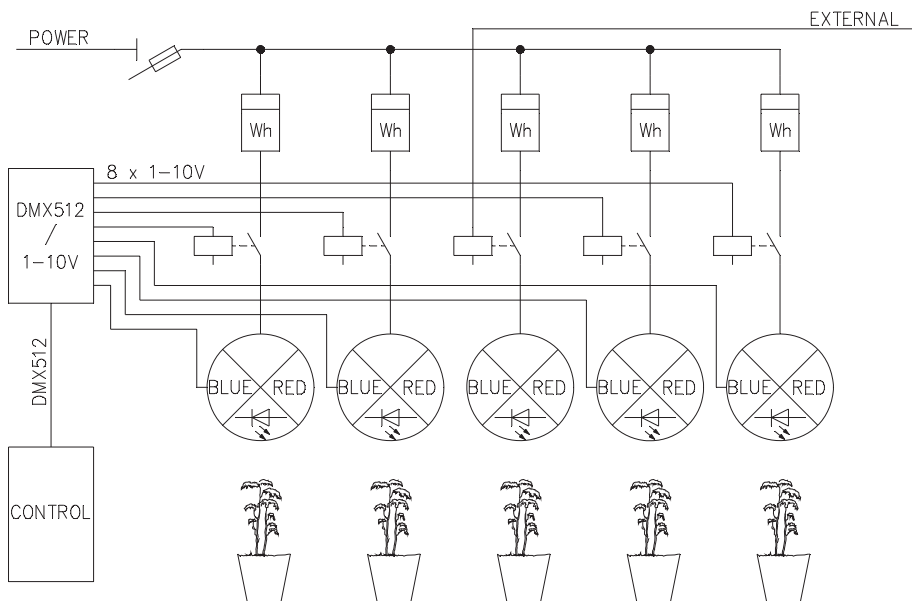
2. OPIS SYSTEMU

W jednej z kamer Doświadczalnego Ośrodka Szklarniowego SGGW w Warszawie zbudowano system oświetlenia wykorzystujący oprawy typu DAPLON/2011 [16]. Do ich sterowania zastosowano specjalnie oprogramowany dotykowy panel sterowniczy [5], będący jednocześnie specjalistycznym kontrolerem oświetlenia szklarni oraz centralą systemu DMX512. System ten umożliwił porównanie pięciu różnych warunków oświetleniowych przy zachowaniu takich samych pozostałych parametrów środowiskowych (temperatury, wilgotności, oświetlenia zewnętrznego).

Cztery stanowiska były sterowane przez zawarty w systemie kontroler, piąte – kontrolne było sterowane przez system szklarniowy.

2.1. Schemat blokowy

Na rysunku 1 przedstawiony jest schemat blokowy zmontowanego systemu. Każde ze stanowisk posiada własny licznik zużytej energii elektrycznej oraz identyczną grupę sześciu opraw oświetleniowych. Są to oprawy liniowe ułożone do siebie równoległe i na takiej wysokości by na danym stanowisku z roślinami rozkład światła był równomierny dla obu składowych widma: czerwonej i niebieskiej. Kanał emitujący barwę niebieską posiada możliwość regulacji natężenia strumienia wyjściowego za pomocą wejścia w standardzie 1-10 V.



Rys. 1. Schemat blokowy

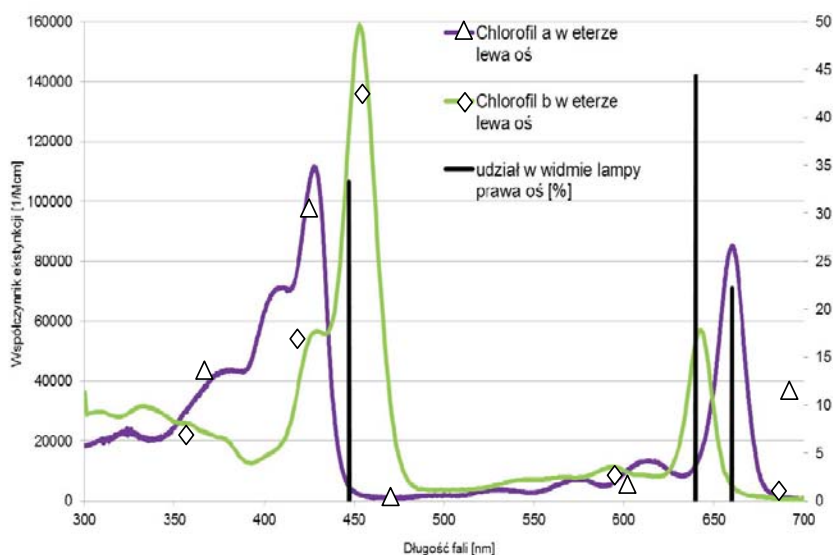
Zastosowane oprawy mają maksima promieniowania na długościach fal zbliżonych do maksimów widma absorpcji chlorofilów [20]. W przypadku *chlorofilu a* maksima absorpcji znajdują się na długościach 430 nm i 662 nm, w przypadku *chlorofilu b* maksima absorpcji znajdują się na długościach 453 nm i 642 nm przy czym wyższa absorpcja występuje dla krótszej długości fali.

Skonstruowane lampy emitują promieniowanie przy maksymalnej wydajności z następującym składem widmowym :

- 447 nm – 33,3%
- 640 nm – 44,4%
- 660 nm – 22,2%

Na rysunku 2 przedstawione jest widmo absorpcji chlorofilów z zaznaczonymi pikami emisji zastosowanych półprzewodnikowych źródeł światła.

Ponieważ doświetlanie odbywało się w szklarni, do roślin docierało też promieniowanie o szerokim spektrum emitowane przez słońce, chociaż o niewielkim natężeniu, z uwagi na porę roku.



Rys. 2. Widma absorpcji chlorofilów z zaznaczonymi maksimami emisji zastosowanych lamp

Do podłączenia lamp z wejściem analogowym 1-10 V do kontrolera którego wyjście pracuje w cyfrowym standardzie DMX512 zbudowano interface cyfrowo-analogowy. Aby sterować również źródłami czerwonymi, pomiędzy licznikami energii a grupami opraw nad poszczególnymi stanowiskami, zamontowano zestawy przekaźników sterowanych sygnałem 1-10 V. W ten sposób sterownik o wyjściu w postaci magistrali cyfrowej mógł współpracować z oprawami o wejściu analogowym dimera a nawet z takimi które nie można ściemniać.

Powyższy system umożliwił programowanie emisji światła w 3 aspektach: czasie, widmie i przestrzeni. Zapisany program, korzystając z zegara czasu rzeczywistego,

tabeli wschodów i zachodów słońca oraz wskazań szklarniowego miernika światła zewnętrznego, decydował o ustawianiu natężenia dla różnych składowych widma indywidualnie dla różnych miejsc w kamerze szklarni w zależności od dnia i godziny.

Liczniki zużytej energii elektrycznej pozwoliły na porównanie poboru energii dla poszczególnych stanowisk.

2.2. Możliwości konfiguracji

Kontroler ustawia poziomy natężenia światła niebieskiego oraz włącza i wyłącza całe grupy lamp zgodnie z wprowadzonym do niego programem. Dokładne godziny rozpoczęcia i zakończenia różnych pór dnia mogą być powiązane z aktualną godziną wschodu bądź zachodu słońca. Dzieje się tak dzięki wbudowanemu w kontroler zegarowi czasu rzeczywistego i wprowadzonej tabeli solarnej odpowiedniej dla miejsca uprawy.

Strumień emitowany w poszczególnych kanałach sterowanych opraw może też zależeć od ilości dni które upłynęły od wysiewu lub wysadzenia (DAS, Days After Seeding – ang. dzień po wysiewie).

Kolejny czynnik który może wpływać na oświetlenie to sygnał z czujnika natężenia oświetlenia słonecznego. Można zdefiniować poziom powyżej którego strumień wyjściowy opraw zacznie się zmniejszać oraz poziom powyżej którego lampy wyłączą się zupełnie.

Aby zminimalizować ryzyko niepożądanego zadziałania zabezpieczenia nadprądowego, kontroler zmienia poziomy w kolejnych kanałach wyjściowych w jedno-sekundowych odstępach.

3. OPIS EKSPERYMENTU

Przedmiotem eksperymentu były pomidor, odmiana szklarniowa *Admiro*. Rośliny zostały podzielone na pięć grup z różnymi kombinacjami parametrów doświetlania.

TABELA 1

Badane kombinacje

Numer kombinacji	Zależność intensywności od dnia po wysiewie (DAS)	Zależność intensywności od pory dnia	Natężenie światła niebieskiego korygowane w czasie rzeczywistym
1	nie	nie	tak
2	nie	tak	tak
3	tak	nie	tak
4	tak	tak	tak
kontrola	nie	nie	nie

Zaprojektowany i wykonany system umożliwia kontrolę 2 składowych widma w grupie, mogą to być na przykład diody czerwone oraz niebieskie. Ze względu na ograniczone możliwości sterowania lampami, spowodowane budową opraw, realizo-

wana była jedynie regulacja natężenia światła emitowanego przez diody niebieskie, natomiast czerwone diody były uruchamiane i wyłączane za pomocą przekaźników.

Sterowanie natężeniem na podstawie DAS oznaczała, że począwszy od określonego dnia po wysiewie następowało codzienne zmniejszanie maksymalnego strumienia emisji światła niebieskiego – obliczano współczynnik a_1 .

Sterowanie natężeniem na podstawie pory dnia oznaczała, że natężenia światła niebieskiego było sukcesywnie zmniejszane od początku do końca doświetlania w danym dniu, każdy dzień podzielony był na trzy części:

- I – od 5:30 czasu zimowego do 2 i ½ godziny po wschodzie słońca;
- II – do 2 i ½ godziny przed zachodem słońca;
- III – do 17:30 czasu zimowego.

Współczynnik intensywności strumienia emisji światła niebieskiego (a_2) był największy dla pierwszej części dnia – 100%, średni – 66% dla środkowej oraz najmniejszy – 33% dla końcowej. Ostatecznie intensywność światła niebieskiego określała formuła

$$I = I_{\max} * a_1 * a_2 \quad (1)$$

gdzie :

- a_1 – współczynnik intensywności zależny od DAS (zmienny dla kombinacji 3 i 4),
- a_2 – współczynnik intensywności zależny od pory dnia (zmienny dla kombinacji 2 i 4),
- I_{\max} – maksymalna intensywność światła niebieskiego (33,3% strumienia świetlnego lampy).

Dodatkowo natężenie światła niebieskiego w kombinacjach sterowanych kontrolerem (1-4) było korygowane w czasie rzeczywistym odwrotnie proporcjonalnie do natężenia światła słonecznego.

3.1. Materiał i metody

Nasiona pomidora odmiany „Admiro” (firmy Monsanto dawniej De Ruiters Seeds) wysiano 8 stycznia 2014 r. Rozsadę produkowano w kostkach z wełny mineralnej, typowych dla pomidora (rys. 3). Rośliny w fazie 5 właściwych liści posadzono 18 lutego do mat uprawowych z wełny mineralnej w wyznaczone miejsca ekspozycji na określone światło lamp LED w 5 kombinacjach widma światła (rys. 4). W każdej kombinacji posadzono po 6 roślin (3 rośliny na jednej macie uprawowej). Rośliny doświetlano grupami 5 lamp DAPLON uzyskując gęstość strumienia fotonów średnio 150 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ dla maksymalnej jasności lamp. Pomidor prowadzono na jeden pęd i trzy grona. Doświetlano rośliny od posadzenia na matach z wełny mineralnej do dnia 15 kwietnia (rys. 7). Doświadczenie zakończono 8 maja 2014 r.

Dokonano następujących pomiarów:

- dynamika przyrostu świeżej masy rośliny i całkowita świeża masa rośliny: pędy boczne i liście (masa asymilacyjna). Rośliny czyszczone z pędów bocznych i najstarszych liści do stałej wysokości raz w tygodniu. Usunięte części roślin ważono. Takie zabiegi pielęgnacyjne wykonano w 5 terminach (6.03, 20.03, 27.03, 14.04, 8.05).

W terminie zakończenia doświetlania usunięto i zważono całe rośliny, a uzyskane wyniki posłużyły do obliczenia całkowitej świeżej masy części nadziemnej rośliny.

- Zawartość chlorofilu w liściach mierzono w jednostkach SPAD (absorpcja światła 650 nm – proporcjonalna do zawartości chlorofilu) w 3 terminach (13.03, 20.03, 28.03). Pomiaru dokonano za pomocą urządzenia SPAD 502 firmy Minolta. Wynik uśredniono z pięciu jednostkowych pomiarów wykonanych na piątym, licząc od wierzchołka rośliny, w pełni wykształconym liściu.
- Fluorescencja chlorofilu. Parametry fluorescencji chlorofilu *a* mierzono w 2 terminach (13.03 i 28. 03). Pomiary wykonano dwoma aparatami w tych samych miejscach rośliny, na piątym – licząc od wierzchołka rośliny, w pełni wykształconym liściu. Fluorymetr FMS2 (firmy Hansatech) użyto do pomiaru fluorescencji modulowanej, którym mierzono fluorescencję chlorofilu na świetle, bez adaptacji roślin do ciemności Fluorymetr Pocket PEA (firmy Hansatech) użyto natomiast do pomiaru fluorescencji bezpośredniej, uzyskując pomiar maksymalnej wydajności aparatu fotosyntetycznego roślin po wcześniejszym 30 minutowym zaadaptowaniu liści do ciemności (używając specjalnych klipsów). Analizowano takie parametry jak: wydajność PS II na świetle (F_v'/F_m') oraz maksymalną sprawność fotosystemu PS II w ciemności (F_v/F_m) i PI – wskaźnik witalności PS II [22, 10].
- Plon całkowity. Zbierano owoce w pełni wybarwione. Ostatni zbiór przeprowadzono 08.05.

Wszystkie pomiary wykonano w 6 powtórzeniach. Uzyskane wyniki poddano analizie statystycznej w programie Statgraphics. Istotne różnice między średnimi oszacowano testem Fishera (NIR – najmniejszych istotnych różnic) przy poziomie istotności $p = 0,05$.



Rys. 3. Produkcja rozsady pomidora, 5 dni po pikowaniu



Rys. 4. Rozsada pomidora po umieszczeniu w kamerze doświadczalnej z doświetlaniem źródłami LED

3.2. Wyniki i dyskusja

Świeża masa liści i pędów roślin

W tabeli 2 zestawiono wyniki całkowitej wytworzonej masy zielonej przez rośliny dla poszczególnych kombinacji. Najwięcej masy części zielonych wyprodukowały rośliny w kombinacji 2 oraz w kontroli, były one istotnie różne od pozostałych kombinacji. Najmniej biomasy wytworzyły rośliny w kombinacjach 1 i 3.

TABELA 2

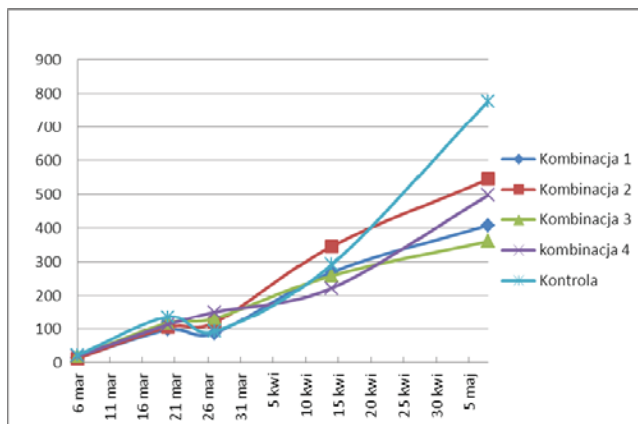
Całkowita świeża masa liści i pędów [g]

Rodzaj doświetlania	Całkowita świeża masa liści i pędów rośliny	
Kombinacja 1	875	a*
Kombinacja 2	1125	b
Kombinacja 3	887	a
Kombinacja 4	1001	ab
Kontrola	1100	b

* Wartości średnie oznaczone tymi samymi inskrypcjami literowymi nie różnią się między sobą istotnie według testu t-Studenta przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$

Rysunek nr 5 przedstawia dynamikę zmian masy pędów liści i pędów bocznych usuwanych w trakcie zabiegów pielęgnacyjnych. Początkowo wytwarzana biomasa we

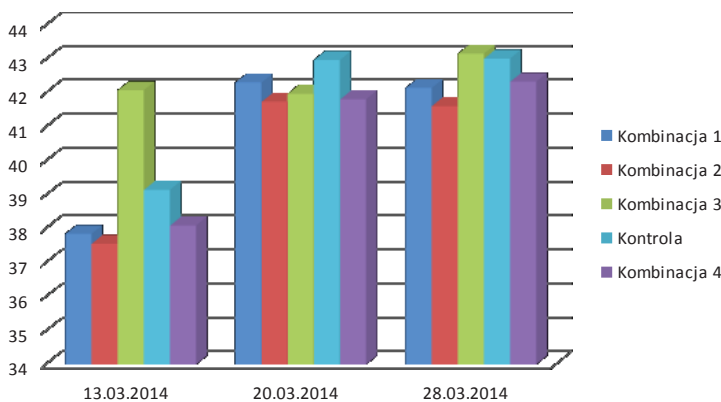
wszystkich kombinacjach była podobna, jednak od 27 marca masa roślin z kombinacji nr 2 była większa, a w końcowym etapie doświadczenia masa roślin kontrolnych była wyraźnie wyższa od pozostałych kombinacji, a więc rośliny w kontroli wykazywały wzrost bardziej wegetatywny niż w pozostałych przypadkach.



Rys. 5. Masa liści i pędów bocznych [g]

Zawartość chlorofilu

W pierwszym terminie pomiaru najniższą względną zawartość chlorofilu stwierdzono w liściach roślin rosnących w warunkach światła w kombinacji nr 2 ale nie była to różnica istotna statystycznie w porównaniu z kombinacjami 1 i 4 czy z kontrolą, natomiast istotnie najwyższą zawartość chlorofilu odnotowano u roślin z kombinacji nr 3 (rys. 6). W kolejnych terminach pomiaru nie wykazano zróżnicowania w zawartości chlorofilu w różnych wariantach doświetlania. Prawdopodobnie naturalne warunki słoneczne były już wystarczająco korzystne dla roślin. Zawartość chlorofilu mieściła się w zakresie od 37,56 do 43,16 jednostek SPAD.



Rys. 6. Zawartość chlorofilu w jednostkach SPAD

Fluorescencja chlorofilu

Pomiar fluorescencji chlorofilu a jest obecnie często wykorzystywany do badania reakcji roślin na zmienne warunki środowiskowe [3, 17, 22]. Aparat fotosyntetyczny, a szczególnie struktura PS II jest bardzo wrażliwa na różne stresy. Pomiar parametrów indukcji fluorescencji chlorofilu pozwala szybko i z dużą czułością oceniać sprawność aparatu fotosyntetycznego roślin [19, 12]. W przypadku negatywnej reakcji aparatu fotosyntetycznego na warunki środowiskowe najczęściej działa kilka czynników jednocześnie. Stres świetlny, występuje gdy barwniki fotosyntetyczne absorbują zbyt dużo energii PAR co do możliwości przetworzenia jej na energię chemiczną w procesie fotosyntezy, bądź też bezpiecznego rozproszenia w postaci ciepła lub wyemitowania w postaci luminescencji chlorofilu. Stres świetlny może wystąpić także przy umiarkowanym napromieniowaniu PAR, gdy równocześnie występują inne czynniki stresowe, jak np. chłód, susza, zanieczyszczenia inhibujące fotosyntezę. Skutkiem stresu świetlnego jest fotoinhibicja reakcji fotosyntezy, spowodowana generacją reaktywnego tlenu, destrukcją centrum reakcji PS II oraz spowolnieniem transportu elektronów w obu fotosystemach. Skutki fotoinhibicji oraz zjawiska towarzyszące dezintegracji aparatu fotosyntetycznego znajdują swoje odzwierciedlenie między innymi w charakterystycznych zmianach przebiegu indukcji fluorescencji (FL) chlorofilu [4, 7, 13].

W przeprowadzonych badaniach reakcji pomidora na zróżnicowane doświetlanie roślin oceniano takie parametry fluorescencji jak wydajność PS II na świetle (Fv'/Fm'), maksymalną sprawność fotosystemu PS II w ciemności (Fv/Fm) oraz wskaźnik witalności PS II – PI (ang. Performance Index). Nie stwierdzono istotnych różnic w wydajności aparatu fotosyntetycznego pomidora w warunkach fazy świetlnej dla roślin doświetlanych w 5 badanych kombinacjach (tab. 3). Natomiast najniższą maksymalną wydajność PS II stwierdzono w kombinacji nr 2, istotnie niższą niż u roślin z warunków świetlnych w kombinacji nr 4 i w kontroli. Dla większości roślin w fazie pełnego rozwoju i w warunkach bezstresowych maksymalna wartość tego parametru wynosi 0,83 [1, 8]. Podobnie istotne zróżnicowanie pojawiło się także w przypadku wartości PI. Najwyższą wartość PI odnotowano w przypadku grupy kontrolnej oraz kombinacji nr 4, najniższą wartość odnotowano w przypadku kombinacji 2 (tab. 3).

TABELA 3

Parametry fluorescencji chlorofilu: wydajność PS II na świetle (Fv'/Fm'), maksymalna wydajność PS II (Fv/Fm) oraz wskaźnik witalności PS II – PI

Rodzaj doświetlania	Fv'/Fm'	Fv/Fm	PI
Kombinacja 1	0,718	0,822 ab*	4,23 ab
Kombinacja 2	0,737	0,815 b	3,69 b
Kombinacja 3	0,747	0,823 ab	4,41 ab
Kombinacja 4	0,717	0,828 a	4,62 a
Kontrola	0,758	0,831 a	4,96 a

* Wartości średnie oznaczone tymi samymi inkrzypcjami literowymi nie różnią się między sobą istotnie według testu t-Studenta przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$

Plon wczesny

Owoce dojrzałe zebrano 8-go maja. Najwyższy plon uzyskano dla grupy kontrolnej – wyniósł on średnio 927 g z rośliny. Podobny plon: 915 g uzyskano w kombinacji 3. Najniższy plon zebrano w kombinacji 2 – wyniósł on średnio 487,5 g z rośliny (tab. 4).

Zastosowane doświetlanie pomidora w kombinacji nr 2 wykazało negatywny wpływ na pomidora. W tej kombinacji uzyskano gorsze parametry wzrostu roślin, potencjału aparatu fotosyntetycznego, niższe zawartości chlorofilu w liściach, co ostatecznie skutkowało niższym plonem wczesnym.

TABELA 4

Plon owoców pomidora

Rodzaj doświetlania	Masa owoców (g)	
Kombinacja 1	505,0	b*
Kombinacja 2	487,5	b
Kombinacja 3	915,0	a
Kombinacja 4	758,3	ab
Kontrola	927,5	a

* Wartości średnie oznaczone tymi samymi inskrypcjami literowymi nie różnią się między sobą istotnie według testu t-Studenta przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$

Zużycie energii

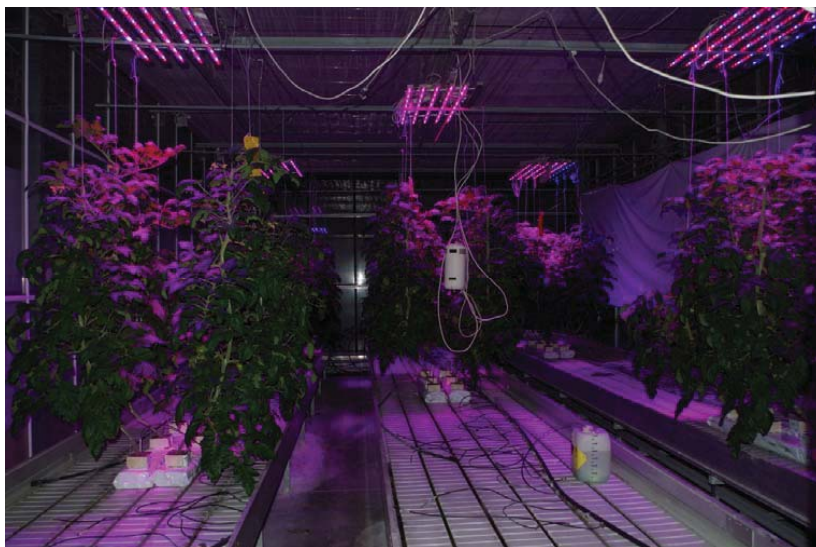
Podczas trwania doświadczenia monitorowano zużycie energii (mierzone pobór mocy czynnej), łączne zużycie przedstawia tabela 5, Najwyższe zużycie energii zanotowano w grupie kontrolnej i wyniosło ono 171,2 kWh, najniższe zużycie zanotowano w kombinacji 4 i wyniosło ono 97,2 kWh.

TABELA 5

Energochłonność

Rodzaj doświetlania	Zużycie energii [kWh]	Stosunek do zużycia w grupie kontrolnej	Plon wczesny / zużycie energii [g/kWh]
Kombinacja 1	116,5	0,68	4,335
Kombinacja 2	113,1	0,66	4,310
Kombinacja 3	113,0	0,66	8,097
Kombinacja 4	97,2	0,57	7,802
Kontrola	171,2	1,0	5,418

Stosunek wagi plonu wczesnego do zużycia energii na doświetlanie był znacząco wyższy w kombinacji 3 i 4 niż w grupie kontrolnej oraz zauważalnie niższy w kombinacji 1 i 2.



Rys. 7. Widok na kamerę szklarniową z 5 stanowiskami doświetlania na 2 tygodnie przed zakończeniem doświetlania

4. WNIOSKI

Zastosowany kontroler umożliwił zbudowanie systemu pozwalającego na porównanie wpływu zmiennej intensywności doświetlania na rozwój roślin. Możliwe było do tego wykorzystanie istniejących opraw oświetleniowych. Dzięki temu, wykorzystując istniejącą infrastrukturę, przeprowadzono eksperyment sprawdzający wpływ zmiany strumienia maksymalnego w zależności od pory dnia i liczby dni od wysadzenia roślin na wzrost i rozwój pomidora oraz możliwość oszczędności zużycia energii.

Możliwe jest uzyskanie podobnych plonów przy różnych parametrach doświetlania. Obniżanie natężenia światła niebieskiego proporcjonalnie do wieku rośliny, spowodowało utrzymanie wysokich plonów przy jednoczesnym obniżeniu zużycia energii o ponad 30%.

Zmniejszenie zużycia energii może być realizowane przez stosowanie nowoczesnych diodowych źródeł światła a efekt ten może być pogłębiony przez odpowiednie programowanie emisji światła.

Zastosowanie opraw wielokanałowych sterowanych cyfrowo pozwoliłoby na bardziej zaawansowane programowanie emisji światła i przeprowadzenie bardziej zaawansowanych eksperymentów.

LITERATURA

1. Angelini G., Ragni P., Esposito D., Giardi P., Pompili M.L., Moscardelli R., Giardi M.T.: A device to study the effect of space radiation on photosynthetic organisms. *Physica Medica*, vol. XVII, Supplement 1, s. 267-268, 2001.

2. Ballaré C.L., Scopel A.L., Sánchez R.A.: Far-Red Radiation Reflected from Adjacent Leaves: An Early Signal of Competition in Plant Canopies, *Science*, vol. 247, s. 329-332, 1990.
3. Bilger W., Schreiber U., Bock M.: Determination of the quantum efficiency of photosystem II and of non-photochemical quenching of chlorophyll fluorescence in the field. *Oecologia* 102, s. 425–432, 1995.
4. Bolhàr-Nordenkampf H.R., Öquist G.: Chlorophyll fluorescence as a tool in photosynthesis research. In: *Photosynthesis and production in a changing environment. A field and laboratory manual.* (Eds. Hall D. O. et al.) Chapman & Hall, London, (12), s. 193-206, 1993.
5. Cegielski T.: Dotykowy panel sterowniczy TFT do systemu oświetleniowego wspomagającego rozwój roślin, *IAPGOS*, nr 3, s. 50-53, 2014.
6. Cope K.R., Snowden M.C., Bugbee B.: Photobiological Interactions of Blue Light and Photosynthetic Photon Flux: Effects of Monochromatic and Broad-Spectrum Light Sources, *Photochemistry and Photobiology*, z. 90, s. 574–584, 2014.
7. Hernández R., Kubota C.: Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs, *Environmental and Experimental Botany*; DOI: 10.1016, 2015.
8. Kalaji M.H., Łoboda T.: Fluorescencja chlorofilu w badaniach stanu fizjologicznego roślin. Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 2010.
9. Klamkowski K., Treder W., Treder J., Puternicki A., Lisak E.: Wpływ doświetlania lampami sodowymi i LED na aktywność fotosyntetyczną oraz wzrost roślin pomidora, *Prace Instytutu Elektrotechniki*, z. 256, s. 75-86, 2012.
10. Kowalczyk K., Gajc-Wolska J., Bujalski D., Marcinkowska M., Hemka L.: Wpływ doświetlania rozsady pomidora lampami metalohalogenkowymi i wysokoprężnymi lampami sodowymi na wybrane parametry fizjologiczne roślin, *Prace Instytutu Elektrotechniki*, z. 256, s. 311-318, 2012.
11. McCree K.J.: Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data, *Agricultural Meteorology*, s. 443–453, 1972.
12. Michałek Wł., Sawicka B.: Zawartość chlorofilu i aktywność fotosyntetyczna średnio późnych odmian ziemniaka w warunkach pola uprawnego w środkowo-wschodniej Polsce. *Acta Agrophysica*, 6(1), s. 183-195, 2005.
13. Murkowski A.: Zastosowanie luminescencji chlorofilu do badania reakcji aparatu fotosyntetycznego roślin pomidora na stres świetlny oraz chłód. *Acta Agrophysica*, 4(2), s. 431-439, 2004.
14. Nanya, K., Ishigami, Y., Hikosaka, S., Goto, E.: Effects of blue and red light on stem elongation and flowering of tomato seedlings. *Acta Hort.* 956, s. 264–266, 2012.
15. O'Carrigana A., Bablaa M., Wanga F, Liua X, Maka M., Thomasa R., Bellottia B., Chen Z.: Analysis of gas exchange, stomatal behaviour and micronutrients uncovers dynamic response and adaptation of tomato plants to monochromatic light treatments, *Plant Physiology and Biochemistry*, vol. 82, s.105-115, 2014.
16. Puternicki A. Lisak E., Treder W., Treder J., Klamkowski K.: Zastosowanie półprzewodnikowych źródeł światła w doświetlaniu sadzonek wybranych gatunków roślin, *Prace Instytutu Elektrotechniki*, z. 256, s. 191-209, 2012.

17. Schreiber U., Bilger W., Hormann H., Neubauer C.: Chlorophyll fluorescence as a diagnostic tool: basics and some aspects of practical relevance. In: Photosynthesis: a comprehensive treatise (Ed. A.S. Raghavendra). Cambridge University Press, 24, s. 320-336, 2000.
18. Schubert E. F.: Light-Emitting Diodes, 2nd Edition, Cambridge Univ. Press, New York, 2006.
19. Sestak Z., Siffel P.: Leaf – age related differences in chlorophyll fluorescence. Photosynthetica, 33, (3-4), s. 347-369, 1997.
20. Taiz L., Zeiger E. 2010. Plant Physiology, 5th Edition, Sinauer Associates, Inc.
21. Xu H., Xu Q., Li F., Feng Y., Qina F., Fang W., 2012. Applications of xerophytophysiology in plant production—LED blue light as a stimulus improved the tomato crop. Scientia horticulturae. 148:190-196.
22. Živčák M., Brestič M., Olšovská K., Slamka P.: Performance index as a sensitive indicator of water stress in *Triticum aestivum* L. Plant, Soil and Environment, no. 4:, s. 133–139, 2008.

Przyjęto do druku 24.03.2016 r.

USE OF LIGHT EMISSION PROGRAMMING IN TOMATO GROW LIGHT SYSTEM

Tomasz CEGIELSKI, Dawid BUJALSKI, Katarzyna KOWALCZYK,
Janina GAJC-WOLSKA, Lucyna HEMKA

ABSTRACT *This paper describes a lighting system for the horticultural purposes in which the light emission is being programmed. Applied semiconductor light sources are especially suited for the lighting of plants as well as for power consumption saving. The operation of the system allows to investigate the optimal parameters of the grow light in greenhouse tomato cultivation.*

Keywords: *grow light, LEDs, control system*

Mgr inż. Tomasz CEGIELSKI – absolwent Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej (1998). Do 2006 asystent w PIT, gdzie przedmiotem jego pracy były mikrofalowe podzespoły urządzeń rozpoznania radiolokacyjnego i zagadnienia EMC. Następnie kierownik Laboratorium Innowacyjno-wdrożeniowego TeleMobile Electronics działającego w Pomorskim Parku Naukowo-Technologicznym. Od 2009 główny konstruktor NIVISS – firmy dostarczającej rozwiązania oparte na LED. Członek IEEE od 2008.



Mgr inż. Dawid BUJALSKI – absolwent Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej (2004). W latach 2003-2004 pracownik firmy instalującej systemy kontroli klimatu w obiektach szklarniowych. Od 2004 roku kierownik Szklarniowego Ośrodka Doświadczalnego SGGW w Warszawie. W ramach prac badawczych zajmuje się optymalizacją uprawy roślin warzywnych w obiektach szklarniowych w tym wpływu parametrów klimatu i systemów doświetlania roślin na parametry produkcyjne.

