

Andrzej PUTERNICKI
Edmund LISAK
Waldemar TREDER
Jadwiga TREDER
Krzysztof KLAMKOWSKI

ZASTOSOWANIE PÓŁPRZEWODNIKOWYCH ŹRÓDEŁ ŚWIATŁA W DOŚWIETLANIU SADZONEK WYBRANYCH GATUNKÓW ROŚLIN

STRESZCZENIE *W artykule podano wyniki analizy możliwości zastosowania półprzewodnikowych źródeł światła (LED) w doświetlaniu wybranych gatunków sadzonek roślin. Przedstawiono wybrane zagadnienia z zakresu doświetlania upraw szklarniowych światłem sztucznym z uwzględnieniem aspektów fotosyntetycznych i fotomorfogenetycznych. Scharakteryzowano badania przeprowadzone w Instytucie Elektrotechniki i Instytucie Ogrodnictwa. Do badań wykorzystano opracowany model oprawy LED o widmie w zakresie światła niebieskiego, czerwonego oraz promieniowania bliskiej podczerwieni. Artykuł zawiera opis tej oprawy wraz z przedstawieniem jej podstawowych parametrów fotometrycznych i elektrycznych. W czterotygodniowym eksperymencie badawczym wykazano, że zastosowanie tej oprawy do doświetlania sadzonek roślin może prowadzić do wymiernego zmniejszenia kosztów eksploatacyjnych w porównaniu z obecnie stosowanymi w tym zakresie lampami sodowymi.*

Słowa kluczowe: *światło naturalne i sztuczne, doświetlanie roślin, fotosynteza, fotomorfogeneza, lampa LED*

mgr inż. Andrzej PUTERNICKI ¹⁾
e-mail: a.puternicki@iel.waw.pl

mgr inż. Edmund LISAK ¹⁾, **prof. dr hab. Waldemar TREDER** ²⁾,
dr Jadwiga TREDER ²⁾, **dr Krzysztof KLAMKOWSKI** ²⁾

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

1. WSTĘP

W miesiącach wiosenno-letnich wzrost i rozwój roślin w naszym kraju przebiega w warunkach dostatecznej intensywności światła. Natomiast jesienią oraz wczesną wiosną (od września do marca) występuje jego deficyt. W wielu badaniach wykazano, że istnieje silna liniowa zależność między dostępnością światła a spadkiem plonu, czy też jakości uprawianych roślin. Dlatego też od wielu lat w praktyce szklarniowej stosuje się doświetlanie roślin. Rośliny doświetlane są na różnych etapach ich rozwoju wegetatywnego i generatywnego. Istotnym zagadnieniem staje się produkcja zdrowych sadzonek roślin warzywnych i ozdobnych. Dla wspomagania rozwoju młodych sadzonek stosowane jest powszechnie sztuczne ich naświetlanie przy wykorzystaniu wyładowczych źródeł światła w pokojach wzrostowych, czy też w uprawach pod osłonami.

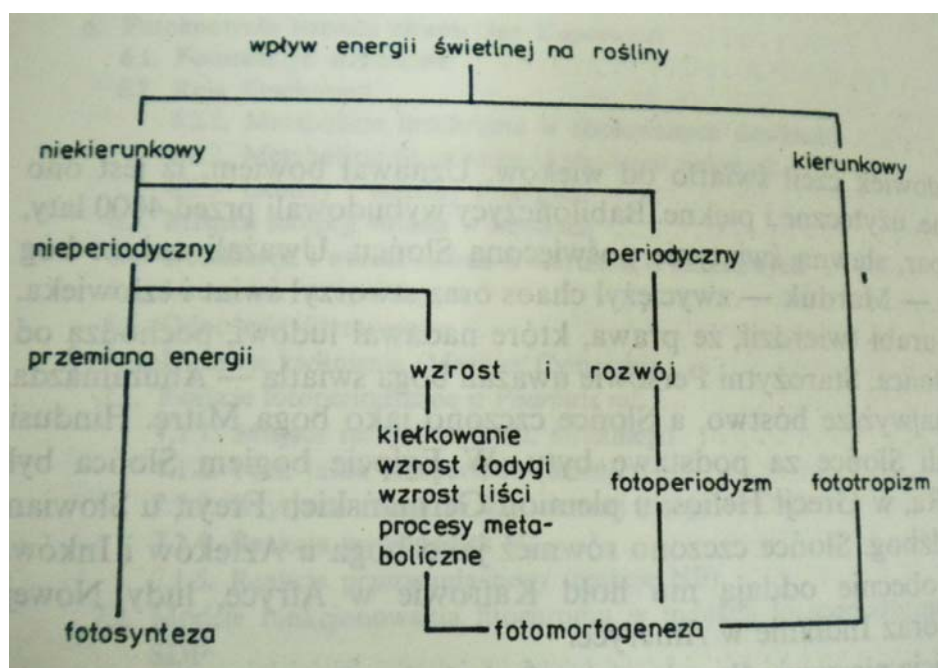
W związku ze wzrostem cen energii priorytetami w prawodawstwie Unii Europejskiej są obecnie takie zagadnienia jak: efektywność energetyczna, ochrona środowiska naturalnego, czy też produkcja zdrowej żywności. Dlatego od lat prowadzone są w kraju [1], [6] i na świecie [5], [8] badania naukowe zmierzające między innymi do poszukiwania alternatyw zmierzających do obniżenia zużycia energii przez powszechnie stosowane techniki naświetlania i doświetlania upraw szklarniowych. W związku z dynamicznym postępem technologicznym w wytwarzaniu półprzewodnikowych źródeł światła, duże nadzieje wiąże się z aplikacją tych źródeł do instalacji oświetleniowych, także w sektorze ogrodnictwa. Diody LED mają coraz lepsze parametry, są trwałe, ale również można przy ich pomocy prawie dowolnie modyfikować i dostosowywać widmo lamp do konkretnych potrzeb w układach naświetlania zarówno statycznego jak i dynamicznego.

2. WYBRANE ZAGADNIENIA Z FIZJOLOGII ROŚLIN

2.1. Światło i rośliny

W uprawach pod osłonami wzrost i plonowanie roślin zależy od wielu czynników środowiska takich jak światło, temperatura, wilgotność powietrza, rodzaj podłoża, czy też stężenie dwutlenku węgla [4]. Zaburzenia czynników klimatycznych mogą doprowadzić do zahamowania wzrostu roślin, różnorod-

nych nieprawidłowości związanych z ich rozwojem, jak również powodują wzrost ich podatności na choroby. Jednym z najważniejszych czynników, wpływających na szereg procesów fizjologicznych w roślinie, jest światło. Wpływ energii świetlnej na organizmy roślinne jest zróżnicowany – różne rodzaje procesów stymulowanych światłem pokazane są na rysunku 1 [3].



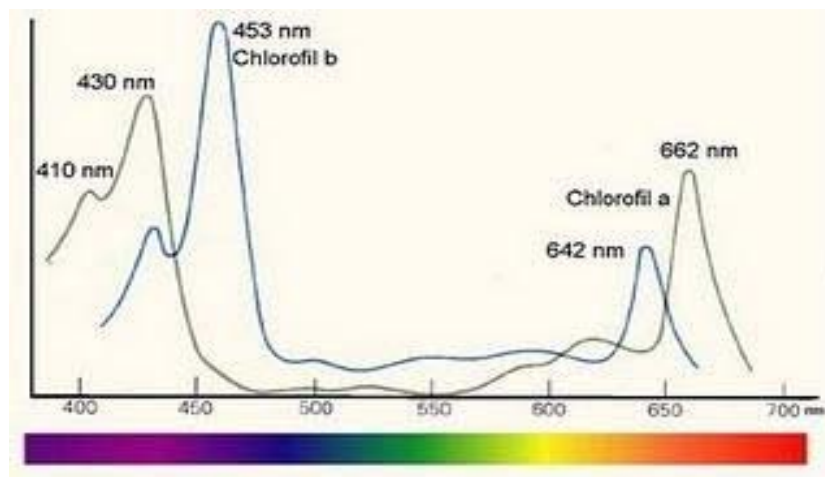
Rys. 1. Wpływ energii świetlnej na rośliny

Światło jest absorbowane w mniejszym lub większym stopniu przez wszystkie typy cząstek zawartych w roślinie. Istnieje jednak szereg związków, które charakteryzują się bardzo selektywną absorpcją. Są to barwniki roślinne, które nadają roślinom między innymi specyficzne zabarwienie. Niektóre z tych barwników funkcjonują także jako fotoreceptory. Ich charakterystyczna budowa chemiczna powoduje, że mają one możliwość przekazywania energii lub informacji roślinie. Barwniki te można sklasyfikować w dwie grupy: barwniki fotosyntetyczne i barwniki fotomorfogenetyczne.

2.2. Fotosynteza

Fotosynteza, jako proces zależny od światła, obejmuje reakcje fotochemiczne, w których energia świetlna jest absorbowana przez chlorofil i karotenoidy zawarte w liściach. Energia ta jest wykorzystywana do tworzenia między innymi

cukrów z dwutlenku węgla (CO₂) pobieranego przez liście. Na rysunku 2 przedstawiono widma absorpcyjne podstawowych barwników fotosyntetycznych – chlorofilu „a” i „b” [12].



Rys. 2. Widma absorpcyjne barwników fotosyntetycznych

Złożony proces fotosyntezy oraz aktywności fotosyntetycznej roślin także w aspekcie zastosowań praktycznych został bliżej scharakteryzowany w odrębnym opracowaniu [6]. W skrócie można powiedzieć, że światło w fotosyntezie pełni rolę źródła energii dla wspomaganie jej wzrostu i rozwoju.

2.2. Fotomorfogeneza

Pod pojęciem fotomorfogenezy rozumiemy niezależny od fotosyntezy wpływ światła na wzrost, rozwój i różnicowanie się roślin. Światło jako podstawowy środowiskowy czynnik zewnętrzny jest niezbędne dla stymulacji wszystkich procesów zachodzących w roślinie podczas całego cyklu jej rozwoju wegetatywnego i generatywnego. Wspomaga takie procesy jak: dojrzewanie i kiełkowanie nasion, przyrosty łodygi, wykształcanie się i powiększanie powierzchni liści, syntezę chlorofilu oraz innych barwników, jak również kwitnienie i owocowanie. Światło jest tu czynnikiem wpływającym na metabolizm rośliny. Należy również podkreślić, że rozwój rośliny wymaga także określonego okresu ciemności (skotomorfogeneza) w ściśle określonym dla danej rośliny fotoperiodzie.

Podobnie jak w przypadku fotosyntezy światło musi być zaabsorbowane przez specyficzny dla tych procesów fotoreceptor, którego właściwości ulegają zmianie po zaabsorbowaniu kwantów promieniowania. Powoduje to inicjację określonych procesów metabolicznych, które w konsekwencji prowadzą do zmian rozwojowych.

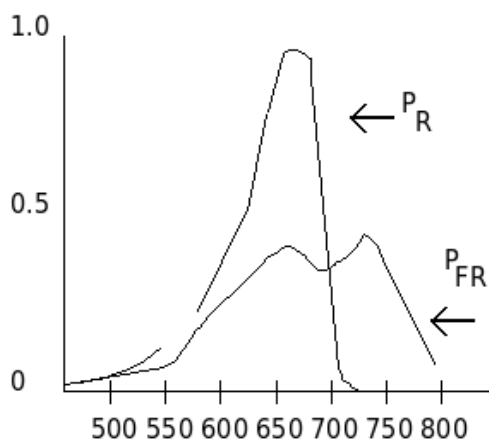
Na rysunku 3 przedstawiono widmo absorpcyjne fitochromu [3], najbardziej charakterystycznego i poznanego fotoreceptora morfogenetycznego występującego u wyższych roślin zielonych.

Fitochrom jest rozpuszczalną w wodzie chromoproteiną. W swojej budowie cząsteczkowej składa się on z części chromoforowej połączonej wiązaniem kowalencyjnym z łańcuchem polipeptydowym. Praktycznie we wszystkich roślinach występują dwie formy fitochromu o różnych właściwościach spektralnych. Forma P_r barwnika wykazuje maksimum absorpcji kwantów promieniowania w czerwonym zakresie widma (660 nm), natomiast forma P_{fr} w bliskiej podczerwieni (735 nm). Naświetlając roślinę promieniowaniem monochromatycznym o odpowiedniej

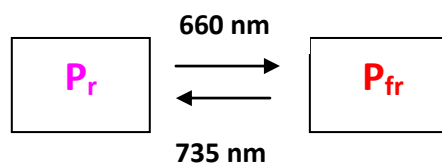
długości fali można przekształcić jedną formę w drugą zgodnie ze schematem (rys. 4).

Naświetleniu rośliny monochromatycznym światłem czerwonym lub promieniowaniem bliskiej podczerwieni towarzyszy ustalenie stanu fotostacjonarnego, który jest przejściowym stanem równowagi, który zapoczątkowuje łańcuch skomplikowanych zdarzeń kończący się odpowiedzią morfogenetyczną rośliny. Przykładem takiego procesu jest kontrola poprzez fitochrom wzrostu powierzchni liści. Proces ten jest indukowany wielogodzinnym naświetlaniem bliską podczerwienią. Poza reakcjami fotochemicznymi fitochrom podlega także procesom zachodzącym bez udziału światła takim jak: synteza P_r , destrukcja P_{fr} , czy też ciemniowa rewersja P_{fr} do P_r . Poza czerwienią i bliską podczerwienią fitochrom absorbuje także światło w niebieskim zakresie widma oraz promieniowanie bliskiego UV. Jest więc uniwersalnym receptorem kontrolującym fotomorfogenezę roślin.

Światło niebieskie i promieniowanie bliskiego ultrafioletu stymuluje, bądź też jest inhibitorem wielu procesów fotomorfogenetycznych. Przypuszcza się, że w świecie roślinnym funkcjonuje fotoreceptor, bądź też fotoreceptory absorbujące promieniowanie w zakresie fal o długości 370, 420, 450 i 480 nm. Ze względu na obserwację reakcji roślin kryptogamicznych (skrytopłciowych) i do końca nie rozpoznaną naturę chemiczną tego barwnika nazwano go



Rys. 3. Widma absorpcyjne fitochromu



Rys. 4. Schemat fotokonwersji fitochromu

krytochromem. Nie udało się opracować metody spektrofotometrycznego pomiaru zawartości tego barwnika w tkankach roślinnych. Podstawowa trudność polega na tym, że w zakresie niebieskim widma istnieje wiele fotomorfogenetycznie nieaktywnych substancji pochłaniających promieniowanie krótkofalowe.

Według jednej z hipotez wysokoenergetyczne promieniowanie niebieskie wykształciło reakcje u pierwotnych roślin wodnych. W toku ewolucji coraz większego znaczenia dla morfogenezy zaczęło nabierać niedestrukcyjne promieniowanie czerwone – stąd jako podstawowy barwnik fotomorfogenetyczny traktowany jest fitochrom.

3. DOŚWIETLANIE ROŚLIN

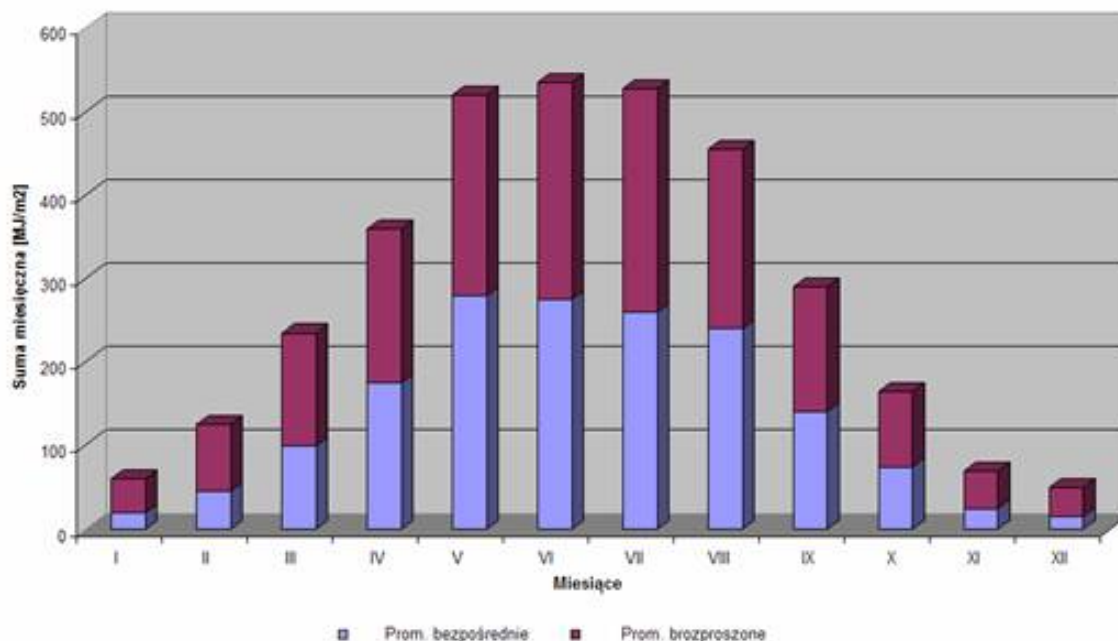
3.1. Promieniowanie słoneczne

Słońce jest źródłem energii dla wszystkich procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych zachodzących na Ziemi i w atmosferze, a jego promieniowanie najważniejszym czynnikiem środowiskowym dla życia. Słońce wysyła w przestrzeń międzyplanetarną promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie długości fal, lub częstotliwości od promieniowania gamma przez: rentgenowskie, ultrafiolet, widzialne, podczerwień, aż do fal radiowych. Atmosfera przepuszcza tylko część promieniowania w dwóch przedziałach długości fal: promieniowanie optyczne (obejmujące część ultrafioletu, widzialne i podczerwień) oraz fale radiowe. Przy przepływie promieniowania słonecznego przez atmosferę następuje jego odbicie, absorpcja i rozproszenie.

Na wielkość energii promieniowania słonecznego docierającego do samej powierzchni Ziemi w ciągu jednego dnia mają wpływ następujące czynniki:

- długość dnia;
- zachmurzenie;
- kąt padania promieni słonecznych;
- przejrzystość atmosfery (czynniki naturalne oraz zanieczyszczenie spowodowane działalnością człowieka).

Wartości nasłonecznienia miesięcznego dla Polski wahają się od ok. 40 MJ/m²/miesiąc w miesiącach zimowych do ponad 500 MJ/m²/miesiąc w miesiącach letnich. Okres od maja do sierpnia skupia ok. 58% sumy rocznego promieniowania słonecznego docierającego do Ziemi. Udział samego czerwca w sumie rocznej to średnio aż 16%, a grudnia średnio tylko niecałe 2%. Na rysunku 5 [11] pokazano ilości energii docierających do Ziemi w poszczególnych miesiącach.



Rys. 5. Nasłonecznienie Polski

W sprzyjających warunkach w lecie (przy przejrzystym powietrzu, bezchmurnym niebie i w porze południowej) natężenie napromienienia całkowitego wynosi około 1000 W/m^2 . Jest to wartość przewyższająca poziom wysycenia fotosyntezy u roślin. W bardzo pochmurny, deszczowy letni dzień wynosi tylko 50 W/m^2 . W miesiącach zimowych natężenie promieniowania drastycznie spada poniżej tej wartości. W miesiącach jesienno-zimowych następują więc wymierne zmiany ilościowe i jakościowe w naturalnym promieniowaniu, które dociera do roślin. Potwierdzają to pomiary własne autorów przeprowadzone w Instytucie Elektrotechniki w listopadzie 2010 r. (tab. 1 i 2).

TABELA 1

Zestawienie zbiorcze pomiarów promieniowania słonecznego w południe w listopadzie 2010 r.

Warunki pogodowe	Liczba dni	Natężenie oświetlenia – wartość średnia (lx)	Gęstość strumienia fotonów E całkowita [$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]	Gęstość strumienia fotonów E długofalowa [$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]	E długofalowa/E całkowita
Słonecznie $E > 50.000 \text{ lx}$	4	57 600	1 345	712	0,5294
Częściowe zachmurzenie $E > 20.000 \text{ lx}$	8	29 546	693	347	0,5007
Zachmurzenie całkowite $E < 20.000 \text{ lx}$	18	9 833	220	106	0,4818

TABELA 2

Wyniki pomiarów dziennych promieniowania słonecznego

Wielkość		12.11.2010	24.11.2010
Długość dnia	godz. : min.	8:58	8:23
Aktywność fotosyntetyczna ^{*)}	godz. : min.	8:06	6:15
Maksymalna gęstości strumienia fotonów (E _{max})	μmol·m ⁻² ·s ⁻¹	372	130
Średnia gęstość strumienia fotonów (E _{śr})	μmol·m ⁻² ·s ⁻¹	85,79	42,27
Średni stosunek gęstości strumienia fotonów (E _{dług} /E _{całk}) – wschód		0,3859	0,4224
Średni stosunek gęstości strumienia fotonów (E _{dług} /E _{całk}) – południe		0,4986	0,4845
Średni stosunek gęstości strumienia fotonów (E _{dług} /E _{całk}) – zachód		0,4537	0,4253

^{*)} okres, w którym natężenie napromieniowania całkowitego jest większe niż 20 μmol·m⁻²·s⁻¹ (punkt kompensacyjny fotosyntezy)

Analiza pomiarów pokazuje, jak istotną sprawą dla roślin jest ich doświetlanie dla podtrzymania procesów asymilacyjnych w warunkach jesiennego niedoboru światła. Jesienią i zimą dzień staje się coraz krótszy, co jeszcze bardziej widać w skracającym się czasie aktywności fotosyntetycznej roślin. Nie tylko spada dość znacznie powierzchniowa gęstość strumienia fotonów w zakresie PAR (Photosynthetic Active Radiation), ale także w warunkach słabego napromienienia (zachmurzenie, wschód i zachód słońca) spada udział promieniowania długofalowego w stosunku do całości absorbowanego przez rośliny promieniowania. Promieniowanie długofalowe, a w szczególności czerwone (640-660 nm) jest najistotniejsze dla przebiegu procesów fotosyntezy oraz fotomorfogenezy roślin.

3.2. Sztuczne źródła światła

Przy tak niestabilnych warunkach świetlnych i obserwowanym deficycie naturalnego promieniowania w naszym klimacie, szczególnie w okresie jesienno zimowym stosuje się w praktyce ogrodniczej sztuczne źródła światła. Celem tego zabiegu jest doświetlenie roślin praktycznie rzecz biorąc na każdym etapie rozwoju od wegetatywnego wspomaganie młodych sadzonek po generatywne formowanie się kwiatów i owoców. Stosowane jest także naświetlanie roślin w fitotronach niezależnie od pory roku np. w laboratoriach kultur tkankowych w mikrorozmnażaniu wegetatywnym.

Niedostateczna ilość światła powoduje nie tylko spowolnienie procesu wzrostu (wolne tempo fotosyntezy), ale również niekorzystnie wpływa na rozwój

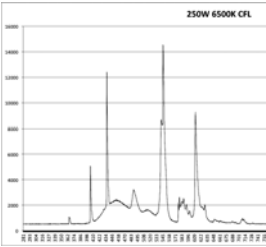
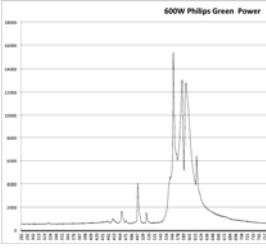
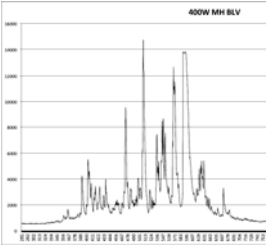
morfogenetyczny roślin — nadmiernie wydłużone, wiotkie łodygi, zmniejszona ilość chlorofilu w tkankach itp. W słabo wykształconych chloroplastach zmniejszona jest intensywność fotosyntezy, nawet przy późniejszej dostępności światła. Może to prowadzić do ograniczenia produktywności roślin.

Naświetlanie i doświetlanie roślin prowadzi się głównie przy wykorzystaniu wyładowczych źródeł światła. Przy wyborze źródła światła należy kierować się dwoma kryteriami – jego sprawnością energetyczną oraz składem widmowym promieniowania. Każdy proces fotobiologiczny, który ma być wspomagany ma swoją specyfikę zarówno w zakresie intensywności promieniowania jak i, a może przede wszystkim, w aspekcie rozkładu widmowego promieniowania jakie ma być dostarczone roślinie.

W tabeli 3 przedstawiono w układzie zbiorczym charakterystykę sztucznych źródeł światła wykorzystywanych w praktyce szklarniowej [10].

TABELA 3

Charakterystyka wybranych wyładowczych źródeł światła

Przykładowe widmo	Charakterystyka źródła	Zastosowanie
	<p>FLUORESCENCYJNE:</p> <ul style="list-style-type: none"> • możliwość kształtowania widma składem luminoforu; • dość wysoka skuteczność; • niezbyt duży strumień fotonów; • względnie niska cena i długi czas świecenia; • niska zawartość dalekiej czerwieni w widmie • wydzielają stosunkowo mało ciepła. 	do niewielkich upraw; w początkowej fazie wzrostu rośliny; głównie w fitotronach i pokojach wzrostowych ('in vitro')
	<p>WYSOKOPRĘŻNE SODOWE (HPS):</p> <ul style="list-style-type: none"> • zwiększenie ciśnienia par sodu powoduje pojawienie się linii spektralnych (520-620 nm); • niedobór światła niebieskiego • wysoka skuteczność; • wydzielają dużo promieniowania ciepłego; • stosunkowo wysoka trwałość. 	obecnie najpowszechniej stosowane źródła w produkcji ogrodniczej (HPS 400 i 600 W)
	<p>METALOHALOGENKOWE:</p> <ul style="list-style-type: none"> • promieniowanie o widmie zbliżonym do światła naturalnego; • możliwość modyfikacji widma dozowaniem odpowiednich halogenków; • wysoka skuteczność; • dość wysoka cena specjalistycznych lamp. 	zalecane do stymulacji wzrostu rośliny; stosowane często w mieszanych układach wraz z HPS

3.2. Półprzewodnikowe źródła światła

W dziedzinie diod elektroluminescencyjnych obserwuje się niezwykle dynamiczny postęp technologiczny. Dzisiejsze rozwiązania są inne niż te sprzed kilku lat, a nawet sprzed roku. Czołowe firmy (CREE, Philips Lumileds, Seoul Semiconductors) opanowały produkcję komponentów LED w konstrukcji i technologii umożliwiającej uzyskiwanie coraz to mniejszych rezystancji termicznych między strukturą złącza półprzewodnikowego, a zewnętrznym polem odprowadzającym ciepło. Szybsze odprowadzanie ciepła ze złącza umożliwia uzyskiwanie coraz to większych skuteczności świetlnych, które to dla diod białych są już rzędu 150-170 lm/W. Wzrasta jednocześnie ich sprawność energetyczna, która osiąga już 33%, a więc poziom jaki mają wyładowcze źródła światła. Postęp technologiczny jaki obserwujemy w diodach białych pośrednio przyczynia się także do rozwoju technologii wytwarzania diod barwnych w oparciu o coraz to bardziej wydajne heterostruktury półprzewodnikowe. Diody barwne znajdują zastosowanie już nie tylko w oświetleniu akcentowym, dekoracyjnym, ekranach i reklamie wizualnej, ale także w innych obszarach. Jednym z takich obszarów jest wspomaganie wzrostu i rozwoju roślin. Czołowi producenci w związku z zapotrzebowaniem oferują diody w typach jeszcze niedawno nie spotykanych w katalogach. Przykładem może być firma Seoul Semiconductors, która do swojej serii P4 włączyła jednowatową diodę o barwie Photosynthetic Red o strumieniu radiometrycznym 200 mW i dominującej długości fali 660 nm. Także inni producenci oferują coraz to bardziej wydajne diody mocy o dominującej długości fali pokrywającej się z maksimami absorpcji barwników wspomagających poszczególne procesy fizjologiczne w roślinach. Tylko w ostatnim roku zaobserwowaliśmy wzrost skuteczności świetlnej oferowanych diod mocy, które mogą być zastosowane w produkcji roślinnej o 25%. Heterostruktury stosowane w półprzewodnikowych źródłach światła do doświetlania roślin wyszczególniono w tabeli 4.

TABELA 4

Struktury półprzewodnikowe światła barwnego w doświetlaniu roślin

Promieniowanie	Struktura	Długość fali (nm)	Wspomagany proces
Niebieskie	AlInGaN	455	Fotosynteza – chlorofil <i>b</i>
Czerwone	AlGaInP	640	Fotosynteza – chlorofil <i>b</i>
Czerwone	AlGaAs	660	Fotosynteza – chlorofil <i>a</i> Fotomorfogeneza
Podczerwone	AlGaAs	735	Fotomorfogeneza

Zastosowanie diod w praktyce ogrodniczej pozostaje w Polsce nadal zagadnieniem marginalnym. Niemniej jednak w wielu ośrodkach w kraju [1], [6]

i na świecie [5], [8] prowadzi się badania naukowe zmierzające do rozpowszechnienia tej nowej technologii. Cechą wspólną tych badań jest wykorzystanie do naświetlania i doświetlenia mieszanego światła czerwono – niebieskiego [7] z dodatkiem promieniowania bliskiej podczerwieni zarówno w układach oświetlenia statycznego, jak również dynamicznego. Diody oraz układy ich sterowania pozwalają łatwo modyfikować w dość szerokim zakresie charakterystyki widmowe lamp naświetlających rośliny do wspomaganie określonych procesów fizjologicznych.

Podstawowe zalety diod świecących, takie jak coraz wyższa skuteczność świetlna oraz trwałość zapewniają energooszczędne i tanie w eksploatacji oświetlenie. Duża odporność na wibracje i wstrząsy zapewnia niezawodność działania. Możliwość łatwej regulacji strumienia świetlnego daje dodatkowy komfort w eksploatacji. Zastosowanie LED pozwala chronić środowisko naturalne dzięki ich długiej żywotności i zmniejszeniu ilości materiałów gromadzonych na składowiskach odpadów. Korzystne jest także to, że zużyte źródła światła LED nie zawierają szkodliwej rtęci ani ołowiu. Dość istotną barierą w rozpowszechnieniu tej technologii we wspomaganie roślin pozostaje jeszcze dość wysoki koszt inwestycyjny i relatywnie długi czas zwrotu inwestycji. Jednakże wraz ze wzrostem zapotrzebowania na specjalistyczne struktury półprzewodnikowe obserwuje się ciągły spadek cen diod.

4. ZESTAW DAPLON-PLUS

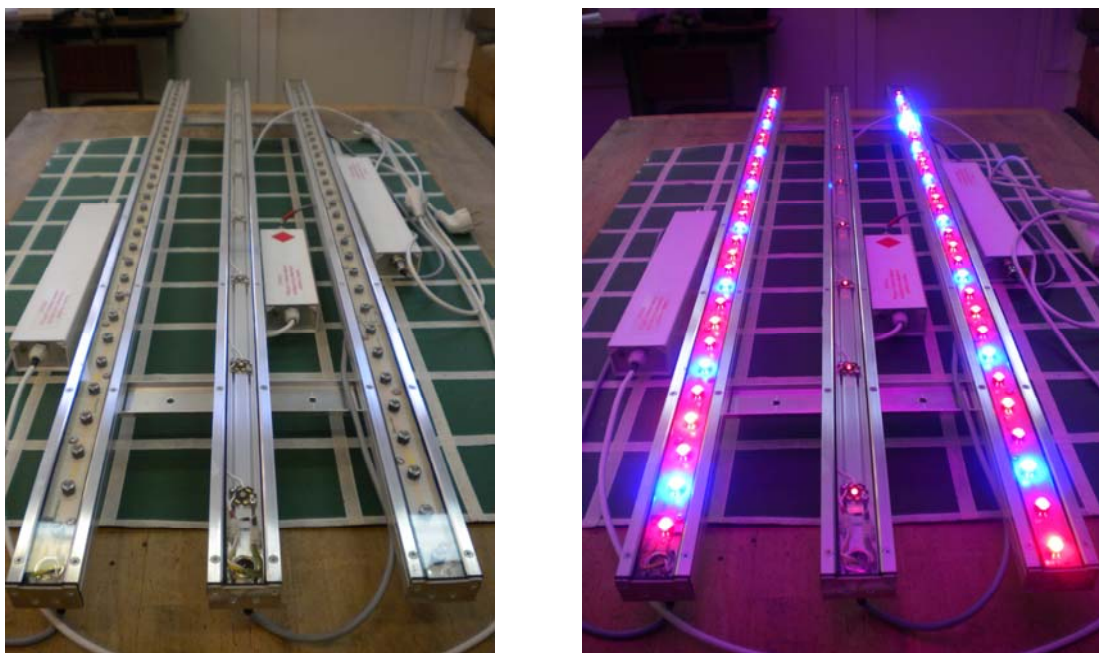
Wyniki prac naukowo-badawczych prowadzonych w ostatnim czasie na świecie, jak również doświadczenia własne [6] pokazują, że podstawowym promieniowaniem mającym istotne znaczenie dla fotosyntetycznego i fotomorfo-genetycznego rozwoju roślin jest światło czerwone ($\lambda = 640-660$ nm) wspomaganane przez światło niebieskie ($\lambda = 430-450$ nm) oraz promieniowanie bliskiej podczerwieni ($\lambda = 735$ nm). Opracowany w Instytucie Elektrotechniki model oprawy – zestaw DAPLON-plus integruje w sobie półprzewodnikowe źródła charakteryzujące się promieniowaniem optycznym w w/w zakresach długości fal.

4.1. Charakterystyka oprawy

Zestaw DAPLON-plus jest zintegrowaną oprawą liniową przeznaczoną do doświetlania i naświetlania sadzonek roślin w uprawach pod osłonami. Składa się on z dwóch belek - opraw oświetleniowych (DAPLON/2011) oraz jednego liniowego promiennika bliskiej podczerwieni (DAPLON Far Red).

Obudowę oprawy DAPLON/2011 stanowi profil aluminiowy zamknięty od czoła przezroczystą szybą z PMMA. Wewnątrz profilu na czterech płytkach obwodów drukowanych zrealizowany jest szeregowo-równoległy układ połączeń 8 szt. diod mocy emitujących niebieską barwę światła oraz 24 szt. diod emitujących czerwoną barwę światła. Wszystkie diody są wykonane w technologii Rebel. Diody czerwone i niebieskie zasilane są z odrębnych zasilaczy w obwodach zabezpieczonych przed odwrotną polaryzacją diodami prostowniczymi. Na diodach świecących rozmieszczonych tak, by zapewnić możliwie równomierne mieszanie barw zamontowane są soczewki formujące rozkład światła o kątach rozsyłu połowkowego $\pm 13^{\circ}$ oraz $\pm 19^{\circ}$. Możliwa jest zmiana udziału strumienia fotonów promieniowania niebieskiego w widmie poprzez zmianę nastaw zasilacza.

Oprawa DAPLON Far Red jest liniowym promiennikiem bliskiej podczerwieni. Obudowa oprawy jest identyczna jak oprawy DAPLON/2011. Wewnątrz obudowy na podkładkach obwodów drukowanych typu „gwiazda” realizowany jest jeden szeregowy obwód 8 szt. diod mocy zasilany stabilizowanym prądem stałym z możliwością skokowej zmiany jego wartości. Zestawy można konfigurować w dowolny sposób z wyżej opisanych belek w zależności od przeznaczenia i wymagań doświetlanego pola. Widok oprawy modelowej – zestaw DAPLON-plus pokazany jest na rysunku 6.



Rys. 6. Zestaw DAPLON-plus

W tabeli 5 zebrano wybrane dane techniczne zestawu DAPLON-plus.

TABELA 5

Wybrane dane techniczne zestawu DAPLON-plus

Moc nominalna	110 W
Współczynnik mocy (pojemnościowy)	0,85
Maksyma promieniowania w rozkładzie widmowym	445 nm / 642 nm / 666 nm / 731 nm
Całkowita powierzchniowa gęstość fotonów (w punkcie symetrii, wysokość zawieszenia 1 m)	118,73 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
Nominalny udział promieniowania:	
niebieskie (400 – 500 nm)	28,4%
czerwone (600 – 700 nm)	68,5%
podczerwone (700-750 nm)	3,1%
Równomierność napromienienia powierzchni: (PN-EN 1265):	
R1 – (0,2 x 1,0 m)	0,821
R2 – (0,4 x 1,0 m)	0,702
R3 – (0,6 x 1,0 m)	0,376

4.1. Pomiar i wyniki

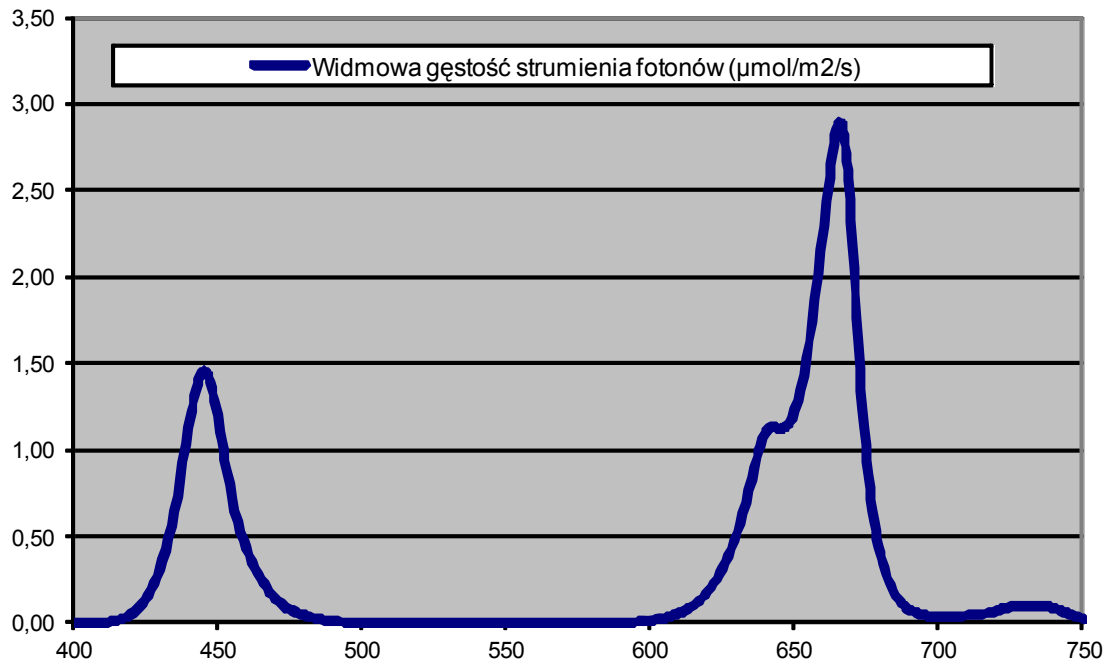
Dla opraw ogrodniczych - zestaw DAPLON-plus wykonane zostały pomiary ich parametrów elektro-optycznych w następującym zakresie:

- pomiar widma promieniowania (rys. 7);
- pomiar gęstości fotonów w osi poprzecznej (rys. 8);
- pomiar równomierności napromieniania płaszczyzny (tab. 5);

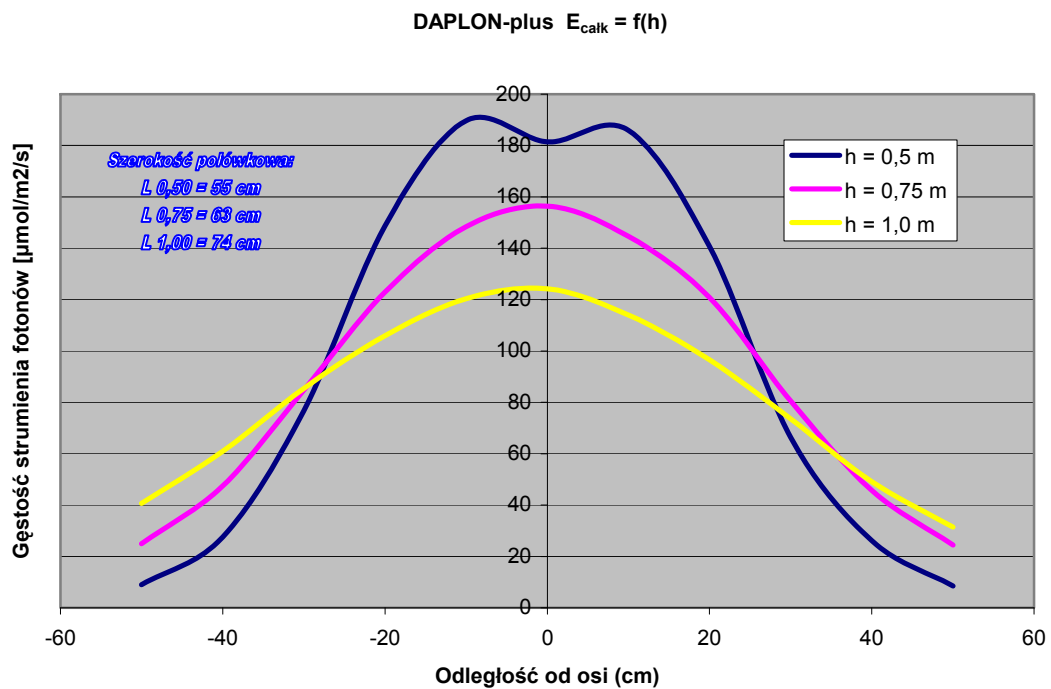
Widmo promieniowania przy odległości fotometrowania równej 1 m przedstawione jest na rysunku 7.

Wykonano pomiary rozkładów powierzchniowej gęstości fotonów zestawu DAPLON-plus na płaszczyźnie roboczej w osiach poprzecznej i podłużnej. Na rysunku 8 przedstawiony jest rozkład w osi poprzecznej w funkcji wysokości zawieszenia. Na podstawie tych pomiarów została ustalona optymalna wysokość zawieszenia opraw w doświadczalnym eksperymencie badawczym, który został przeprowadzony w szklarniach Instytutu Ogrodnictwa w Skierniewicach.

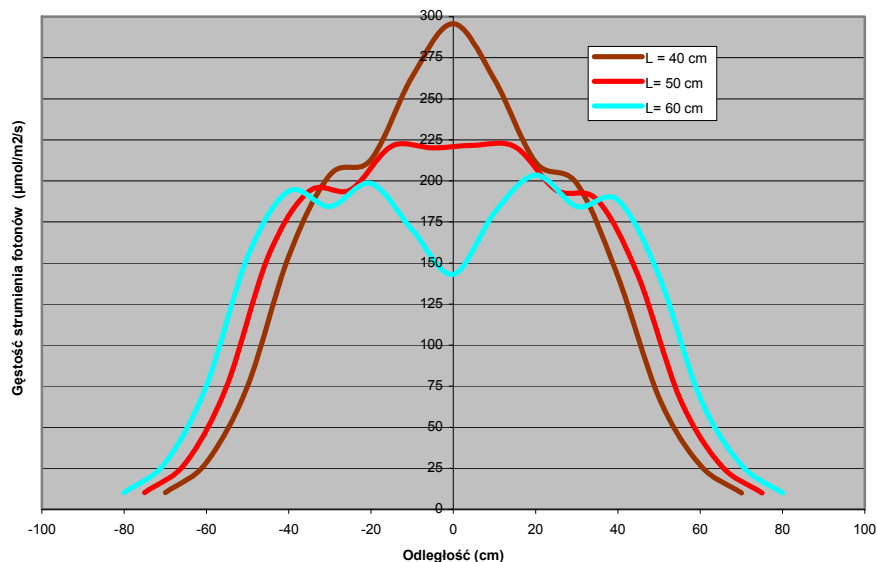
Pomierzono także równomierność napromienienia płaszczyzny na siatce zgodnie z normą PN-EN 1265 przy wysokości zawieszenia 0,5 m. Wyniki tych pomiarów przedstawiono w tabeli 5. Z wniosków z tych pomiarów wyniknęła konieczność zastosowania dwóch zestawów DAPLON-plus dla zwiększenia równomierności napromieniania płaszczyzny. Dokonano symulacji rozkładu powierzchniowej gęstości fotonów przy dwóch zestawach DAPLON-plus przy różnych rozstawieniach osi zestawów. Wyniki tej symulacji przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 7. Rozkład widmowy promieniowania zestawu DAPLON-plus



Rys. 8. Rozkład powierzchniowej gęstości fotonów w osi poprzecznej



Rys. 9. Wpływ rozstawienia osi zestawów na rozkład napromieniowania

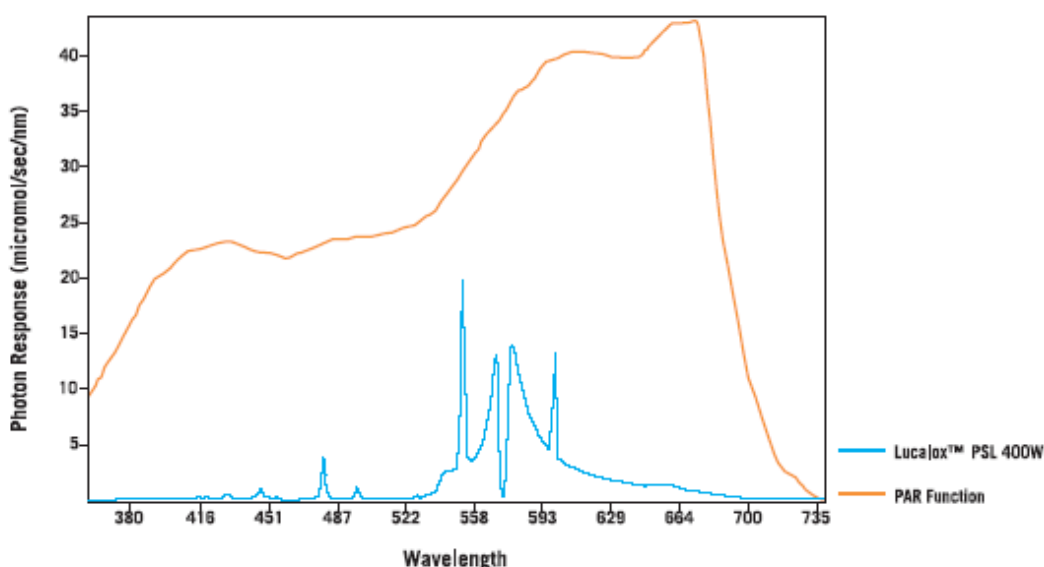
5. BADANIA

Zestaw DAPLON-plus został wstępnie zweryfikowany w czterotygodniowym eksperymencie doświetlania szczepionych siewek pomidora oraz ukorzenionych sadzonek roślin kwiatowych (fuksja, irezyna i pelargonja). Doświadczenie rozpoczęte zostało w dniu 15.11.2011 na stanowiskach w szklarni Instytutu Ogrodnictwa w Skierniewicach (rys. 10).



Rys. 10. Stanowiska doświadczalne w szklarni Instytutu Ogrodnictwa

Dokonano pomiarów wybranych parametrów fizjologicznych oraz zużytej przy doświetlaniu energii elektrycznej i ciepłej w analizie porównawczej. Lampą referencyjną w stosunku do Zestawu LED DAPLON-plus była powszechnie stosowana w szklarniach wysokoprężna lampa sodowa Lucalox LU 400W/PSL. Widmo tej lampy na podstawie karty katalogowej firmy GE [9] przedstawione jest na rysunku 11.



Rys. 11. Widmo lampy GE Lucalox LU 400 W/PSL

Doświetlanie sadzonek prowadzone było w dwóch oddzielnych komorach szklarniowych (LED i HPS) od godziny 6.00 do 18.00, gdy zewnętrzne natężenie napromienienia światłem naturalnym stacji pogodowej szklarni zmniejszało się poniżej 200 W/m^2 . Podstawowym założeniem doświadczenia było zrównoważenie poziomów powierzchniowej gęstości fotonów na stołach w komorach.

W tabeli 6 przedstawiono gęstości fotonów mierzone w osi symetrii zestawów na stołach odpowiednio dla promieniowania całkowitego (E_T), światła nie-

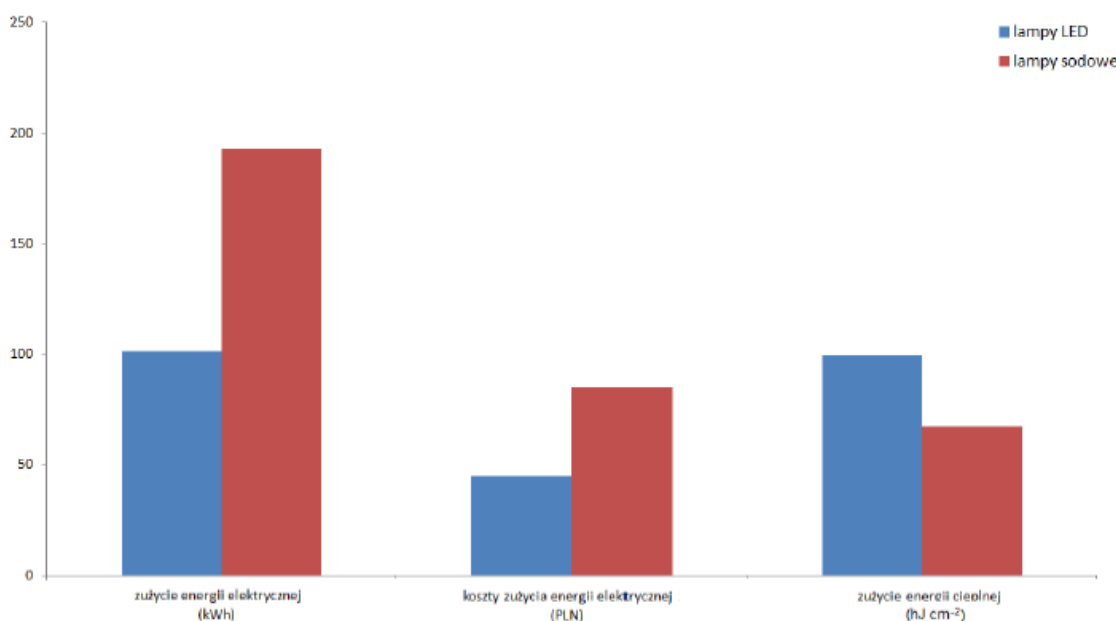
TABELA 6

Gęstości fotonów mierzone w osi symetrii zestawów w komorach szklarniowych

	LED				HPS				KONTROLA	
	Komora LED		Zestawy LED		Komora HPS		Oprawa HPS		Słońce	
	$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	%	$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	%	$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	%	$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	%	$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	%
E_T	254	100	114	100	257	100	117	100	140	100
E_{R+FR} (OG5)	147	57,8	67	58,7	188	73,2	108	92,3	80	57,1
E_{FR} (RG9)	12,8	5	3,5	3	12	4,7	2,7	2,3	9,3	6,6
E_B	114	44,9	47	41,2	69	26,8	9	7,8	60	42,9
E_R	134,2	52,8	63,5	55,7	176	68,5	105,3	90	70,7	50,5

bieskiego (E_B), światła czerwonego (E_R) oraz promieniowania bliskiej podczerwieni (E_{FR}). Poszczególne pasma widmowe wydzielono przy wykorzystaniu filtrów Schotta OG5 i RG9 [2].

W ramach eksperymentu badawczego dokonano pomiaru zużycia energii elektrycznej i ciepłej w poszczególnych komorach szklarniowych w całym cyklu doświetlania sadzonek roślin. Wyniki tego pomiaru przedstawione są na rysunku 12.



Rys. 12. Zużycie energii elektrycznej i ciepłej w komorach LED i HPS

Reasumując wyniki pierwszych badań należy stwierdzić, że przy porównywalnych poziomach gęstości strumieni fotonów na stołach pod oprawami ze światłem LED i światłem lamp HPS:

- efekty wzrostu i rozwoju roślin były podobne;
- zużycie energii elektrycznej na doświetlanie przy zastosowaniu lamp sodowych było o 91% wyższe;
- w komorze doświetlanej lampami sodowymi zarejestrowano mniejsze o około 33% zużycie energii ciepłej.

6. PODSUMOWANIE

Z badania wykonanego w szklarniach Instytutu Ogrodnictwa wynika, że zastosowanie LED w doświetlaniu roślin, może być atrakcyjną alternatywą w stosunku do powszechnie stosowanych w tym zakresie wyładowczych źródeł światła.

Cechy diod elektroluminescencyjnych, jak również obserwowany w ostatnich latach postęp technologiczny w zakresie ich wytwarzania stwarzają możliwości do rozpowszechnienia tej nowej techniki w zastosowaniach praktycznych.

W dobie rosnących cen nośników energii wykazana energooszczędność jest podstawową zaletą proponowanego rozwiązania.

Nie bez znaczenia pozostają takie zalety jak trwałość, wysoka skuteczność świetlna, prosty sposób modyfikacji widma w układach oświetlenia statycznego i dynamicznego, czy też aspekty ekologiczne.

Parametry opracowanego w Instytucie Elektrotechniki modelu oprawy pozwalają na zastosowanie tej wielce obiecującej technologii doświetlania zarówno w szklarniach, jak i w laboratoriach kultur tkankowych zapewniając tanie w eksploatacji wspomaganie wegetatywnego i generatywnego wzrostu i rozwoju roślin.

LITERATURA

1. Grzesiak W.: Nowoczesne systemy doświetlania roślin oparte o najnowsze osiągnięcia technologii SSL LED. Elektronika – konstrukcje – technologie – zastosowania, 6/2011, str. 137-139.
2. Jena Farb – und FilterGlas für Wissenschaft und Technik – VEB Optik Jena Schott &Ge.
3. Kopcewicz J., Tretyn A., Cymerski K.: Fitochrom i Morfogeneza Roślin. Warszawa, 1992, PWN.
4. Kopcewicz J., Lewak S.: Podstawy Fizjologii Roślin. PWN, 2002.
5. Kurilcik A. et al.: In vitro culture of Chrysanthemum plantlets using light-emitting diodes, Central European journal of Biology 3(2)-2008, pp. 161-167.
6. Puternicki A.: Zastosowanie półprzewodnikowych źródeł światła do wspomaganie wzrostu roślin – Konferencja POOMT 2010, Prace Instytutu Elektrotechniki 245'10 str. 69-86.
7. Samouliene G. et al.: The effect of red and blue light component on the growth and development of frigo strawberries, Zemdirbyste-Agriculture, vol 97, No. 2 (2010), pp. 99-104.
8. Tamulaitis G. et al.: High-power light-emitting diode based facility for plant cultivation. Journal of Physics D: Applied Physics 38(2005), str. 3182-3187.
9. www.GELighting.com - Lucalox PSL Datasheet
10. www.growlight.ru/spektrogrammy
11. www.igf.fuw.edu.pl
12. www.biocen.edu.pl – B. Pokorska, J. Urbański: Skrypt barwniki fotosyntezy.

THE APPLICATION OF LED LAMPS AS ILLUMINATORS FOR SELECTED PLANT SEEDLINGS

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

ABSTRACT *The article analyzes the applicability of semiconductor light sources (LED) for illumination of selected plant seedlings. Few chosen problems of supplementary artificial light illumination of greenhouse spices including photosynthetic and photomorphogenetic aspects were presented. The studies were performed in Electrotechnical Institute and Horticulture Institute. They were based on the application of LED lamp model of blue, red as well as infrared spectrum. The basic photometric and electrical data of the lamp were stated. The four weeks research experiment proved the measurable reduction of operating costs of proposed LED application in comparison with currently used for this purposes HPS lamps.*

Keywords: *daylight and artificial light, plant illumination, photosynthesis, photomorphogenesis, LED lamp*

Mgr inż. Andrzej PUTERNICKI ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej o specjalności Technika Świetlna w 1982 roku. Zajmował się zagadnieniami "światło dźwięk" i problemami energetycznymi w Elektrimie. Od 2007 roku pracuje w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie. Od 2010 roku jest asystentem w Zakładzie Techniki Świetlnej i Promieniowania Optycznego Instytutu Elektrotechniki. W kręgu jego zainteresowań naukowych leżą szeroko rozumiane zagadnienia wpływu właściwości światła na efekt energetyczny i rozwojowy w zakresie fotobiologii. Autor lub współautor kilku innowacyjnych opracowań, artykułów, referatów i prezentacji o tej tematyce.



Mgr inż. Edmund LISAK ukończył Wydział Elektroniki Politechniki Warszawskiej – kierunek Technologia Elektronowa w 1975 roku. W swojej działalności zawodowej od początku związany z techniką świetlną i technologią źródeł światła. Od 2001 roku pracując w Instytucie Elektrotechniki zajmuje się aplikacjami związanymi z półprzewodnikowymi źródłami światła. Autor i współautor wielu innowacyjnych opracowań w tym zakresie. Od 2008 jest asystentem w Zakładzie Techniki Świetlnej i Promieniowania Optycznego Instytutu Elektrotechniki.

