

doi:10.15199/48.2019.10.48

Analiza efektywności systemów oświetlenia roślin na przykładzie uprawy bazylii

Streszczenie. Dynamiczny rozwój technologii LED oraz znaczące podwyżki cen energii elektrycznej wymuszają badania mające na celu zwiększenie efektywności systemów oświetleniowych do uprawy roślin. W pracy przeprowadzono analizę efektywności oświetlenia na przykładzie uprawy bazylii. Na wstępie dokonano pomiarów spektralnych liści bazylii. Na podstawie otrzymanych wyników opracowano i wykonano oświetlenie dopasowane do charakterystyki spektralnej badanej rośliny. Skuteczność zaproponowanego rozwiązania przetestowano doświadczalnie metodą porównawczą w oparciu o niewielką plantację bazylii. Część roślin oświetlana była promieniami słonecznymi, a pozostałe oświetleniem optymalizowanym. Dodatkowo wszystkim próbkom zostały zapewnione dokładnie takie same warunki rozwoju. Na podstawie otrzymanych wyników i obserwacji dokonano oceny efektywności zaproponowanego systemu oświetlenia roślin.

Abstract. The dynamic progress of LED technology and significant increases in electricity prices are forcing research to increase the efficiency of lighting systems for plants growing. The analysis of lighting efficiency was carried out using the example of basil growth. Firstly spectral measurements of basil leaves were made. Basis on the measurements results, LEDs spectral characteristics of lighting was designed and made to match the spectral characteristics of the tested plant. The effectiveness of the proposed solution was experimentally tested using a comparative method based on a small basil plantation. Some of the plants were illuminated by solar radiation and the remaining ones were illuminated by artificial lights. Instead of light, all samples have exactly the same growing conditions. On the basis of the obtained results and observations, the effectiveness of the proposed plant lighting system was evaluated. (**Lighting efficiency analysis using the example of basil growing**).

Słowa kluczowe: fotobiologia, LED, sprzęt oświetleniowy, oświetlenie roślin

Keywords: photobiology, LED, lighting equipment, horticulture, plants illumination

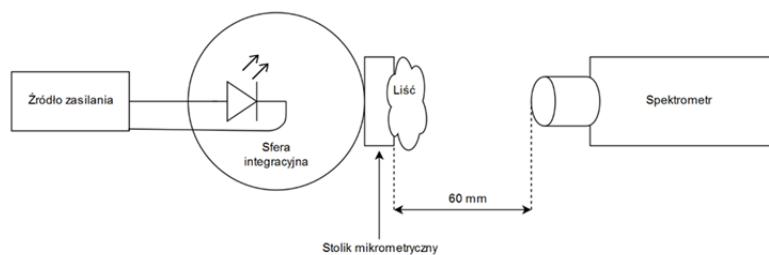
Wstęp

Lampy do doświetlania lub oświetlania roślin są tematem, którym naukowcy z całego świata zajmują się od ponad pół wieku [1]. Urządzenia tego typu są coraz chętniej stosowane na plantacjach roślin. Pozwalają skrócić czas wegetacji roślin oraz zwiększyć plon. Większość doświetlanych upraw bazylii na wysokoprężnych lampach sodowych HPS [2] (high pressure sodium) oraz lampach fluorescencyjnych FL (fluorescent lamps). Coraz większą popularnością wśród plantatorów cieszą się także lampy oparte o diody elektroluminescencyjne (LED) [3-5]. Występują również rozwiązania hybrydowe [6], łączące w sobie różne typy lamp, ale są zdecydowanie mniej popularne. Zdecydowaną zaletą lamp HPS jest stosunkowo niski koszt zakupu oraz niewielka waga. Odpowiadające lampom HPS zamienniki oparte na diodach elektroluminescencyjnych są cięższe i bardziej kosztowne. Różnica w wadze lamp spowodowana jest koniecznością zapewnienia modułom LED odpowiedniego chłodzenia [7], gdyż ciepło przez nie wydzielane nie jest odprowadzane w postaci promieniowania podczerwonego (IR) jak w przypadku innych źródeł światła. W ostatnim czasie coraz więcej firm wprowadza do oferty lampy LED przeznaczone do doświetlania upraw. Zdecydowana większość rozwiązań dostępnych na rynku bazylii opiera się na diodach emitujących światło w wąskim zakresie długości fali, o dwóch podstawowych długościach fal [8], odpowiadających zapotrzebowaniu (charakterystyce absorpcji) chlorofilu. Bardziej zaawansowane produkty pozwalają na ustawienie dedykowanego widma dla różnych faz rozwoju rośliny [9], np. fazy wegetacji oraz fazy kwitnienia. Dostępne rozwiązania komercyjnie nie przewidują niestety różnic w zapotrzebowaniu na oświetlenie pomiędzy gatunkami roślin. Analiza efektywności systemu oświetlenia roślin jest zadaniem złożonym i wymaga realizacji kilku etapów prac. W pierwszym z nich został przygotowany układ pomiarowy umożliwiający pomiar charakterystyk spektralnych liści roślin oraz przeprowadzone zostały pomiary charakterystyk liści bazylii. W drugim etapie, na podstawie otrzymanych wyników, w oparciu o dostępne komercyjnie LED-y, zaproponowane i zrealizowane zostało oświetlenie testowe

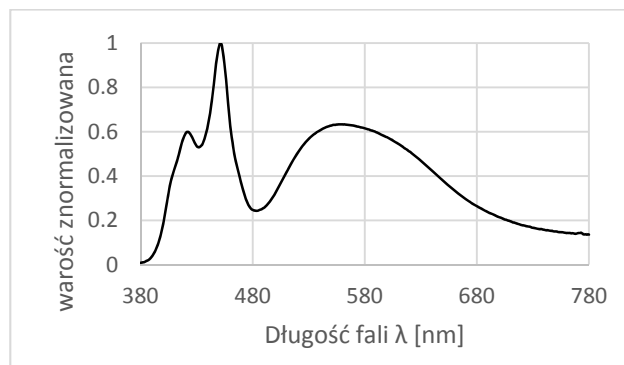
o trzech różnych charakterystykach widmowych. W etapie trzecim, w specjalnie przygotowanych stanowiskach, odizolowanych od światła zewnętrznego, została zorganizowana niewielka plantacja roślin bazylii. Jedna próbka została kontrolnie pozostawiona na oknie w tym samym pomieszczeniu. Wszystkie rośliny były podlewane dokładnie taką samą ilością wody oraz wysiane zostały równocześnie w takiej samej ziemi. Czas uprawy wynosił 30 dni [10].

Pomiary spektralne liści

Pomiary spektralne liści bazylii zostały przeprowadzone za pomocą stanowiska laboratoryjnego przedstawionego na Rys 1. W skład stanowiska wchodzi źródło zasilania, moduł oświetlający, stolik mikrometryczny z otworem, umożliwiającym zamocowanie badanego liścia oraz spektrometr. Źródłem światła w układzie pomiarowym był moduł składający się z diod LED Solar White o współczynniku oddawania barw CRI na poziomie 97 firmy LEXTAR, diody XP-G3 5700 K CRI 70 oraz diody niebieskiej emitującej światło z zakresu 385-420nm firmy Prolight Opto. Jako uzupełnienie widma w zakresie dalekiej czerwieni zastosowano żarówkę 5W. W celu uzyskania jak najbardziej jednorodnego światła wykorzystana została sfera integracyjna [11] z otworem pozwalającym kierunkowo wiązkę wychodzącą światła. Widmo tego źródła przedstawia wykres Rys. 2. Moduł oświetlający jest zasilany ze stabilizowanego zasilacza laboratoryjnego. W miejscu otworu na sferze integracyjnej został zamocowany stolik mikrometryczny z otworem w centralnej części. Dzięki takiej konfiguracji możliwe jest precyzyjne ustawianie próbki (liścia) przy zachowaniu jednakowego podświetlenia. Spektrometr pomiarowy (Konica Minolta CS-2000) z obiektywem makro został ustawiony odległości 60 mm od badanego obiektu. Pozwoliło to ustawić ostry obraz i jednocześnie zapewnić dużą rozdzielczość przestrzenną pomiaru.

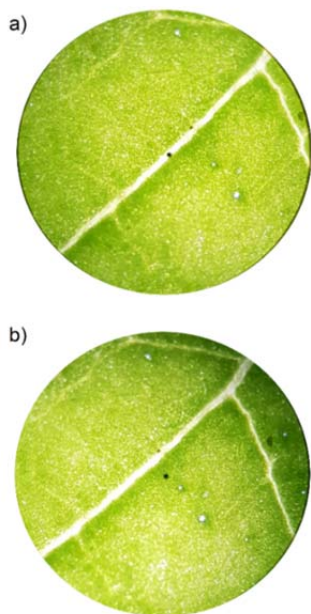


Rys. 1 Schemat ideowy układu pomiarowego



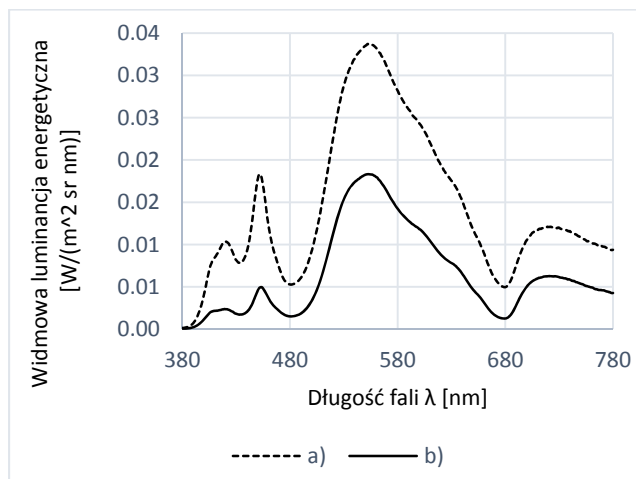
Rys. 2 Widmo zrealizowanego źródła światła do pomiarów charakterystyk liści

Wszystkie pomiary zostały wykonane przy ustawionym kącie pomiaru spektrometriem na poziomie $0,1^\circ$. Oznacza to, że dla tego układu pomiarowego punkt pomiarowy ma średnicę $0,113 \text{ mm}$. Dla punktu tej wielkości bardzo duże znaczenie ma jaki fragment liścia jest mierzony. Wyniki dla układu waskularnego liścia są wyraźnie różne niż dla pozostałych jego części.



Rys. 3 Podgląd z wizjera spektrofotometru: a) podczas pomiaru widma na nerwie liścia, b) podczas pomiaru widma obok nerwu liścia; czarna kropka pośrodku pola określa punkt pomiaru

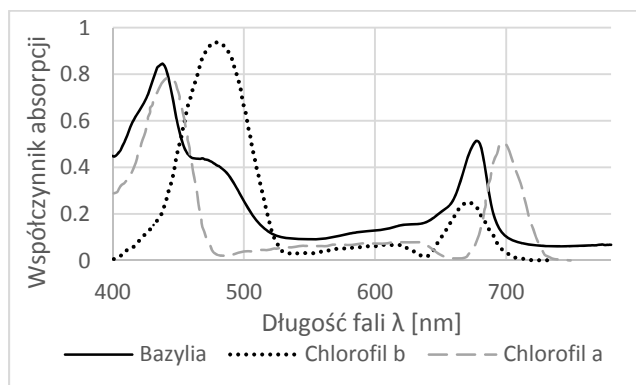
Opisany przypadek jest pokazany Rys. 3. Czarny punkt na środku to punkt pomiarowy spektrofotometru. Różnice widmowe przy pomiarze transmisyjnym widma dla zaprezentowanych punktów przedstawia wykres (Rys. 4).



Rys. 4 Charakterystyka widmowa liścia bazylii: a) podczas pomiaru widma na nerwie liścia, b) podczas pomiaru widma obok nerwu liścia

W celu obliczenia charakterystyki absorpcyjnej liścia zostały odjęte znormalizowane wartości widmowej luminancji energetycznej zgodnie ze wzorem (1).

$$(1) E_{\text{absorpcyjne}}(\lambda) = E_{\text{źródła}}(\lambda) - E_{\text{liścia}}(\lambda)$$



Rys. 5 Uśredniony współczynnik absorpcji bazylii w porównaniu z charakterystykami chlorofilu

W związku z dużymi rozbieżnościami pomiędzy poszczególnymi punktami pomiarowymi (pokazanymi na Rys. 4), reprezentatywną (uśrednioną) charakterystykę absorpcyjną liścia przeprowadzono w oparciu o sto pomiarów losowych punktów pięciu różnych mierzonych liści bazylii.

Wynik współczynnika absorpcji bazylii w porównaniu do chlorofilu a oraz chlorofilu b [12] został przedstawiony na rysunku 5.

Dobór widma lamp

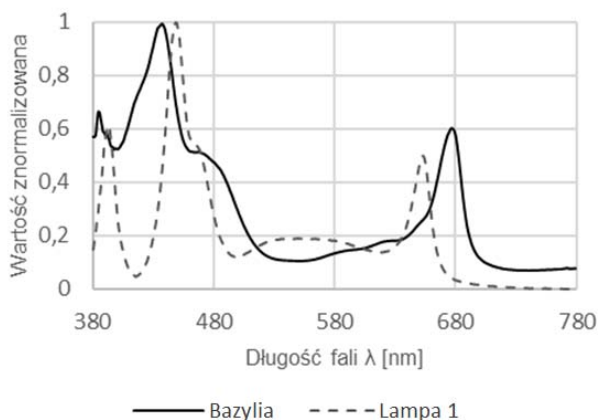
Na podstawie otrzymanych danych oraz dostępności na rynku diod LED zostały opracowane trzy propozycje oświetlenia.

Każda z lamp, oznaczonych 1, 2 i 3, składa się z siedmiu diod połączonych szeregowo na podłożu MCPCB umieszczonym na identycznych radiatorach, wystawianych za pomocą zasilacza stałoprądowego. Typy i ilości poszczególnych diod oraz wartości prądu znajdują się odpowiednio w Tabelach 1, 2 i 3.

Tabela 1 Diody użyte do budowy lampy 1.

Dioda	Prąd [mA]	ilość
CREE XP-E2 Photo Red	250	1
CREE XP-G3 S5 5700K CRI 70	250	3
CREE XP-G3 Royal Blue	250	1
CREE XP-E2 Blue	250	1
Prolight PK2N-1LLE	250	1

Charakterystyka spektralna Lampy 1 powinna w miarę możliwości odpowiadać charakterystyce spektralnej bazylii. Widmo uzyskane z takiego połączenia diod zostało porównane ze zmierzona charakterystyką [13] spektralną bazylii i zaprezentowane na rysunku 6.



Rys. 6 Porównanie widma lampy 1 do zmierzonego widma bazylii

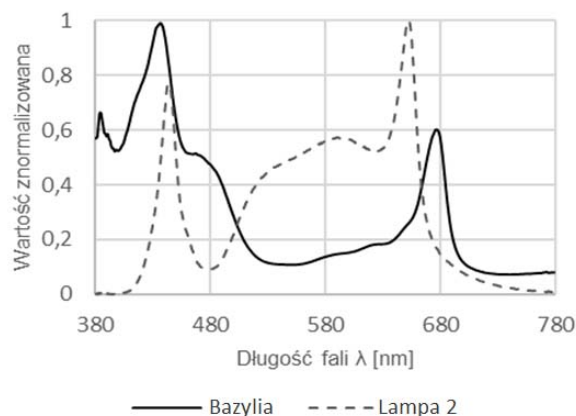
Tabela 2 Diody użyte do budowy lampy 2.

Dioda	Prąd [mA]	ilość
CREE XP-E2 Photo Red	250	1
CREE XP-G3 S5 5700K CRI 70	250	3
CREE XP-G3 R4 2700K CRI 80	250	3

Lampa 2 została przygotowana w oparciu głównie o diody białe, ponieważ są produkowane w dużo większych ilościach niż diody barwne w związku z czym ich cena jest bardziej korzystna. W związku z powyższym zostało uznane za zasadne przeprowadzenie sprawdzenia czy lampa bazująca głównie na diodach białych może być wykorzystywana do upraw roślin.

Widmo uzyskane z połączenia diod białych o temperaturze barwowej 5700 K oraz 2700 K, wzbogacone o widmo diody Photo Red zostało porównane ze zmierzona charakterystyką spektralną bazylii i zaprezentowane na rysunku 7.

Lampa 3 została opracowana w ten sposób, aby jej charakterystyka spektralna odpowiadała w miarę możliwości charakterystyce chlorofilu [14].

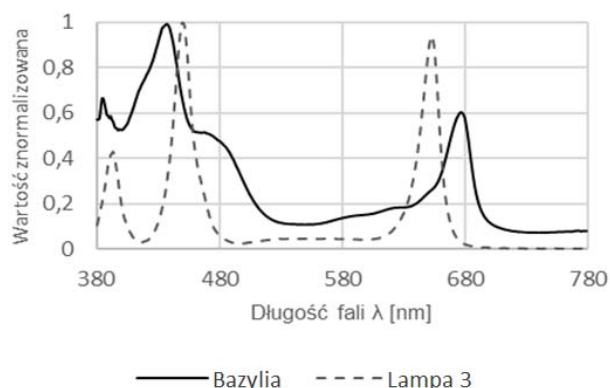


Rys. 7 Porównanie widma lampy 2 do zmierzonego widma bazylii

Tabela 3 Diody użyte do budowy lampy 3.

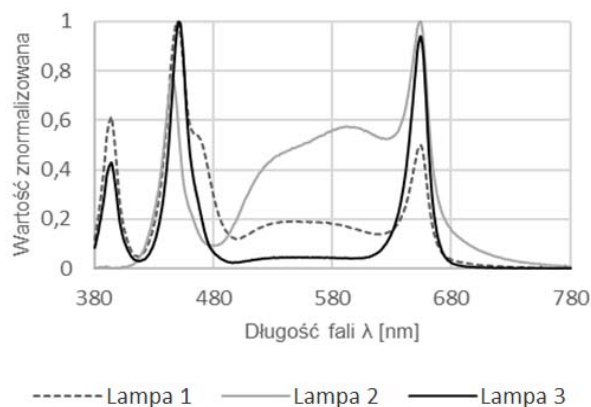
Dioda	Prąd [mA]	ilość
CREE XP-E2 Photo Red	250	3
CREE XP-G3 S5 5700K CRI 70	250	1
CREE XP-G3 Royal Blue	250	2
Prolight PK2N-1LLE	250	1

Widmo uzyskane z takiego mieszania diod zostało porównane ze zmierzona charakterystyką spektralną bazylii i zaprezentowane na rysunku 8.



Rys. 8 Porównanie widma lampy 3 do zmierzonego widma bazylii

Porównanie znormalizowanych charakterystyk widmowych zaprezentowano na wspólnym wykresie (Rys. 9), a parametry lamp w tabeli 4.



Rys. 9 Porównanie charakterystyk widmowych lamp

Tabela 4. Porównanie parametrów lamp zmierzone w sferze integracyjnej

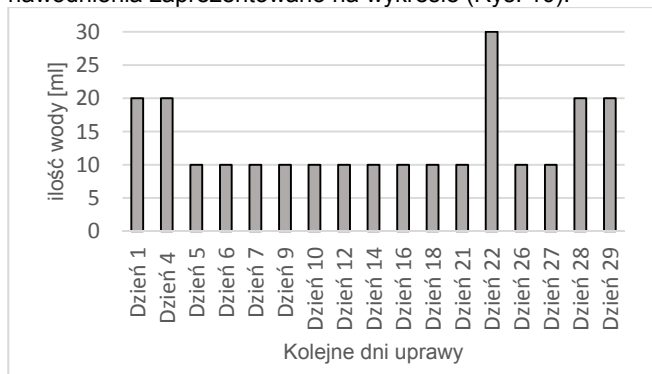
	Lampa 1	Lampa 2	Lampa 3
Moc [W]	5,39	5,28	5,01
Skuteczność [$\mu\text{mol}/\text{J}$]	2,11	2,85	2,21
PPF w zakresie 400 – 700 nm [$\mu\text{mol}/\text{s}$]	11,4	15,1	11,1
PPF w zakresie 600 – 699 nm [%]	45,8	34,5	51,5
PPF w zakresie 500 – 599nm [%]	39,4	29,8	8,4
PPF w zakresie 400 – 499nm [%]	14,7	35,7	40,1
PPF w zakresie 700 – 780nm [%]	2,7	2,1	0,5

Porównując liczbę wypromieniowanych fotonów w zakresie PAR 400 nm – 700 nm najwyższy wynik uzyskała lampa 2 bazująca na białych diodach. Posiada również najbardziej wyrównany rozkład w poszczególnych zakresach ze wszystkich zaprezentowanych źródeł.

Uprawa bazylii

W celu weryfikacji efektywności dobranych charakterystyk widmowych opracowanych lamp zorganizowano doświadczalną uprawę bazylii w kontrolowanych warunkach. Wszystkie próbki zostały umieszczone w specjalnie przygotowanych stanowiskach z przegrodami, aby poszczególne lampy oraz światło słoneczne nie oświetlały sąsiadujących stanowisk. Jedno stanowisko wyznaczono przy oknie. Próbkę z okna nazwano próbką referencyjną. Na czas uprawy wybrano przełom marca i kwietnia, ponieważ jest to naturalny na półkuli północnej okres wysiewania warzyw.

Na stanowiskach testowych włącznik czasowy regulował dzień i noc w proporcji 14/10. We wszystkich doniczkach posadzono po 6 nasion bazylii. Aby zapewnić dokładnie takie same warunki na wszystkich stanowiskach użyto takiej samej ziemi, a nasiona pochodziły z tej samej partii. Lampy zostały wyposażone w taki sam radiator i zostały zamontowane na jednakowej wysokości 25 cm ponad doniczką. Doniczki znajdowały się centralnie pod lampą. Wszystkie sadzonki były podlewane taką samą odmierzoną ilością wody. Każde podlanie zostało odnotowane. Rejestr nawodnienia zaprezentowano na wykresie (Rys. 10).



Rys. 10 Podlewanie sadzonek

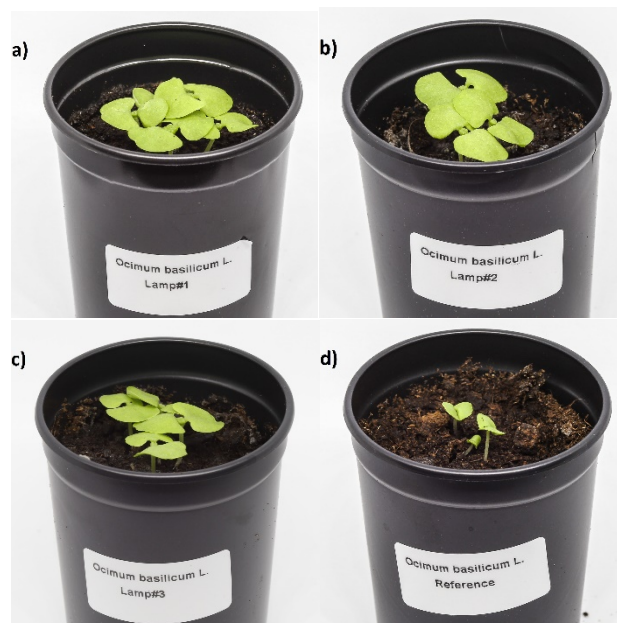
Na czas kiełkowania wszystkie próbki przechowywane były na stanowisku referencyjnym. Rozdzielone zostały na dedykowane stanowiska w szóstym dniu eksperymentu od

wysiewu. Nie wszystkie zasiane nasiona wykiełkowały. Dokładne wartości zaprezentowano w Tabeli 6.

Tabela 5 Statystyka kiełkowania

	Lampa 1	Lampa 2	Lampa 3	Okno
Posadzono	6	6	6	6
Wykiełkowało	4	3	4	3

Wyraźne różnice w rozwoju były widoczne w początkowej fazie. Sadzonka referencyjna rozwijała się znacząco wolniej od pozostałych. Różnice te zostały udokumentowane fotograficznie, a poszczególne sadzonki można zobaczyć na Rys. 11.



Rys. 11 Uprawa w 13 dniu doświadczenia: a) Próbka oświetlana lampą 1; b) Próbka oświetlana lampą 2; c) Próbka oświetlana lampą 3; d) Próbka referencyjna



Rys. 12 Uprawa w 30 dniu doświadczenia: a) Próbka oświetlana lampą 1; b) Próbka oświetlana lampą 2; c) Próbka oświetlana lampą 3; d) Próbka referencyjna

Prawdopodobną przyczyną wolniejszego rozwoju próbki z okna była niekorzystna pogoda i utrzymujące się przez wiele dni silne zachmurzenie. Wszystkie próbki oświetlane lampami, miały zachowane przez cały czas takie samo natężenie oświetlenia przez co ich rozwój jest bardzo do siebie zbliżony. Liścienie są podobnej wielkości oraz widać załączek liścia.

W 30 dniu uprawy porównano sadzonki oświetlane źródłami o różnej charakterystyce spektralnej. Różnice w rozwoju roślin są znaczące. Sadzonki oświetlane lampą 2 są znacząco wyższe od pozostałych, mają mniejsze liście a ich kształt jest mniej regularny. Mimo największej wartości PPF rośliny oświetlone tą lampą są zdecydowanie najmniej dorodne z trzech stanowisk ze sztucznym oświetleniem. Różnice między sadzonkami oświetlanymi lampami 1 i 3 nie są duże, chociaż nieco większe liście mają sadzonki oświetlone lampą 1. Zdecydowanie najslabiej rozwinęły się sadzonki referencyjne, które w tym samym czasie nie zdążyły rozwinąć w pełni pierwszych liści.

Podsumowanie

W pracy przeprowadzono i opisano kilkietapowy program badawczy, mający na celu analizę efektywności systemu oświetlenia roślin. Przeprowadzone pomiary, obserwacje i obliczenia pokazały, że oświetlenie odgrywa decydującą rolę w rozwoju rośliny. Mimo zapewnienia takich samych pozostałych warunków rozwoju, nie wszystkie rośliny rozwinęły się tak samo. Podczas uprawy rośliny o największym przyroście (dająca potencjalnie największy plon) nie był oświetlony lampą z największą ilością PPF ani nawet światłem dziennym.

Dowodzi to ogromnego znaczenia, jakie ma dobór charakterystyki widmowej oświetlenia do uprawy roślin. Innym bardzo ważnym czynnikiem jest regularność (przełączanie dzień/noc) i stałość natężenia oświetlenia. W warunkach naturalnych jest dużo czynników niezależnych od plantatora. Częste zachmurzenie może w znaczący sposób opóźnić rozwój roślin. W celu uniezależnienia od warunków pogodowych oraz aby wielkość plonów była powtarzalna zalecane jest oświetlanie roślin dedykowanymi systemami oświetlającymi, lub choćby stosowanie systemów wspomagających oświetlenie naturalne, czyli doświetlanie roślin.

Autorzy: dr inż. Adam Mazikowski, Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Katedra Metrologii i Optoelektroniki, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: adamazik@eti.pg.edu.pl; mgr inż. Mateusz Feldzensztajn, Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Katedra Metrologii i Optoelektroniki, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, NIVISS PHP Sp. z o. o. Sp. k. ul. Kopernika 56, 81-411 Gdynia, E-mail: mf@niviss.com; mgr inż. Tomasz Cegielski, NIVISS PHP Sp. z o. o. Sp. k. ul. Kopernika 56, 81-411 Gdynia, E-mail: tc@niviss.com.

LITERATURA

- [1] Canham A. E., Artificial Lighting for Plant Growth, *IEStran*, 9 (1954), 235-261
- [2] Nelson J.A., Bugbee B., Economic Analysis of Greenhouse Lighting: Light Emitting Diodes vs. High Intensity Discharge Fixtures, *PLoS ONE*, 9 (2014), n.6, e99010
- [3] Muneer, S., Kim, E.J., Park, J.S., Lee, J.H., Influence of green, red and blue light emitting diodes on multiprotein complex proteins and photosynthetic activity under different light intensities in lettuce leaves (*Lactuca Sativa L.*). *Int. J. Mol. Sci.*, 15 (2014) n.3, 4657–4670.
- [4] C. L. Tan N. H. Wong, P. Y. Tan, M. Ismail, L. Y. Wee, Growth light provision for indoor greenery: A case study, *Energy and Buildings*, 144 (2018) n.1, 207-217
- [5] J. Gajc-Wolska, K. Kowalczyk, M. Marcinkowska, D. Bujalski, L. Hemka: Wpływ rodzaju źródła światła na wybrane parametry fizjologiczne roślin pomidora, *Prace Instytutu Elektrotechniki*, 256 (2012), 67-74.
- [6] T.A. Dueck, J. Janse, B.A. Eveleens, F.L.K. Kempkes, L.F.M. Marcelis, *ISHS Acta Horticulturae*, 952 (2012), 335-342
- [7] K. Górecki, K. Górecka, Wpływ zjawisk cieplnych na właściwości diody LED mocy, *Przegląd Elektrotechniczny*, 87 (2011) 7, 144-147.
- [8] J. W. Heo, C. W. Lee, K. Y. Paek, Influence of mixed LED radiation on the growth of annual plants, *Journal of Plant Biology*, 49 (2006) 4, 286-290.
- [9] T. Cegielski, 4kanałowy moduł LED do systemu wspomagającego rozwój roślin, *IAPGOŚ*, 1 (2013), 29-33
- [10] F. Bantis, T. Ouzounis, K. Radogloua, Artificial LED lighting enhances growth characteristics and total phenolic content of *Ocimum basilicum*, but variably affects transplant success, *Scientia Horticulturae*, 198 (2016), 277-283.
- [11] A. Mazikowski, M. Feldzensztajn, Lamp of adjustable spectrum for photographic usage *Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments*, 10445 (2017), 104450K-3.
- [12] E. W. Chappelle M. S. Kim, J.E. McMurtrey III, Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): An algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll A, chlorophyll B, and carotenoids in soybean leaves, *Remote Sensing of Environment*, 39 (1992) 3, 239-247.
- [13] M. Feldzensztajn, A. Mazikowski, Comparison of modelling and measurement results of spectra emitted by a programmable lamp, *Photonics letters of Poland*, 10 (2018) 2, 42-44.
- [14] R. M. Metallo, D. A. Kopsell, C. E. Sams, N. R. Bumgarner, Influence of blue/red vs. white LED light treatments on biomass, shoot morphology, and quality parameters of hydroponically grown kale, *Scientia Horticulturae*, 235 (2018) 189-197.