

Maciej KOCUREK
Jan PILARSKI

WPŁYW ŚWIATŁA O ZMODYFIKOWANYM WIDMIE NA INTENSYWNOŚĆ FOTOSYNTEZY

STRESZCZENIE W ostatnich latach dynamicznie rozwija się zastosowanie lamp LED, zbudowanych z diod emitujących wąskie zakresy widmowe. Jedną z podstawowych zalet tej technologii jest możliwość komponowania składu spektralnego z diod o różnej barwie. Wiadomo, że poszczególne gatunki roślin w toku ewolucji przystosowały się do warunków siedliskowych różniących się składem spektralnym światła. Niewiele jest jednak informacji na temat lamp, które można skomponować z dostępnych w handlu diod LED i dopasowanych do konkretnych gatunków roślin. Do eksperymentów wybrano kluzję (*Clusia multiflora*), pelargonię (*Pelargonium zonale*) oraz koleusa (*Coleus blumei*). Badania rozpoczęto od oceny właściwości optycznych szeregu gatunków roślin. Na tej podstawie określono wymagania świetlne i dopasowano skład spektralny lampy. Do oceny gotowych widm wykorzystano analizator gazowy typu Irga oraz fluorymetr umożliwiający zmianę składu barwowego światła aktywnego. Dla każdego gatunku rośliny uzyskano specyficzne widmo spektralne charakteryzujące się najwyższą wydajnością fotosyntezy.

Słowa kluczowe: PAR, NIR, właściwości optyczne, refleksja, transmisja, absorpcja, fotosynteza

1. WSTĘP

Diody elektroluminescencyjne (LED) mają wiele zalet w stosunku do tradycyjnych form oświetlenia. Ich niewielkie rozmiary, długa żywotność, brak emisji promieniowania długofalowego, a także możliwość wyboru określonych długości fal i kompozycji dowolnego spektrum sprawia, że budzą wielkie nadzieje na wzrost efektywności upraw wymagających naświetlania lub doświetlania [1].

dr inż. Maciej KOCUREK, prof dr hab. inż. Jan PILARSKI
e-mail: [maciej.kocurek; jan.pilarski]@ujk.edu.pl

Uniwersytet Jana Kochanowskiego, Instytut Biologii
ul. Świętokrzyska 15, 25-406 Kielce

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 268, 2015

Dotychczasowe systemy oświetleniowe upraw ogrodniczych oparte na żarówkach metalohalogenkowych (MH) oraz sodowych wysokociśnieniowych (HPS) charakteryzują się szerokim widmem spektralnym, obejmującym promieniowanie ultrafioletowe UV, fotosyntetycznie czynne – PAR, a także bliską podczerwień – NIR. Szerokie spektrum zapewnia zarówno efekt fotosyntetyczny, jak również pozwala roślinom odbierać sygnały świetlne, a więc wpływać ich na fotomorfogenezę. Jednak brak regulacji poszczególnych zakresów widmowych uniemożliwia dopasowanie oświetlenia tradycyjnego do wymagań konkretnych gatunków roślin [2]. Budując lampy składające się z diod LED, można wybierać wąskie zakresy widmowe wydajne fotosyntetycznie lub fotomorfogenetycznie i jednocześnie unikać zakresów potencjalnie niekorzystnych [3].

Najczęściej widma lamp wykorzystujących diody LED próbują naśladować widma absorpcji chlorofili i emitują światło czerwone wraz z niebieskim, w różnych proporcjach, najczęściej od 10:1 do 3:1 [1]. Rzadziej są stosowane diody koloru zielonego, uważanego przez wiele lat za mało efektywne fotosyntetycznie [4, 5]. Dodatek diod emitujących daleką czerwień ok. 725 oraz UV ma znaczenie jedynie fotomorfogenetyczne [6, 3].

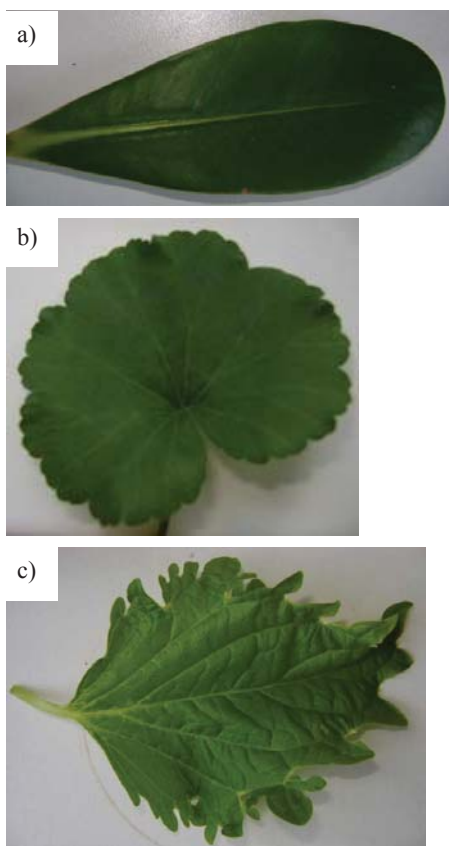
Widma absorpcji chlorofilu ekstrahowane z zielonych liści wykazują najwyższą absorpcję w zakresie fioletowo-niebieskim oraz czerwonym i minimalną w zielono-zółtym. Jednakże absorpcja wielu gatunków liści zmierzona za pomocą kuli Ulbrichta pokazała, że zielone liście roślin lądowych pochłaniają znaczną część światła zielonego [7, 8, 9]. W przeliczeniu na absorpcję, najbardziej efektywne fotosyntetycznie jest światło czerwone, niewiele ustępuje mu światło zielone, natomiast najniższą wydajnością charakteryzuje się światło niebieskie [10]. Wielkość absorpcji, refleksji i transmisji w poszczególnych zakresach spektralnych zależy w znacznym stopniu od warunków świetlnych, do których przystosowany jest dany gatunek [8, 11]. Opisano również szereg różnic we właściwościach optycznych liści pochodzących z różnych wysokości n.p.m. [12], w reakcji na stres środowiskowy [13], a także zmiany w trakcie sezonu wegetacyjnego [14].

Celem pracy była odpowiedź na pytanie: czy znając właściwości optyczne liścia, a szczególnie absorpcję promieniowania w poszczególnych zakresach spektralnych, można skonstruować widmo spektralne o najwyższej dla danego gatunku intensywności fotosyntezy?

2. MATERIAŁ I METODY

Materiał do badań stanowiły dojrzałe liście trzech gatunków roślin: kluzji (*Clusia minor*), pelargonii (*Pelargonium zonale*) oraz koleusa (*Coleus blumei*) odmiany Kong Green (rys. 1).

Właściwości optyczne mierzono w laboratorium w zakresie fotosyntetycznie czynnym (PAR, 400-700 nm) i w bliskiej podczerwieni (NIR, 700-1100 nm) przy użyciu spektrometrii LI-1800, z zewnętrzną zintegrowaną sferą 12 S (LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA). Refleksję (R) i transmisję (T) mierzono bezpośrednio, a absorpcję obliczano ze wzoru $A = 100 - (R + T)$. Pomiary wykonywano w czterech powtórzeniach, a prezentowane wyniki są średnimi arytmetycznymi, z obliczonym odchyleniem standardowym.



Rys. 1. Liście roślin wybranych do eksperymentów: a) kluzji, b) pelargonii, c) koleusa

Zawartość chlorofilu była oznaczana za pomocą chlorofilomierza SPAD 502 (Konica-Minolta, Japonia).

Pomiary fotosyntezy netto (P_n), przewodnictwa szparkowego (G_s), wykonano za pomocą gazowego analizatora podczerwieni LI-6400 (LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA), pracującego w układzie otwartym. Do pomiarów wykorzystywano komorę standartową o wymiarach 2×3 cm. Jako źródło światła zastosowano lampę oświetlającą SL 3500-A, wyposażoną w diody LED emitujące światło o długościach 447, 530 oraz 627 nm. Oznaczenia prowadzono w godzinach 8.00-10.00 w okresie najwyższej sprawności fotosyntetycznej liści.

Aktywność fotosyntetyczną liści oceniano również za pomocą modulowanej fluorescencji chlorofilu *a* przy użyciu fluorymetru MULTI-COLOR-PAM (Walz, Effeltrich, Germany). Badania przeprowadzano, używając zielonego światła aktywnego o długości fali 540 nm.

3. WYNIKI I DYSKUSJA

Względne właściwości optyczne dla trzech badanych gatunków przedstawia rysunek 2. Rośliny wybrane do doświadczeń, znacznie różniły się właściwościami optycznymi, zarówno refleksją, absorpcją, jak i transmisją. W zakresie fotosyntetycznie czynnym 400-700 nm najwyższą refleksją charakteryzowały się liście pelargonii; najniższą – liście kluzji. Wszystkie gatunki odbijały najmniej promieniowania w zakresie 400-500 oraz 600-700 nm. Najwyższą refleksję rejestrowano w zakresie światła zielonożółtego.

Różnice refleksji w poszczególnych zakresach promieniowania dla trzech badanych gatunków były znaczne. Największym zróżnicowaniem przebiegu charakteryzowały się liście koleusa. Z kolei największe odbicie w zakresie zielono-żółtym zanotowano dla liści pelargonii. Natomiast najbardziej niezależną od długości fali refleksją charakteryzowały się liście kluzji. Promieniowanie, które nie zostało odbite lub zaabsorbowane, ulega transmisji. W przypadku kluzji, w zakresie 400-500 nm niemal nie zanotowano transmisji, podobnie w zakresie 650-680 nm. Natomiast pozostałe gatunki

transmitowały przez liście znaczną część promieniowania w zakresie 400-500 nm około 5% i około 10% w zakresie 650-680 nm. Największe różnice dotyczyły zakresu 500-650 nm i transmisja przez liście koleusa była o około 1/3 większa niż w przypadku pelargonii. W zakresie NIR zarówno liście koleusa, jak i pelargonii, charakteryzowały się zbliżoną refleksją na poziomie 45%, natomiast kluzji około 50%. Odwrotnie w przypadku transmisji: liście pelargonii i koleusa transmitowały około 50%, a kluzji około 45% promieniowania. Absorpcja w zakresie NIR dla wszystkich gatunków była zbliżona i wynosiła około 5%.

Szczególnie interesujące dla fotosyntetycznej aktywności jest promieniowanie pochłaniane przez liście, dlatego absorpcja promieniowania w zakresie fotosyntetycznym została umieszczona na osobnym wykresie (rys. 3). Najwyższym pochłanianiem charakteryzowała się kluzja: około 95% w zakresie 400-500 nm i 650-680 nm. Najniższa absorpcja u tego gatunku to około 85% przy 550 nm. Pelargonie i koleus charakteryzowały się znacznie niższą absorpcją we wszystkich zakresach w porównaniu z kluzją. Jednocześnie liście koleusa, w porównaniu z pelargonią, silniej absorbowały promieniowanie w zakresie 400-500 i 650-680 nm i znacznie słabiej w zakresie 500-650 nm.

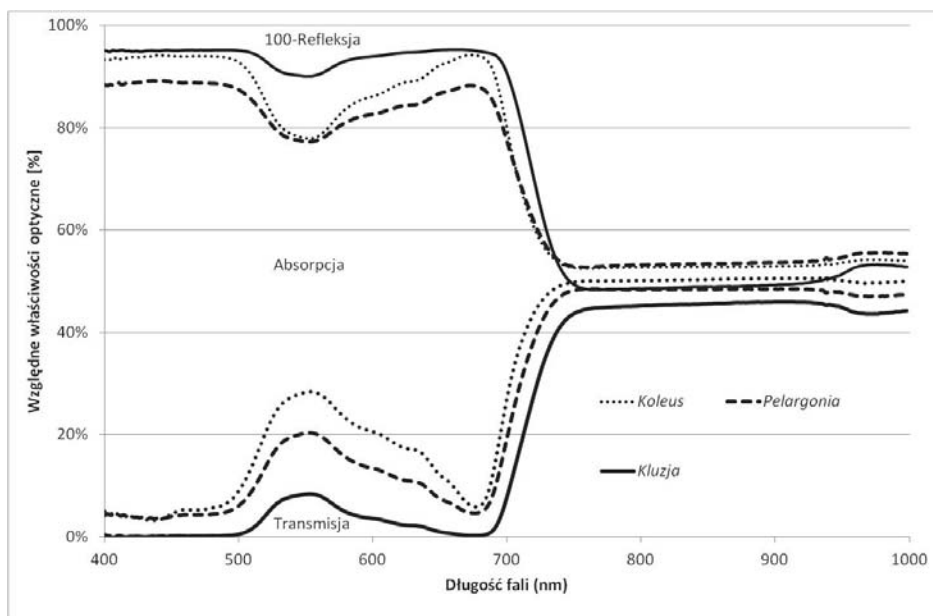
Różnice w absorpcji promieniowania przez liście zależą w znacznym stopniu od grubości i zawartości w nim chlorofilu [15]. W przypadku badanych gatunków, największą grubością charakteryzowały się liście kluzji, potem pelargonii, a najcieńsze były liście koleusa (tab. 1). W tej samej kolejności malała zawartość chlorofilu w blaszce liściowej. Właściwości optyczne badanych liści odzwierciedlają tę zależność. Zapewne, sądząc po zawartości chlorofilu, kluzja jest rośliną najlepiej przystosowaną do niższych intensywności promieniowania w porównaniu z pelargonią i koleusem [16].

Zastosowanie lampy wyposażonej w diody emitujące światło o długości 447, 530 i 627 nm pozwoliło na analizę absorpcji przy tych długościach fali (tab. 1). Obliczona absorpcja dla poszczególnych długości fal (447, 530 i 627 nm) posłużyła do stworzenia proporcji światła wyjściowego.

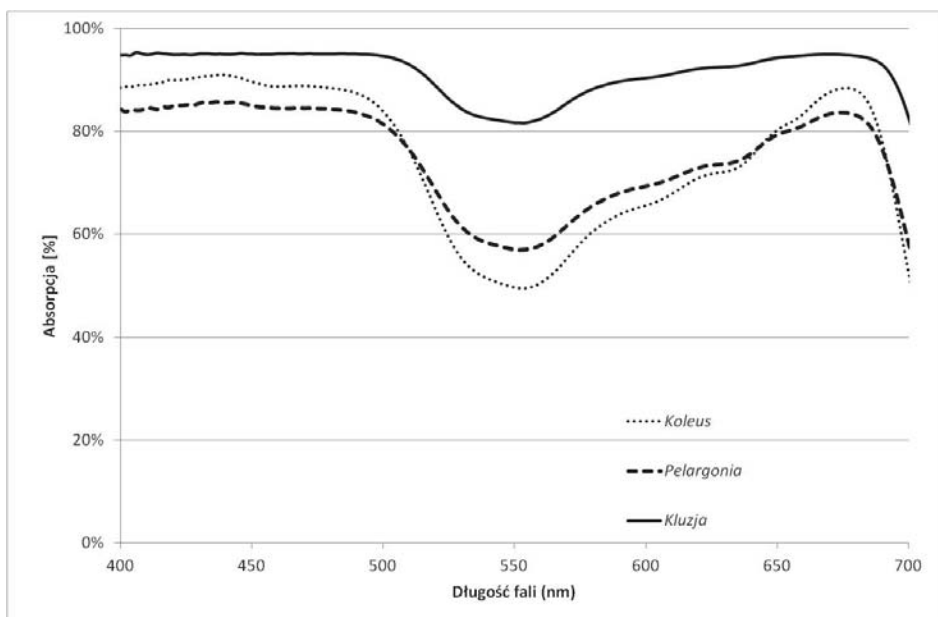
TABELA 1

Absorpcja promieniowania, zawartość chlorofilu, grubość liści i wpływ składu promieniowania na intensywność fotosyntezy liści koleusa, pelargonii i kluzji

| | Długość fali (nm) | Kluzja | Pelargonie | Koleus |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------|-------------------|---------------|
| Absorpcja (%) | 447 | 95,2 | 85,5 | 90,5 |
| | 530 | 84,4 | 61,3 | 51,4 |
| | 627 | 92,6 | 73,6 | 72,1 |
| Udział zakresów promieniowania w absorpcji przy 447, 530 i 627 nm (%) | 447 | 35 | 39 | 42 |
| | 530 | 31 | 28 | 24 |
| | 627 | 34 | 33 | 34 |
| Proporcje absorpcji w 447 nm : 530 nm : 627 nm | | 1 : 0,9 : 1 | 1 : 0,7 : 0,9 | 1 : 0,6 : 0,8 |
| Zawartość chlorofilu (index spad) | | 57,6 | 41,8 | 19,2 |
| Grubość liści (mm) | | 0,93 | 0,24 | 0,16 |
| Proporcje promieniowania o długości fali: 447 nm : 530 nm : 627 nm, zapewniające maksymalną intensywność fotosyntezy (P_N) | | 1 : 6,3 : 2 | 1 : 4,7 : 2 | 1 : 2 : 2 |

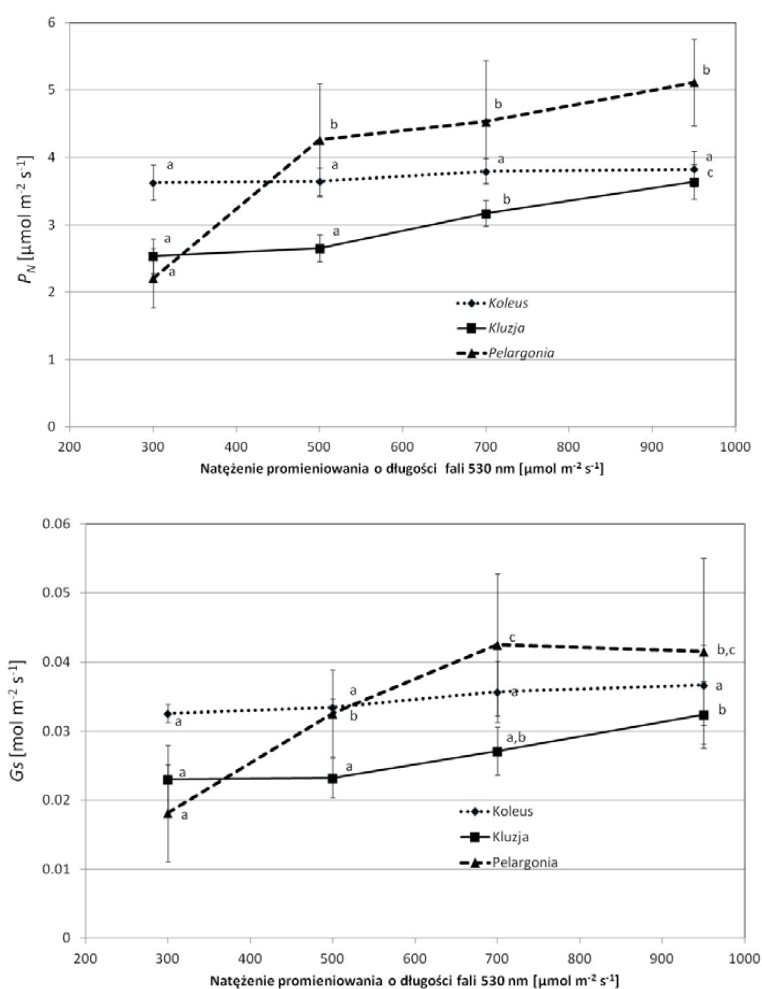


Rys. 2. Względne właściwości optyczne liści koleusa, pelargonii i kluzji, $n = 4$, $SD < 5\%$



Rys. 3. Absorpcja promieniowania w zakresie fotosyntetycznie czynnym przez liście koleusa, pelargonii i kluzji, $n = 4$, $SD < 5\%$

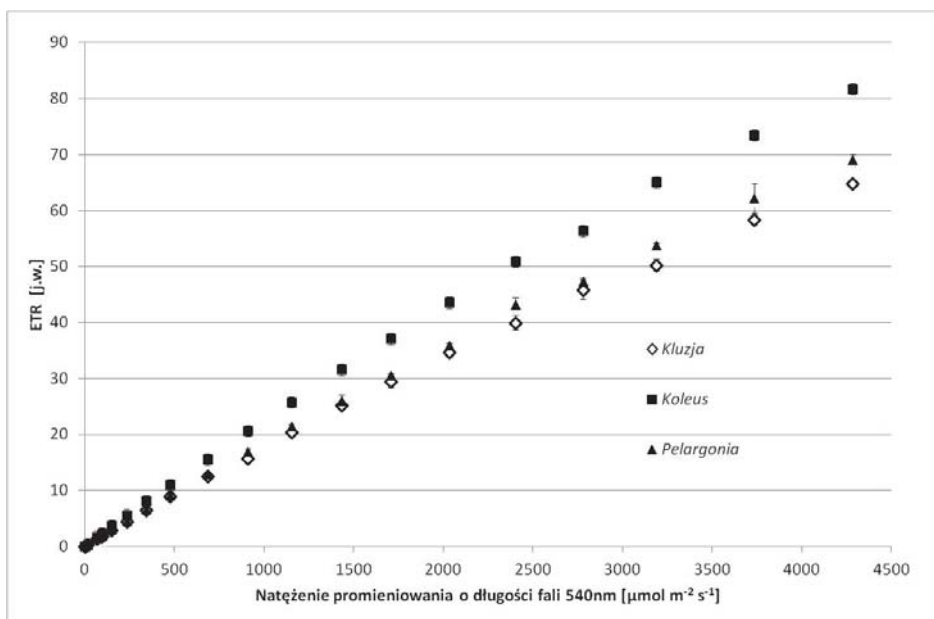
W liściach kluzji stosunek absorpcji światła 447 : 530 : 627 nm był najbardziej wyrównany i wynosił 1 : 0,9 : 1, natomiast największym zróżnicowaniem charakteryzował się koleus 1 : 0,6 : 0,8. Ponieważ absorpcja w świetle zielonym (530 nm) zmieniała się najsilniej, zastosowano różne poziomy tego promieniowania. Aby uzyskać efekt bardziej zbliżony do proporcji spotykanych w lampach oświetlających, charakteryzujących się przewagą światła czerwonego nad niebieskim [17], zastosowano stałą proporcję światła niebieskiego i czerwonego 1 : 2 – niebieskie: 447 nm – $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, czerwone 627 nm – $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Intensywność światła zielonego zmieniano w zakresie $300\text{-}950 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. W takich warunkach mierzono intensywność fotosyntezy i przewodnictwo szparkowe, a uzyskane wartości zestawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Wpływ intensywności promieniowania zielonego o długości fali 530 nm na intensywność fotosyntezy (P_N) i przewodnictwo szparkowe (G_s), przy stałej intensywności promieniowania niebieskiego o długości fali 447 nm – $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ i promieniowania czerwonego o długości fali 627 nm – $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Wyniki tych pomiarów pokazują znaczne różnice intensywności fotosyntezy pomiędzy liśćmi poszczególnych roślin. Reakcja na wzrastającą intensywność promieniowania zielonego ujawniła się w przypadku kluzji i pelargonii. U tych gatunków ze wzrostem intensywności światła zielonego intensywność fotosyntezy wzrastała. Nawet zastosowanie $950 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ powodowało jeszcze wzrost fotosyntezy u kluzji i pelargonii. Natomiast fotosynteza netto liści koleusa nie zmieniała się istotnie wraz ze wzrostem intensywności światła zielonego i utrzymywała się na podobnym poziomie. Wzrost intensywności fotosyntezy był wyraźnie skorelowany z poziomem absorpcji promieniowania zielonego badanych gatunków. Najbardziej wydajne fotosyntetycznie proporcje światła 447 : 530 : 627 nm wyniosły: dla koleusa 1 : 2 : 2, pelargonii 1 : 4,7 : 2 i kluzji 1 : 6,3 : 2.

Zmiany w przewodnictwie szparkowym w dużej mierze pokrywały się z pomiarami fotosyntezy netto (rys. 4). Wraz ze wzrostem intensywności światła zielonego u pelargonii i kluzji obserwowano wzrost przewodnictwa szparkowego. Natomiast u koleusa nie zanotowano zmian w przewodnictwie szparkowym przy rosnących poziomach oświetlenia. Wiele doniesień [18, 19] pokazuje, że światło zielone stanowi impuls zamykający aparaty szparkowe. Również Kim i wsp. [20] notowali niższe przewodnictwo szparkowe u sałaty rosnącej pod lampami z dodatkiem światła zielonego w porównaniu z roślinami uprawianymi jedynie w świetle czerwono-niebieskim. Nasze wyniki wskazują, że przy odpowiednio wysokim udziale światła niebieskiego i czerwonego, promieniowanie zielone może stymulować otwieranie aparatów szparkowych.



Rys. 5. Szybkość transportu elektronów (ETR) w zależności od oświetlenia światłem monochromatycznym o długości fali 540 nm, $n = 4$

Aby potwierdzić wpływ światła zielonego na intensywność fotosyntezy u badanych gatunków, dokonano pomiarów szybkości transportu elektronów (ETR) za pomocą fluorymetru, wybierając zielone światło aktyczne o długości 640 nm. Uzyskano wyniki świadczące o innej, niż w przypadku analizatora IRGA, reakcji na światło zielone, ponieważ najwyższą prędkością transportu elektronów charakteryzowały się liście koleusa, a najniższą kluzji. Wydaje się jednak, że pomiary fluorescencyjne są bardziej zależne od grubości liści w porównaniu z pomiarami wymiany gazowej i są prawdziwe dla określonej cienkiej warstwy komórek [10, 21].

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie widm refleksji, transmisji i absorpcji liści można stworzyć skład spektralny promieniowania, umożliwiający efektywne oświetlenie, dopasowane do konkretnego gatunku rośliny. Ponieważ w badanych liściach największe różnice dotyczyły absorpcji światła w zakresie zielonym, testowano jedynie zmiany w tym zakresie. Manipulując natężeniem światła zielonego, udało się dopasować najbardziej efektywny udział tego koloru w widmie spektralnym lampy.

Podziękowania

Badania zostały wykonane przy wsparciu MNiSW, nr grantu NN304156440.

LITERATURA

1. Massa G.D.: Plant Productivity in Response to LED Lighting, HortScience, 43, s. 1951-1956, 2008.
2. Grzesiak W., Żupnik M., Wojciechowska R.: Inteligentny system doświetlania roślin bazujący na technologii SSL LED, Prace Instytutu Elektrotechniki, z. 255, s. 259-276, 2012.
3. Olle M., Viršille A.: The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant, Agricultural and Food Science, 22, s. 223-234, 2013.
4. Went F.W.: The experimental control of plant growth, Waltham, MA: Chronica Botanica, 1957.
5. Klein R.M., Edsall P.C., Gentile A.C.: Effects of near ultraviolet and green radiations on plant growth, Plant Physiology, 40, s. 903-906, 1965.
6. Pilarski J., Tokarz K., Kocurek M.: Adaptacja roślin do składu spektralnego i intensywności promieniowania, Prace Instytutu Elektrotechniki, z. 256, s. 223-236, 2012.
7. McCree K.J.: The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants, Agric. Meteorol., 9, s. 90-98, 1972.
8. Gates D.M.: Biophysical ecology. Springer, New York, USA, 1980.
9. Kocurek M., Pilarski J.: Dystrybucja światła w nadziemnych częściach roślin zielnych i zdrewniałych, Pamiętnik Puławski, 144, s. 91-104, 2007.

10. Terashima I., Fujita T., Inoue T., Wah S.C., Oguchi R.: Green Light Drives Leaf Photosynthesis more efficiently than red light in strong white light: revisiting the enigmatic question of why leaves are green, *Plant Cell Physiol.*, 50, s. 684-697, 2009.
11. Lei T.T., Tabuchi R., Kitao M., Koine T.: Functional relationship between chlorophyll content and leaf reflectance and light-capturing efficiency of Japanese forest species, *Physiol. Plant.*, 96, s. 411-418, 1996.
12. Ricardson A.D., Berlyn G.P., Duigan S.P.: Reflectance of Alaskan black spruce and white spruce foliage in relation to elevation and latitude, *Tree Physiol.*, 23, s.537-544, 2002.
13. Grzesiak M.T., Filek W., Hura T., Kocurek M., Pilarski J.: Leaf optical properties during and after drought stress in triticale and maize genotypes differing in drought tolerance, *Acta Physiologiae Plantarum*, 32, s. 433-442, 2010.
14. Czarnowski M.: Właściwości optyczne liści drzew i krzewów, *Wiadomości Botaniczne*, 38, s. 47-55, 1994.
15. Carter G.A., Knapp A.K.: Leaf optical properties in higher plants: Linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration, *Am. J. Bot.*, 88, s. 677-684, 2001.
16. Walters R.G.: Towards an understanding of photosynthetic acclimation, *Journal of Experimental Botany*, 56, s. 435-447, 2005.
17. Kłamkowski 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.
18. Frechilla S., Talbott L.D., Bogomolni R.A., Zeiger E.: Reversal of blue light-stimulated stomatal opening by green light, *Plant Cell Physiology*, 41, s. 171-176, 2000.
19. Talbott L.D., Nikolova G., Ortiz A., Shmayevich I., Zeiger E.: Green light reversal of blue-light-stimulated stomatal opening is found in a diversity of plant species, *American Journal of Botany*, 89, s. 366-368, 2002.
20. Kim H.-H., Goins G.D., Wheeler R.M., Sager J.C.: Greenlight supplementation for enhanced lettuce growth under red- and blue-light-emitting diodes, *HortScience*, 39, s. 1617-1622, 2004.
21. Schreiber U., Klughammer C., Kolbowski J.: MC-PAM. Various light qualities. High-end chlorophyll fluorescence analysis with the MULTI-COLOR-PAM. I. Various light qualities and their applications, *PAM Application Notes*, 1, s. 1-21, 2011.

Rękopis dostarczono dnia 16.04.2014 r.

THE INFLUENCE OF LIGHT WITH MODIFIED SPECTRUM ON PHOTOSYNTHETIC INTENSITY

Maciej KOCUREK, Jan PILARSKI

ABSTRACT *In recent years, the use of LED lamps built with diodes emitting narrow spectral range, rapidly grows. One of the main advantages of this technology is the ability to compose lamps of new spectral composition with LEDs of different colors. It is known that various species of*

plants during evolution adapted themselves to the habitat of differing spectral composition of the light. However, there is little information on the light sources which can be composed with commercially available LEDs and fitted to specific plant species. The experiments were carried out on Clusia multiflora, Pelargonium zonale and Coleus blumei. The study began by assessing the optical properties of a number of plant species. On this basis the light requirements were specified and used to match the spectral illumination. The spectra were tested using an IRGA gas analyzer and multicolor actinic light fluorometer. Specific spectrum characterized with the highest yield of photosynthesis for each plant species were composed.

Keywords: PAR, NIR, optical properties, reflectance, absorption, transmittance, photosynthesis