

## Ocena aspektów energetycznych oświetlenia stosowanego do uprawy roślin

**Streszczenie.** W pracy dokonano oceny efektywności oświetlenia do uprawy roślin. Badania zostały dokonane w oparciu o doświadczalną uprawę popularnych ziół: mięty, bazylii i kolendry. Oceniany był uzysk masy suchej i zawartość chlorofilu dla różnych widm oświetlenia z uwzględnieniem pobieranej mocy elektrycznej, a także wpływ dynamicznej zmiany wysokości modułu oświetleniowego nad uprawą na pobieraną energię. Wyniki wskazują na znaczny potencjał oszczędności energii.

**Abstract.** An assessment of the effectiveness of lighting for plants has been carried out. The research was based on the experimental cultivation of popular herbs: mint, basil and coriander. Dry matter yield and chlorophyll content for various light spectra were evaluated, taking into account the electrical power consumption, as well as the impact of the dynamic change of the height of the lighting module above the cultivation on the energy consumption. The results show significant potential for energy savings. (**Evaluation of energy aspects of lighting used for plant cultivation**).

**Słowa kluczowe:** oświetlenie roślin, uzysk masy suchej, oszczędność energii, efektywność energetyczna

**Keywords:** plants illumination, dry mass yield, energy saving, energy efficiency

### Wstęp

W ostatnich latach coraz większą rolę w produkcji warzyw liściastych i ziół odgrywają systemy uprawy pionowej, zwane farmami wertykalnymi [1, 2, 3]. Takie rozwiązania pozwalają umiejscowić centra produkcji żywności blisko potencjalnych odbiorców, przy wykorzystaniu relatywnie niewielkiej powierzchni, co jest szczególnie istotne ze względu na postępującą centralizacją ośrodków miejskich [3, 4]. Rośliny uprawiane są często w systemie zamkniętym, z mocno ograniczoną ilością szkodników, co pozwala na uprawę bez użycia pestycydów. Możliwa jest także przydomowa uprawa roślin w zamkniętych pomieszczeniach [5]. Ma to szczególne znaczenie w sytuacji braków na światowym rynku żywności [6], gdy dotychczasowe linie zaopatrzenia zostały przerwane z powodu geopolitycznych zawirowań. Stąd wiele zespołów badawczych podejmuje tematykę produkcji żywności w farmach wertykalnych [3, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]. Prowadzone prace dotyczą bardzo wielu gatunków roślin, uprawianych w różnych warunkach. Rośliny w farmach wertykalnych uprawiane są zwykle w systemie zamkniętym, w którym większość parametrów środowiskowych jest kontrolowana [3, 12, 14]. Jednym z takich parametrów jest odpowiednia ilość i widmo światła [15, 16, 17, 18], zapewniana przez systemy doświetlania czy oświetlania roślin.

Systemy sztucznego oświetlenia roślin odgrywają coraz ważniejszą rolę w rolnictwie i ogrodnictwie. Stosowanie tego typu rozwiązań dobrze wpisuje się w potrzebę zapewnienia powtarzalnych warunków wzrostu roślin. Problematyką oświetlania upraw roślinnych zespoły badawcze zajmują się od przeszło pół wieku, przy czym stosowano wówczas głównie lampy sodowe czy wyładowcze [18, 19]. Obecnie, w związku ze znacznym ulepszeniem techniki oświetleniowej, w uprawie roślin coraz powszechniejsze stają się systemy oświetleniowe oparte o diody elektroluminescencyjne [20, 21, 22, 23]. W porównaniu z innymi źródłami światła diody elektroluminescencyjne są energooszczędne, ponadto charakteryzują się niską emisją ciepła, możliwością regulacji natężenia światła oraz dość precyzyjnego ustawienia widma światła [24, 25, 26, 27]. Źródła literaturowe pokazują, że zachowanie roślin, m.in. kiełkowanie nasion, zakładanie siewek [28], kwitnienie [29], ukorzenianie [30], przystosowanie do reakcji stresowych [31], a także barwa liści [32, 33], uzysk masy suchej, uzysk

masy mokrej czy zawartość substancji czynnych zależą od intensywności i widma światła zastosowanego w procesie uprawy [12, 21]. Od tego widma zależy także zawartość substancji biochemicznych, antocyjanów, flawonoidów, karotenoidów, w tym także zawartość niektórych substancji leczniczych, takich jak mentol w liściach mięty [34] czy tetrahydrokannabinol (THC) w konopiach indyjskich oraz siewnych [35]. Do ważnych parametrów jakościowych roślin należą: plon liści, morfologia roślin, uzysk świeżej i suchej masy [12, 36] oraz stężenie metabolitów wtórnych (antocyjanów, fenoli, flawonoidów) oraz zdolności antyoksydacyjne [37].

Jak wynika z przedstawionego krótkiego przeglądu, większość autorów skupia się na badaniach wpływu oświetlenia (intensywności oraz widma) na różnorakie parametry użytkowe poszczególnych gatunków roślin i optymalizacji tego oświetlenia. Można zatem po części uznać, że uzyskanie lepszych (większych) plonów dla wskazanego optymalnego oświetlenia ma sens ekonomiczny i przekłada się na pewne oszczędności. Prawie całkowicie pomijany jest jednakże aspekt energetyczny w ujęciu technicznym, czyli ilość energii elektrycznej potrzebnej dla danego rodzaju oświetlenia. Tematykę tę podejmuje w ostatnim czasie nieliczne ośrodki [4, 20, 38].

Aspekty energetyczne związane są z ogólną sprawnością modułu lamp, skutecznością zamiany energii elektrycznej na optyczną, zastosowanym materiałem półprzewodnikowym i wybranymi parametrami diod elektroluminescencyjnych, jak np. napięcie przewodzenia  $V_f$ . Nieuwzględnienie powyższych czynników w ocenie skuteczności oświetlenia do uprawy roślin może prowadzić do błędnych wniosków, np. najlepsze z punktu widzenia własności użytkowych roślin widmo mogło zostać uzyskane przy niewspółmiernie dużym wydatku energetycznym. Równie istotnym, a często pomijanym aspektem jest sposób montażu modułu oświetleniowego. Autorzy prac zwykle nie precyzują sposobu ich zamontowania. Optymalizacja sposobu montażu (np. dobór wysokości nad uprawą) daje także znaczny potencjał oszczędności energii elektrycznej.

Zagadnienie oszczędzania energii elektrycznej przez systemy oświetlania upraw roślinnych wydaje się szczególnie istotne w kontekście kryzysu na rynku surowców energetycznych, a w konsekwencji znaczących podwyżek cen energii elektrycznej. Wskazane jest zatem

zwiększenie efektywności systemów oświetleniowych do uprawy roślin w kontekście zmniejszenia zużycia energii. Trendy te znajdują potwierdzenie w regulacjach Unii Europejskiej i krajowych (ustawa z 10.2022) [31], obligujących do oszczędzania energii, w odniesieniu do wybranych podmiotów publicznych.

### Metrologia systemów oświetlenia roślin

Dla ilościowego określenia ilości światła stosowanego w uprawach roślin, zdefiniowany został parametr PPF (photosynthesis photon flux). Jest to parametr kwantowy, proporcjonalny do całkowitej liczby fotonów fotosyntetycznie czynnych emitowanych przez źródło światła [40]. Analogicznie, PPF (photosynthesis photon flux density) jest gęstością powierzchniową strumienia fotonów fotosyntetycznie czynnych [40]. Parametry te są powszechnie stosowane przez plantatorów, projektantów lamp czy nawet naukowców [12, 37]. Jednakże PPF (lub PPF) nie jest idealnym parametrem odpowiadającym zapotrzebowaniu roślin na oświetlenie i mają istotne ograniczenia: (i) wyznaczenie PPF jest zawężone do zakresu 400-700 nm (photosynthesis active radiation – PAR) nie uwzględniając zakresu UV oraz dalekiej czerwieni FR (far red), pomimo udziału tych długości fali w procesie wzrostu roślin [41, 7], (ii) nie są uwzględniane charakterystyki absorpcyjne roślin, głównie chlorofilu a oraz b, ale także kryptochromów czy fitochromów [15, 7] i zapotrzebowanie roślin na poszczególne długości fali, różne dla poszczególnych gatunków, (iii) parametry te odnoszą się jedynie do liczby fotonów, natomiast nie jest brana pod uwagę energia fotonu (np. 2,75 eV dla 450 nm i 1,88 eV dla 660 nm), co powoduje niejednoznaczność zależności pomiędzy PPF oraz całkowitą energią promieniowania.

Dodatkowo zachodzi niejednoznaczność formalnego opisu zastosowanego promieniowania. Badania związane z uprawą roślin najczęściej prowadzone są przez specjalistów z dziedziny biologii, biotechnologii, ogrodnictwa czy nauk pokrewnych, często nie posiadających pełnej wiedzy dotyczącej właściwego opisu aspektów technicznych związanych z parametrami i widmem modułów oświetleniowych. PPF oraz PPF) jest stosowane do oceny ilości światła w uprawach roślin nawet w odniesieniu do całkowicie różnych widm [37]. Powoduje to, że uzyskane wyniki mogą być niejednoznaczne i praktycznie nie do powtórzenia przez inne zespoły badawcze ze względu na niemożliwość odtworzenia warunków eksperymentu.

Wielu autorów stosuje dodatkowe uszczegółowienie opisu zastosowanego oświetlenia. Dość często podawane są informacje o stosunku ilości światła czerwonego i niebieskiego R:B, czy stosunku światła czerwonego, zielonego i niebieskiego R:G:B [42, 43]. Innym sposobem przedstawienia powyższych proporcji jest podział szerokiego widma na podzakresy o szerokości 100 nm, lub 50 nm [44], a następnie przedstawienie intensywności światła w tych zakresach. Zakresy te niekiedy wykraczają poza zakres PAR, co przynajmniej częściowo kompensuje ograniczenia parametrów PPF i PPF. Taki sposób prezentowania danych niesie dodatkowe informacje w porównaniu do podawania jedynie wartości PPF i PPF. Jednakże istnieje bardzo dużo kombinacji spektralnych z użyciem komercyjnie dostępnych źródeł spełniających podane wartości. Bez podania dodatkowych szczegółów: środkowych długości fali i szerokości połówkowych widma poszczególnych źródeł LED, czy też podanie pełnych charakterystyk widma tych źródeł, odtworzenie wynikowego widma z wystarczającą dokładnością, a tym samym powtórzenie eksperymentu przez inne zespoły badawcze

nie będzie możliwe. Najlepszym sposobem na przedstawienie warunków eksperymentu w zakresie zastosowanego oświetlenia jest podanie pełnej charakterystyki widmowej: tabelarycznie lub w postaci wykresu o szczegółowości wystarczającej do odtworzenia widma. Jednak podawanie pełnego widma światła może być w pewnych sytuacjach niewygodne. Jednym z powodów jest konieczność przedstawienia wielu widm. Dodatkowo tzw. parametry całkowite, a takim jest PPF, PPF) czy intensywność podawana w poszczególnych zakresach) lepiej oddają ideę eksperymentu w zakresie zmian (podobnie jak kolorymetria w odniesieniu do zakresu widzialnego). Warto zauważyć, że z tego powodu stosowanie PPF jest wygodne i może być uzasadnione w niektórych sytuacjach. W sytuacji analizy porównawczej, gdy widmo światła pozostaje niezmiennie, a zmienia się tylko intensywność (zakładając pomijalny wpływ zmiany intensywności na widmo), PPD oraz PPF) dobrze opisują warunki eksperymentu.

Potrzeba posiadania dobrego parametru całkowitego, pozbawionego większości wskazanych na początku rozdziału ograniczeń, powoduje poszukiwania nowych rozwiązań. Niektórzy autorzy zaczynają posługiwać się pojęciem promieniowania biologicznie czynnego (biologically active radiation), zdefiniowanego w zakresie 300–800 nm [45] lub gęstością strumienia fotonów (PFD – photon flux density) definiowane dla szerszego zakresu długości fal [46]. W ostatnim czasie niektórzy autorzy mocno krytykują celowość ilościowego opisu intensywności promieniowania dla roślin za pomocą PPF [47] lub wprost sugerują konieczność przededefiniowania zakresu PAR [48]. Stosowane są dodatkowe parametry, np. DLI (daily light integral) do ilościowej oceny promieniowania w ciągu dnia [54] czy parametru wyrażonego w  $\mu\text{mol}/\text{J}$  dla oceny efektywności energetycznej [20]. Coraz częściej jest też brany pod uwagę aspekt zapewnienia oświetlenia korzystnego zarówno dla roślin, jak i dla ludzi [49] oraz zagadnienia związane z zapewnieniem bezpieczeństwa fotobiologicznego [50].

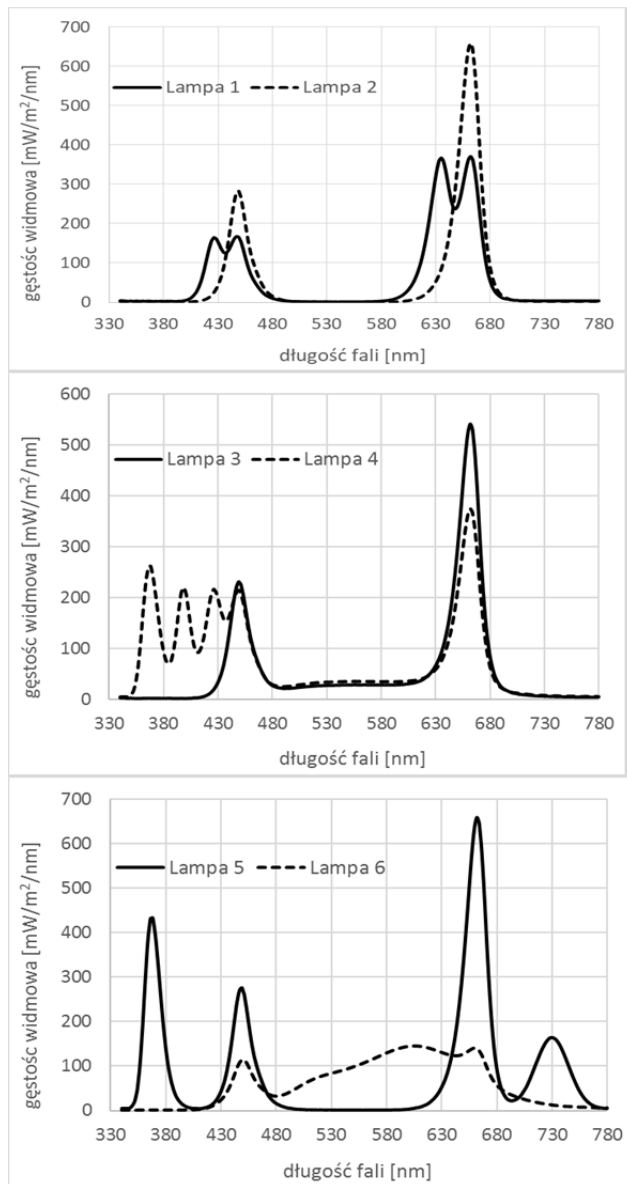
Tabela 1. Wybrane parametry zastosowanych w uprawie testowej modułów lamp

Lampa	Plan. PPF [ $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ]	Zastosowane LEDy	Proporcje widma
1	150	426 nm, 450 nm, 635 nm, 660 nm	R:B = 2,5:1
2	150	450 nm, 660 nm	R:B=2,5:1
3	150	450 nm, 660 nm, 5100K@CRI91	R:G:B = 2,5:0,4:1
4	150	367 nm, 398 nm, 426 nm, 450 nm, 660 nm	R:G:B = 1:0,3:1
5	150	367 nm, 450 nm, 660 nm, 730 nm	R:B=2,5:1
6	150	450 nm, 660 nm, 5100K@CRI91, 3100K@CRI82, 2800K@CRI83, 1860K@CRI42	R:G:B = 2,6:2,5:1

### Uprawa doświadczalna

W celu zbadania wybranych aspektów energetycznych, przeprowadzone zostały dwie doświadczalne uprawy. Uprawy te dotyczyły trzech popularnych gatunków ziół: mięty (*Mentha rotundifolia*) [10] oraz bazylii (*Ocimum basilicum*) [51] i kolendry siewnej (*Coriandrum L.*). Uprawy zostały przeprowadzone w kontrolowanych warunkach środowiskowych w tzw. komorach fitotronowych. Temperaturę ustalono na  $24\pm 1$  °C w dzień i  $20\pm 1$ °C w nocy,

wilgotność na  $70 \pm 5\%$ , zastosowano fotoperiod 16h dzień i 8h noc [55]. Do oświetlania roślin przygotowano dedykowane moduły oświetleniowe (lampy) o sześciu różnych widmach światła. Widmo oświetlenia było stałe w czasie, zarówno w ciągu dnia jak i w kolejnych dniach uprawy. Wybrane parametry zastosowanych w uprawie testowej modułów lamp zostały zamieszczone w Tabeli 1, a ich charakterystyki widmowe zaprezentowane na Rys. 1.



Rys.1. Charakterystyki widmowe modułów lamp zastosowanych w uprawie testowej

Widma poszczególnych lamp zostały dobrane w oparciu o obszerną literaturę [12, 51, 52]. Widmo lampy 1 to połączenie LED niebieskich i czerwonych, w proporcji R:B = 2,5. Zastosowano po dwie długości fali dla niebieskiego i czerwonego, aby lepiej pokryć całe pasmo absorpcji chlorofilu a i chlorofilu b. Widmo lampy 2 to klasyczne połączenie światła niebieskiego i czerwonego w proporcji R:B=2,5. W lampie 3 dodano niewielką składową zieloną (LED biały), przy zachowaniu proporcji R:B = 2,5. W lampie 4 zastosowano szerokopasmowe widmo w zakresie niebieskiego z dodatkową składową UV. Zmieniło to jednocześnie proporcje R:B = 1. W lampie 5, w porównaniu do lampy 2, zastosowano dodatkową składową UV oraz

FR. Dla tej lampy R:B = 1. Ostatnia lampa (lampa 6) bazuje na widmie jednej z komercyjnie dostępnych lamp przeznaczonych do uprawy roślin.

Przeprowadzone zostały dwie uprawy testowe. Rośliny były uprawiane w doniczkach 8x8x8 cm (po 5 roślin w każdej), przy czym doniczki były dodatkowo umieszczone na tackach (2x3 doniczki). Dodatkowo, w okresie przeprowadzania uprawy zmieniano położenie tacek w komorze fitotronowej oraz samych doniczek w tackach w celu minimalizacji zależności wyników od położenia roślin w komorze fitotronowej (tzw. randomizacja). Obie uprawy trwały 21 dni, licząc od momentu kiełkowania do momentu zbioru próbek. Wysiew nastąpił od 7 do 10 dni wcześniej, w zależności od gatunku użytych roślin.

W pierwszej uprawie testowej badany był wpływ widma światła na wybrane gatunki roślin. Wykorzystano zatem sześć modułów oświetlenia, każdy o jednym z przygotowanych widm światła, umieszczonych w osobnych komorach fitotronowych. Dla umożliwienia analizy porównawczej, wszystkie moduły oświetleniowe ustawiono wstępnie na taką samą wartość PPFD równą  $150 \mu\text{mol} / \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ . Celem doboru oświetlenia była maksymalizacja plonu (ocena ilościowa) przy jednoczesnym nie pogorszeniu parametrów jakościowych. Do oceny ilościowej wybrany został tzw. uzysk masy suchej (ang. dry mass yield). Pomiary zostały przeprowadzone przy wykorzystaniu wago-suszarki technicznej BST 110 (AXIS, Polska). Ocena jakościowa zależy w znacznym stopniu od gatunku rośliny. Badanych może być szereg substancji, np. zawartość oleju mentolowego, flawonoidów, antocyjanów, a także oceniane parametry zewnętrzne, jak wygląd, zapach czy smak. Dla badanych gatunków zdecydowano się na pomiar zawartości chlorofilu. Parametr ten dla roślin zielonych może być wyznacznikiem ogólnej kondycji roślin (parametr jakościowy). Pomierzony został tzw. Wskaźnik Zawartości Chlorofilu CCI (Chlorophyll Content Index), a pomiarów dokonano za pomocą chlorofilomierza CCM-200 Plus (Opti-Sciences, USA).

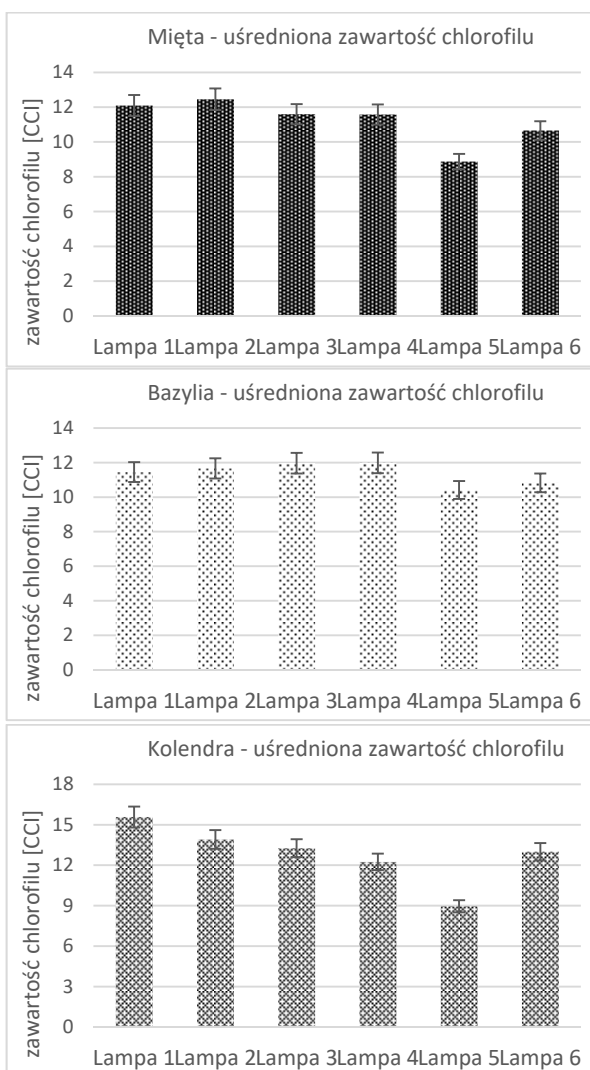
W drugiej uprawie testowej przebadano wpływ położenia modułu oświetleniowego na pobieraną energię elektryczną. W farmach wertykalnych moduły oświetleniowe montowane są zazwyczaj na stałej wysokości kilkudziesięciu cm nad powierzchnią uprawy [53]. Powoduje to, że system oświetleniowy jest w miarę nieskomplikowany, a także daje dość dobry dostęp do uprawy obsłudze farmy. Jednakże, w czasie gdy rośliny są jeszcze małe, można by uzyskać znaczne oszczędności energii, obniżając wysokość lampy nad uprawą, przy utrzymaniu tej samej ilości światła (gęstości strumienia, PPFD). Badania przeprowadzono w dwóch komorach fitotronowych. W pierwszej ustawiono moduł oświetleniowy na stałej, znacznej wysokości (pomiar referencyjny). W drugiej komorze ustawiono moduł oświetleniowy na niewielkiej wysokości w momencie kiełkowania roślin, a następnie w miarę wzrostu roślin podnoszono moduł oświetlenia na większą wysokość. Ze względów technicznych (możliwości mocowania modułu oświetleniowego), możliwe były następujące wysokości: 15 cm, 20,5 cm, 26 cm oraz 41,5 cm (wysokość referencyjna). Podane wysokości odnoszą się do wysokości odpowiednich półek, wysokość nad powierzchnią ziemi była ok. 7 cm mniejsza (wysokość ziemi w doniczkach) i wynosiła odpowiednio: 8 cm, 13,5 cm, 19 cm, 34,5 cm. Dla tej uprawy badania zostały przeprowadzone jedynie dla widma Lampy 2. Analogicznie, warunkiem celowości zmiany wysokości modułu jest nie pogorszenie się parametrów ilościowych i jakościowych uprawianej rośliny, dlatego też dla tej uprawy również weryfikowany był uzysk masy suchej i zawartość chlorofilu.

Dla przeprowadzonych upraw testowych pomierzone zostały także parametry energetyczne, dotyczące zarówno energii promieniowania, jak i pobieranej energii elektrycznej.

### Rezultaty i dyskusja

Na zakończenie każdej z upraw testowych dokonano zbiorów oraz odpowiednich pomiarów. Przeprowadzone zostały po dwa niezależne powtórzenia dla każdej z upraw, każde trwające 21 dni, licząc od kiełkowania do zbiorów roślin.

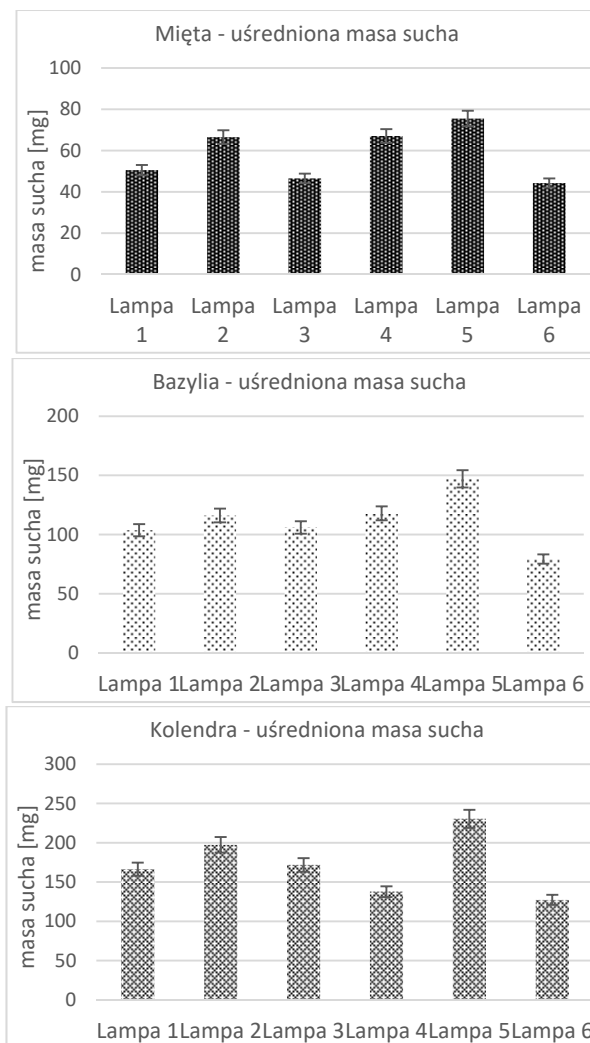
W pierwszej kolejności dokonano pomiarów dla pierwszej uprawy testowej, dotyczącej badania wpływu widma na wybrane własności roślin. 21 dnia uprawy, ale jeszcze przed właściwym zbiorem roślin, dokonano pomiarów zawartości chlorofilu w liściach. Łącznie zmierzono 20 różnych liści (20 punktów pomiarowych) dla każdego badanego gatunku oraz w ramach każdego powtórzenia uprawy. Tak uzyskane wyniki zostały następnie uśrednione dla obu powtórzeń, w ramach danego gatunku i danej lampy i przedstawione na Rys. 2.



Rys.2. Uśredniona zawartość chlorofilu dla badanych gatunków ziół dla wszystkich lamp w pierwszej uprawie testowej

Po dokonaniu pomiarów zawartości chlorofilu dokonano właściwego zbioru. Rośliny zostały wstępnie ususzone, następnie dokonano właściwego suszenia za pomocą wagosuszarki, aż do uzyskania wilgotności poniżej 1%. Ze względu na różną ilość roślin w poszczególnych komorach,

wynikającą z nierównomiernego kiełkowania, do suszenia wybranych zostało po kilka roślin z każdego powtórzenia uprawy. Uzyskana sumaryczna masa sucha (dla dwóch powtórzeń uprawy) została następnie znormalizowana względem ilości roślin podlegających suszeniu. Wyniki pomiaru masy suchej, przypadającej na jedną roślinę, zaprezentowano na Rys.3.



Rys.3. Uśredniona masa sucha dla badanych gatunków ziół dla wszystkich lamp w pierwszej uprawie testowej

Największy uzysk masy suchej dla wszystkich badanych gatunków ziół uzyskano dla Lampy 5, a najmniejszy dla Lampy 6. Różnice są dość znaczące i sięgają 40%. Lampa 5 wykorzystuje światło niebieskie (450 nm) i czerwone (660 nm) oraz dodatkowo promieniowanie w zakresie UV oraz FR. Wynika z tego, że obecność któregoś z dodatkowych składowych promieniowania istotnie wpływa na przyrost masy suchej. Z kolei widmo Lampy 6 zawiera istotną składową światła zielonego, które ma mniejszy udział w procesie fotosyntezy roślin. Warto także zauważyć, że drugi w kolejności uzysk masy suchej, również potwierdzony dla wszystkich badanych gatunków, otrzymano dla Lampy 2, wykorzystujących jedynie promieniowanie niebieskie i czerwone. Z kolei dla Lampy 4 wyniki są niejednoznaczne – uzyskano dobry uzysk masy suchej dla bazylii i mięty (porównywalny z uzyskiem dla lampy 2), podczas gdy dla kolendry uzysk ten jest dość mały, nieco tylko większy od minimum, uzyskanego dla Lampy 6.

Bardzo interesująca w tej sytuacji jest analiza porównawcza zawartości chlorofilu. Dla Lampy 5 (największy uzysk masy suchej), zawartość chlorofilu jest najmniejsza. Prawidłowość ta została potwierdzona także przez obserwacje, zauważalna jest wyraźnie mniej intensywna zieleń dla roślin uprawianych pod lampą 5. Dla pozostałych lamp zawartość chlorofilu jest na większym poziomie, przy czym występują pewne różnice zawartości chlorofilu w zależności od gatunku. Biorąc pod uwagę zarówno uzysk masy suchej, jak i zawartość chlorofilu, za najlepszą można uznać Lampę 2 lub Lampę 4, w zależności od gatunku.

W trakcie trwania uprawy powtórnie pomierzono wartości PPFd dla każdej lampy, jak również natężenie promieniowania (mierzonego radiometrycznie) w zakresie PAR oraz w całym zakresie promieniowania (RAD). Wyniki dla każdej lampy przedstawiono w Tabeli 2. Zamieszczono w niej także pomierzoną całkowitą moc elektryczną pobieraną przez daną lampę, oraz wyznaczone wartości skuteczności zamiany energii elektrycznej na optyczną, czy stosunek intensywności oświetlenia PPFd/RAD.

Tabela 2. Pomierzone i wyznaczone parametry optyczne oraz elektryczne zastosowanych modułów oświetleniowych

Lampa / Parametr	1	2	3	4	5	6
PPFD [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$ ]	148,8	148,7	148,5	149,8	148,8	148,1
RAD [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]	30,8	30,6	30,9	42,8	54	31,8
PAR [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]	25,6	26,3	24,7	26,9	27,2	20,6
$P_{\text{EL}}$ [W]	16,5	16,8	15,3	19,8	28,5	18
PPFD / $P_{\text{EL}}$ [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s}*\text{W})$ ]	9	8,9	9,7	7,6	5,2	8,2
PPFD / RAD [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s}*\text{W})$ ]	4,8	4,9	4,8	3,5	2,8	4,7
RAD / $P_{\text{EL}}$ [W/W]	1,9	1,8	2	2,2	1,9	1,8
PAR / $P_{\text{EL}}$ [W/W]	1,5	1,6	1,6	1,4	1	1,1

Uzyskano bardzo dobrą stabilność oświetlenia wyrażoną jako PPFd (wartością ustawianą było 150  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$  dla każdej lampy). Wartości w zakresie PAR są również zbliżone, poza wartościami dla Lampy 6, której widmo zdecydowanie różni się od pozostałych. Wyraźne różnice pojawiają się w przypadku pomiarów radiometrycznych w całym zakresie. Wyróżniają się tu Lampy 4 oraz 5, mające dodatkową składową UV (Lampa 4) oraz UV+FR (Lampa 5). Te dodatkowe składowe powodują także istotny wzrost pobieranej energii elektrycznej.

Parametr RAD /  $P_{\text{EL}}$ , obrazujący skuteczność zamiany energii elektrycznej na optyczną, wykazuje niewielką zmienność i może być uznany za w przybliżeniu stały. Natomiast skuteczność w odniesieniu do parametrów PPFd oraz PAR wykazuje już wyraźne minimum dla lamp o poszerzonej (wykraczającej poza zakres PAR-400-700 nm) charakterystyce widmowej,

Przedstawione powyżej obliczenia i rozważania pokazują wyraźnie niedoskonałość parametru PPF / PPFd do charakteryzacji intensywności oświetlenia do uprawy roślin, w szczególności w sytuacji poszerzonego widma promieniowania lampy. Pojawia się jednak pytanie, w jaki sposób zwiększony pobór mocy elektrycznej modułu

oświetleniowego przekłada się na parametry użytkowe roślin, co ma istotne znaczenie ekonomiczne.

Dla oceny tego aspektu wyznaczony został parametr określający uzysk jednostkowy masy suchej przypadający na jednostkę pobieranej mocy elektrycznej przez moduł oświetleniowy. Parametr ten jest właściwy jedynie dla badań porównawczych, gdy pozostałe parametry upraw (czas uprawy, fotoperiod) są takie same. Wyniki dla każdego z uprawianych gatunków roślin zamieszczono w Tabeli 3.

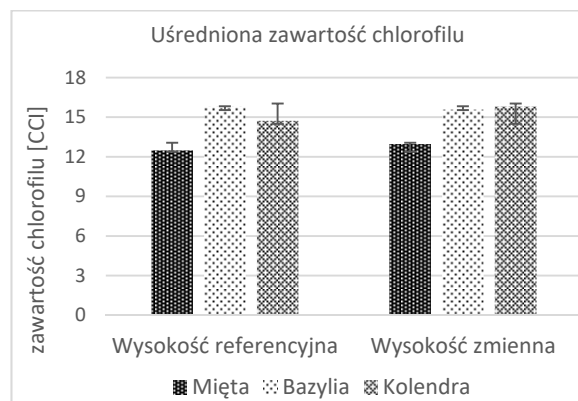
Tabela 3. Uzysk jednostkowy masy suchej przypadający na jednostkę pobieranej mocy elektrycznej

Lampa / masa/moc [mg/W]	1	2	3	4	5	6
Mięta	3,1	4,0	3,0	3,4	2,6	2,5
Bazylija	6,3	6,9	6,9	6,0	5,2	4,4
Kolendra	10,1	11,7	11,2	7,0	8,1	7,1

Analizując dane z Tabeli 3 widać, że Lampa 5, dla której uzyskano największy bezwzględny uzysk masy suchej dla wszystkich badanych gatunków ziół (Rys.3), nie jest najlepszym wyborem pod względem energetycznym spośród dostępnych w doświadczeniu lamp. Dla tej lampy uzysk jednostkowy masy suchej znajduje się na poziomie jedynie 65-75% najwyższego osiągniętego uzysku jednostkowego (zaznaczonego w Tabeli 3 kolorem szarym). Znamienne jest, że dla wszystkich badanych gatunków ziół maksymalny uzysk osiągnięto dla tej samej lampy (Lampa 2), a dla Bazylia dodatkowo dla Lampy 3. Bardzo istotne jest także, że dla tej lampy uzyskano jedne z największych zawartości chlorofilu w liściach uprawianych gatunków ziół. Również Lampa 3 mogłaby być atrakcyjnym wyborem dla uprawy bazylia, z uwagi na dobrą zawartość chlorofilu.

W ramach drugiej uprawy testowej badano wpływ wysokości modułu oświetleniowego nad powierzchnią uprawy na sumaryczną pobraną energię elektryczną. Założeniem badania było utrzymanie takiej samej ilości światła w płaszczyźnie uprawy niezależnie od wysokości zamontowania modułu oświetlenia. Pomiarów chlorofilu, właściwego zbioru oraz pomiarów uzysku masy suchej, przypadającej na jedną roślinę, dokonano analogicznie jak dla pierwszej uprawy testowej.

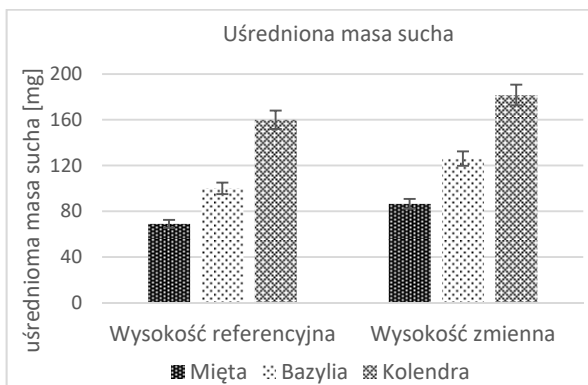
Badanie zawartości chlorofilu nie wykazało istotnych różnic pomiędzy uprawą referencyjną, a uprawą prowadzoną przy zmianach wysokości położenia modułu oświetlenia (Rys.4).



Rys.4. Uśredniona zawartość chlorofilu dla badanych gatunków ziół dla drugiej uprawy testowej

Różnice te nie przekraczają kilku procent i są zwykle na korzyść uprawy ze zmienną wysokością modułu. Uzyskano więc zbiory o porównywalnej jakości.

Bardzo interesująco przedstawiają się wyniki pomiaru uzyskanej masy suchej. Dla wszystkich badanych gatunków roślin uzyskano większą masę suchą dla uprawy ze zmienną wysokością modułu oświetlenia niż dla uprawy referencyjnej (Rys. 5).



Rys.5. Uśredniona masa sucha dla badanych gatunków ziół dla drugiej uprawy testowej.

Obserwowany większy przyrost masy dla uprawy ze zmienną wysokością modułu oświetlenia może wydawać się trochę zaskakujący. Należy jednak wziąć pod uwagę sposób wyznaczania poziomu oświetlenia. Jest on ustalany dla powierzchni uprawy (powierzchni ziemi w doniczkach). W miarę wzrostu roślin poziom oświetlenia dla górnych części roślin staje się coraz większy. Efekt ten będzie silniejszy dla mniejszej wysokości modułu oświetleniowego nad powierzchnią uprawy, co może być wytłumaczeniem większego otrzymanego plonu (większego uzysku masy suchej).

Najbardziej istotnym aspektem uprawy drugiej była analiza możliwości zmniejszenia zużycia energii elektrycznej związanej ze zmienną wysokością modułu oświetleniowego nad powierzchnią uprawy. W tym celu, dla każdej wysokości umieszczenia modułu oświetleniowego, pomierzone zostały parametry optyczne i elektryczne.

Tabela 4. Zmierzone wyznaczone parametry optyczne oraz elektryczne dla modułu w zależności od wysokości montażu

Oznaczenie wysokości	Wysokość referencyjna	Wysokość zmienna			
	Ref (max)	0	1	2	Ref (max)
Wysokość [cm]	34,5	8	13,5	19	34,5
PPFD [ $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ]	~ 150	~ 150	~ 150	~ 150	~ 150
$P_{EL}$ [W]	22,2	13,1	15,1	16,4	22,2
En./dzień [kWh/dzień]	0,356	0,210	0,239	0,263	0,356
Ustawienie w dniach	1-21	1-7	8-14	15-21	-----
En. [kWh]	7,468	1,473	1,673	1,842	-----
Suma En. [kWh]	<b>7,47</b>	<b>4,99</b>			

W komorze referencyjnej moduł oświetleniowy ustawiony był na maksymalnej wysokości przez wszystkie 21 dni trwania uprawy. W drugiej komorze wysokość modułu oświetleniowego była zmieniana wraz ze wzrostem roślin. Wykorzystane zostały trzy kolejne położenia (wysokości) modułu, w każdym z nich moduł oświetleniowy był umieszczony przez 7 dni. Wzrost roślin nie okazał się na tyle duży, aby zachodziła konieczność umieszczenia modułu na wysokości maksymalnej.

Wyznaczone całkowite zużycie energii elektrycznej dla zmiennej wysokości modułu oświetleniowego jest ok. 33% mniejsze, niż dla referencyjnej stałej wysokości. Dodatkowo, uzyskano większy plon (masę suchą), przy porównywalnej jakości (zawartość chlorofilu). Możliwe wydaje się takie dostosowanie wystrojenia modułu oświetleniowego (zmniejszenie intensywności oświetlenia w miarę wzrostu roślin), aby uzyskiwany plon był porównywalny. Skutkowałoby to jeszcze większym zmniejszeniem pobieranej energii elektrycznej. Reasumując, uzyskane wyniki wskazują na możliwość znacznych oszczędności energii elektrycznej w przypadku dostosowywania wysokości modułu oświetleniowego do wysokości roślin.

Warto zwrócić uwagę, że dla zachowania porównywalnych warunków środowiskowych wszystkich upraw, odbywają się one w komorach fitotronowych, a więc w relatywnie niewielkiej zamkniętej przestrzeni. Intensywność oświetlenia (PPFD) zależy nie tylko od światła padającego bezpośrednio na powierzchnię uprawy, ale także od światła odbitego od ścian. Z tego względu nie jest zachowana kwadratowa zależność ilości emitowanego światła od kwadratu odległości modułu oświetlenia od powierzchni uprawy. Rzeczywista zależność nie jest aż tak silna, pomimo tego pozwala jednak na znaczne oszczędności energii elektrycznej.

## Podsumowanie

Ocena aspektów energetycznych oświetlenia, które jest stosowane do uprawy roślin jest zadaniem złożonym. Przeprowadzony został zatem dość obszerny program badawczy, mający na celu analizę efektywności oświetlenia do uprawy roślin pod względem możliwości oszczędzania energii elektrycznej. Badania przeprowadzone zostały w oparciu o doświadczalne uprawy dla kilku popularnych gatunków ziół: mięty, bazylii i kolendry.

Uzyskane wyniki pomiarów potwierdziły zależność otrzymywanych plonów (masa sucha) oraz kondycji rośliny (zawartość chlorofilu) od charakterystyki widmowej zastosowanego oświetlenia. Wykazały, że stosowany często parametr PPFD jest mocno dyskusyjny w przypadku porównywania oświetlenia o różnych charakterystykach widmowych, zawierających komponenty promieniowania ultrafioletowego i dalekiej czerwieni. Parametr ten jest także nieodpowiedni do oceny energetycznej sprawności modułów oświetlenia. Zaproponowany i wyznaczony został parametr: uzysk masy/pobierana moc elektryczna do oceny efektywności energetycznej. Wyniki pokazały, że moduły oświetleniowe, dla których otrzymano największy uzysk masy, nie wykazują największej efektywności energetycznej. Należy przy tym zwrócić uwagę, że aspekt energetyczny przekłada się na aspekt ekonomiczny jedynie częściowo. Analiza ekonomiczna uwzględnia nie tylko koszty energii elektrycznej, ale także koszty samych lamp, koszty budowy i eksploatacji farmy wertykalnej, koszty obsługi itp. Od plantatora zależy zatem będzie, czy priorytetem będzie uzyskanie maksymalnego bezwzględnego plonu, czy maksymalizacja parametru uzysk masy/moc elektryczna.

W pracy wykazano także, że dostosowanie wysokości modułu oświetleniowego nad powierzchnią uprawy do fazy wzrostu roślin może również dać bardzo duże oszczędności energii elektrycznej. W przeprowadzonej uprawie testowej wykorzystano skokowy, ręczny mechanizm zmian wysokości modułu oświetleniowego. Jednakże, zmiana wysokości mogłaby docelowo odbywać się w sposób bardziej zautomatyzowany, co z jednej strony byłoby bardzo wygodne, a z drugiej pozwoliłoby na bieżąco reagować na stadium rozwoju roślin.

Podsumowując, w optymalizacji oświetlenia do uprawy roślin muszą być zatem wzięte pod uwagę zarówno potrzeby roślin w zakresie odpowiedniego widma, jak i aspekty techniczno-energetyczne, związane z poborem energii, sposobem montażu czy sterowania. Uwzględnienie wszystkich tych czynników przyczyni się do uzyskania dobrych plonów przy jednoczesnej oszczędności energii.

*Prace były prowadzone w ramach projektu badawczego Współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu operacyjnego „Inteligentny Rozwój 2014-2020”. Realizowanego przez firmę NIVISS Leszek Łosin Sp. J., pod tytułem „Rodzina liniowych opraw oświetleniowych niPlants przeznaczonych do uprawy roślin z możliwością aktywnej stabilizacji PPFd i automatycznego dopasowania oświetlanego obszaru do wielkości roślin” oraz częściowo w ramach działalności statutowej (DS) Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej.*

**Autorzy:** dr inż. Adam Mazikowski, Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Katedra Metrologii i Optoelektroniki, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, Email: 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 Leszek Łosin Sp. J. ul. Kopernika 56, 81-411 Gdynia, E-mail: mf@niviss.com.

## LITERATURA

- [1] Van Gerrewey, T., Boon, N., Geelen, D. Vertical Farming: The Only Way Is Up? *Agronomy*, 12(1):2, (2022)
- [2] Nájera, C., Gallegos-Cedillo, V.M., Ros, M., Pascual J.A. Role of Spectrum-Light on Productivity, and Plant Quality over Vertical Farming Systems: Bibliometric Analysis. *Horticulturae*, 9(63), (2023)
- [3] Kozai, T., Niu, G. Chapter 2 - Role of the plant factory with artificial lighting (PFAL) in urban areas. In *Plant Factory*, 2<sup>nd</sup> Ed., Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2020, 7-34
- [4] Arabzadeh Y., Miettinen, P., Kotilainen, T., Herranen P., Karakoc, A., Kumm M., Rautkari, L. Urban vertical farming with a large wind power share and optimized electricity costs. *Applied Energy*, 331:120416, (2023), 77-91
- [5] Butturini M., Marcellis L. F.M., Chapter 3 - Vertical farming in Europe: present status and outlook In *Plant Factory* 2<sup>nd</sup> Ed., Elsevier Inc., San Diego, Waltham, USA, (2020)
- [6] BBC News, Tesco and Aldi limit sales of tomatoes, peppers and cucumbers. <https://www.bbc.com/news/business-64729317> (dostęp 07-03-2023)
- [7] Pattison, P.M., Tsao, J.Y., Brainard, G.C., BugBee, B., LEDs for photons, physiology and food. *Nature* 563, (2018), 493–500
- [8] Metallo, R.M., Kopsell, D.A., Sams, C.E., Bumgarner, N.R. Influence of blue/red vs. white LED light treatments on biomass, morphology, and quality parameters of hydroponically grown kale, *Scientia Horticulturae*, 235, (2018), 189-197
- [9] AsiaFarming, Vertical Tomato farming-modern way of getting more yields in less space. 2022. <https://www.asiafarming.com/vertical-tomato-farming-modern-way-of-getting-more-yields-in-less-space> (dostęp 17.03.2023).
- [10] Rihan, H.Z., Aljafer, N., Jbara, M., McCallum, L., Lengger, S., Fuller, M.P. The Impact of LED Lighting Spectra in a Plant Factory on the Growth, Physiological Traits and Essential Oil Content of Lemon Balm (*Melissa officinalis*). *Plants* 11(3):342, (2022)
- [11] Rihan, H.Z., Aldarkazali, M., Mohamed, S.J., McMulkin, N.B., Jbara, M.H., Fuller, M.P. A Novel New Light Recipe Significantly Increases the Growth and Yield of Sweet Basil (*Ocimum basilicum*) Grown in Plant Factory System. *Agronomy*, 10(7):934 (2020)
- [12] Feldzensztajn, M., Wierzbza, P., Mazikowski, A. Examination of Spectral Properties of Medicinal Plant Leaves Grown in Different Lighting Conditions Based on Mint Cultivation, *MDPI Sensors*, 21:4122, (2021)
- [13] Kusuma, P., Ouzounis, T., Hawley, D., Kerstens, T., Marcellis L.F.M., Heuvelink E., On the pros and cons of red photons for greenhouse tomato production: increasing the percentage of red photons improves LED efficacy but plant responses are cultivar-specific, *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2022
- [14] SharathKumar, M., Heuvelink, E., and Marcellis, L. F. M. Vertical farming: moving from genetic to environmental modification. *Trends in Plant Science*, 25(8), (2020). doi:10.1016/j.tplants.2020.05.012
- [15] Thoma, F., Somborn-Schulz, A., Schlehuber, D., Keuter, V., Görgge Deerberg, G. Effects of Light on Secondary Metabolites in Selected Leafy Greens: A Review. *Frontiers in Plant Science*, 11:457, (2020)
- [16] Paucek I., Appolloni E., Pennisi G., Quaini S., Gianquinto, G., Orsini, F. LED Lighting Systems for Horticulture: Business Growth and Global Distribution. *Sustainability*, 12:7516, (2020)
- [17] Kulus, D., Woźny, A. Influence of light conditions on the morphogenetic and biochemical response of selected ornamental plant species under in vitro conditions: a mini-review, *BioTechnologia* 101(1), (2020), 75-84
- [18] Dutta Gupta, S., Agarwal, A. Chapter 1 - Artificial Lighting System for Plant Growth and Development: Chronological Advancement, Working Principles, and Comparative Assessment. In: Dutta Gupta, S. (eds) *Light Emitting Diodes for Agriculture*, Springer, Singapore, (2017)
- [19] M., Mazikowski, A., Cegielski T. Analiza efektywności systemów oświetlania roślin na przykładzie uprawy bazylii, *Przegląd Elektrotechniczny*, 10(7), 2019
- [20] Bugbee, B. Chapter 5 - Economics of LED Lighting. In: Dutta Gupta, S. (eds) *Light Emitting Diodes for Agriculture*, Springer, Singapore, 2017. doi:10.1007/978-981-10-5807-3\_5
- [21] Alrajhi, A.A., Alsahli, A.S., Alhelal, I.M., Rihan, H.Z., Fuller, M.P., Alsadon, A.A., Ibrahim, A.A. The Effect of LED Light Spectra on the Growth, Yield and Nutritional Value of Red and Green Lettuce (*Lactuca sativa*). *Plants* 12(3): 463, (2023)
- [22] Nelson, J.A., Bugbee, B. Economic Analysis of Greenhouse Lighting: Light Emitting Diodes vs. High Intensity Discharge Fixtures, *PLoS ONE*, 9(6), (2014)
- [23] Mikołajczyk, M., Mikołajczyk, A. Wpływ różnych strumieni świetlnych pochodzących z lamp halogenowych i ledowych na intensywność fotosyntezy w obecności kwasu askorbinowego. *Przegląd Elektrotechniczny*, 97(9), 2021, 21-25
- [24] A. Mazikowski and M. Feldzensztajn, Design and development of lamp of adjustable spectrum, *Photon.Lett.PL*, 14(1), (2022), 13-15
- [25] Singh D., Basu C., Meinhardt-Wollweber M., Roth B. LEDs for energy efficient greenhouse lighting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, (2015), 139-147
- [26] Kusuma, P., Pattison, P. M., and Bugbee, B. From physics to food: current and potential LED efficacy. *Hortic. Res.* 7:56, (2020)
- [27] Rahman, M.M., Vasiliev, M., Alameh, K. LED Illumination Spectrum Manipulation for Increasing the Yield of Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.). *Plants*, 10:344 (2021)
- [28] Carvalho, S.D., Schwieterman, M.L., Abrahan, C.E., Colquhoun, T.A., Folta, K.M. Light quality dependent changes in morphology, antioxidant capacity, and volatile production in sweet basil (*Ocimum basilicum*). *Front. Plant Sci.*, 7:1328, (2016)
- [29] Faline, D.M., Plantenga, S.W., Bergonzi, C., Bachem, W.B. High light accelerates potato flowering independently of the FT-like flowering signal StSP3D. *Environ. Exp. Bot.* 160, (2019), 35-44
- [30] Christiaensac, A., Gobina, B., Huylenbroeckb, J.V. Adventitious rooting of Chrysanthemum is stimulated by a low-red:far-red ratio. *J. Plant Physiol.* 236, (2019), 117-123

- [31] Galvão, V., Fankhauser, C. Sensing the light environment in plants: photoreceptors and early signaling steps. *Curr. Opin. Neurobiol.* 34, (2015) 46-53
- [32] Meng, M., Runkle, E.S. Growth Responses of Red-Leaf Lettuce to Temporal Spectral Changes. *Front. Plant Sci.*, 11:1623, (2020)
- [33] Ohtake, N., Ishikura, M., Suzuki, H., Yamori, W., Goto, E. Continuous Irradiation with Alternating Red and Blue Light Enhances Plant Growth While Keeping Nutritional Quality in Lettuce. *Hort. Sci.*, 53(12), (2018), 1804-1810
- [34] Yahia, I.B.H., Jaouadi, R., Trimech, R., Boussaid, M., Zaouali, Y. Variation of chemical composition and antioxidant activity of essential oils of *Mentha x rotundifolia* (L.) Huds. (Lamiaceae) collected from different bioclimatic areas of Tunisia. *Biochem. Syst. Ecol.* 84, (2019) 8-16
- [35] Magagnini, G., Grassi, G., Kotiranta, S. The Effect of Light Spectrum on the Morphology and Cannabinoid Content of *Cannabis sativa* L. *Med. Cannabis Cannabinoids*, 1, (2018) 19-27
- [36] Hosseini, A., Mehrjerdi, M.Z., Aliniaefard, S., Seif, M. Photosynthetic and growth responses of green and purple basil plants under different spectral composition, *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 25, (2019)
- [37] Dou, H., Niu, G., Gu, M. Photosynthesis, Morphology, Yield, and Phytochemical Accumulation in Basil Plants Influenced by Substituting Green Light for Partial Red and/or Blue Light. *Hort. Science*, 54(10), (2019) 1769-1776
- [38] Wai, T.S., Chaichana, C., Maruyama, N. Energy cost analysis of growing strawberries in a controlled environment chamber, *Energy Reports*, 9(1), (2023), 677-687
- [39] Ustawa o szczególnych rozwiązaniach służących ochronie odbiorców energii elektrycznej w 2023 roku w związku z sytuacją na rynku energii elektrycznej, Art. 37, Dz.U. 2022 poz. 2127, 2022.
- [40] J. Yan, H. Liu, W. Zhao, Y. Su, Photon flux calibration of LED in horticulture lighting, *Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications IX, Proc. SPIE*, 12319, (2022)
- [41] MacCree, K.J. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agric. Meteorol.*, 10, (1972) 443-453
- [42] Son, K., & Oh, M. Leaf Shape, Growth, and Antioxidant Phenolic Compounds of Two Lettuce Cultivars Grown under Various Combinations of Blue and Red Light-emitting Diodes, *HortScience*, 48(8), (2013) 988-995
- [43] Pennisi, G., Orsini, F., Blasioli, S. et al. Resource use efficiency of indoor lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivation as affected by red:blue ratio provided by LED lighting. *Sci Rep*, 9:14127, (2019)
- [44] Razzak, Md.A., Asaduzzaman, Md., Tanaka, H. Asao, T. Effects of supplementing green light to red and blue light on the growth and yield of lettuce in plant factories, *Scientia Horticulturae*, 305: 111429, (2022)
- [45] Cammarisano, L., Donnison, I.S., Robson, P.R.H. The Effect of Red & Blue Rich LEDs vs Fluorescent Light on Lollo Rosso Lettuce Morphology and Physiology. *Front. Plant Sci.*, 12:603411, (2021)
- [46] Shimizu, H. Saito, Y., Nakashima, H., Miyasaka, Y., Ohdoi, K. Light Environment Optimization for Lettuce Growth in Plant Factory, *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1), (2011) 605-609
- [47] Zhen, S., van Iersel, M., Bugbee, B. Why Far-Red Photons Should Be Included in the Definition of Photosynthetic Photons and the Measurement of Horticultural Fixture Efficacy. *Frontiers in Plant Science*, 12, (2021)
- [48] Zhen S., Bugbee B. Substituting Far-Red for Traditionally Defined Photosynthetic Photons Results in Equal Canopy Quantum Yield for CO<sub>2</sub> Fixation and Increased Photon Capture During Long-Term Studies: Implications for Re-Defining PAR. *Frontiers in Plant Science*, 11, (2020)
- [49] Kusuma, P., Fatzinger, B., Bugbee, B., Soer, W., Wheeler, R. LEDs for Extraterrestrial Agriculture: Tradeoffs between Color Perception and Photon Efficacy. Raport NASA/TM-20210016720, (2021)
- [50] Fryc, I., Fryc, J., Jakubowski, P., Wąsowski, A.K. Techniczne aspekty bezpieczeństwa fotobiologicznego źródeł światła, stosowanych do użytku domowego, z uwzględnieniem zagadnień medyczno-prawnych. *Przegląd Elektrotechniczny*, 93(3), (2017) 232-237
- [51] [1] Larsen, D.H., Woltering, E.J., Nicole, C.C.S., Marcelis, L.M.F. Response of Basil Growth and Morphology to Light Intensity and Spectrum in a Vertical Farm. *Frontiers in Plant Science*, 11, (2020)
- [52] Gao, Q., Liao, Q., Li, Q., Yang, Q., Wang, F., Li, J. Effects of LED Red and Blue Light Component on Growth and Photosynthetic Characteristics of Coriander in Plant Factory. *Horticulturae*, 8(12):1165, (2022)
- [53] D.D., Xydis, G. Chapter One - How energy innovation in indoor vertical farming can improve food security, sustainability, and food safety?, Editor(s): Marc J. Cohen, *Advances in Food Security and Sustainability*, Elsevier, 5, (2020), 1-51
- [54] Kelly, N., Choe, D., Meng, Q., Runkle, E.S. Promotion of lettuce growth under an increasing daily light integral depends on the combination of the photosynthetic photon flux density and photoperiod. *Scientia Horticulturae*, 272:109565, (2020)
- [55] Avgoustaki, D.D. Optimization of Photoperiod and Quality Assessment of Basil Plants Grown in a Small-Scale Indoor Cultivation System for Reduction of Energy Demand. *Energies*, 12:3980, (2019)