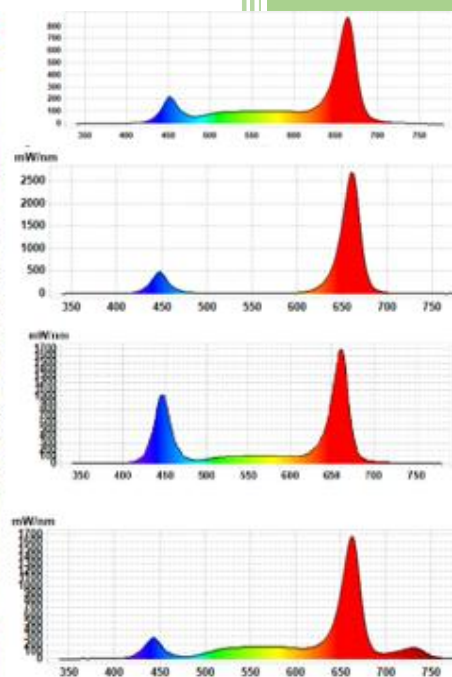




Innowacje w optymalizacji produkcji rukoli, sałaty, sadzonek i truskawek na zamkniętych obszarach



Umola Sp. z o. o., Łukasz Czech
Agrowe, Gospodarstwo Rolne Dariusz
Pawlak, Szkoła Główna
Gospodarstwa Wiejskiego w
Warszawie, firma Profesor Ziółko
Grzegorz Skrobisz



Spis treści

1. WSTĘP	4
1.1. WPLYW PLANOWANEJ OPERACJI	9
2. CEL I ZAKRES PROJEKTU	10
2.1. CELE SZCZEGÓŁOWE	11
3. ORGANIZACJA PROJEKTU.....	13
3.1. KONSORCJANCI	13
3.2. PROWADZENIE BADAŃ.....	15
3.2.1. <i>Doświadczenia w uprawach zamkniętych</i>	15
3.2.2. <i>Doświadczenia polowe</i>	23
3.3. INNOWACYJNY SYSTEM OŚWIETLENIA LED DO WSPOMAGANIA WZROSTU ROŚLIN WYTWORZONY W RAMACH PROJEKTU	24
4. METODYKA BADAŃ	31
4.1. ANALIZA PROCESU FOTOSYNTETY PRZY ODPOWIEDNIM OŚWIETLENIU LED	31
4.2. ANALIZA WPLYWU ŚWIATŁA LED NA POBIERANIE SKŁADNIKÓW POKARMOWYCH.....	32
4.3. BADANIE WPLYWU ŚWIATŁA LED NA DŁUGOŚĆ WZROSTU ROŚLIN	34
4.4. BADANIE WPLYWU ŚWIATŁA LED NA WŁAŚCIWOŚCI ROŚLINY	35
4.5. BADANIE WPLYWU ŚWIATŁA LED NA TEMPO ROZWOJU ROŚLIN	37
4.6. ANALIZA WPLYWU ODPOWIEDNIEGO OŚWIETLENIA LED NA EKONOMIĘ UPRAWY.....	39
4.7. BADANIE ZASOBNOŚCI GLEBY, SUBSTRATU UPRAWOWEGO, POŻYWKI NAWOZOWEJ, ORAZ PRZELEWU (WYCIEKU) POŻYWKI NAWOZOWEJ Z PODŁOŻY UPRAWOWYCH MAJĄCE NA CAŁU OKREŚLENIE ZASOLENIA, ODCZYNU PH, A TAKŻE ZASOBNOŚCI W MARKO I MIKRO ELEMENTY	39
4.8. ANALIZA OPTYCZNA ROŚLIN (WIZUALNA PODCZAS CAŁEGO OKRESU WEGETACJI)	41
4.9. ANALIZA KOŃCOWA PLONU	42
4.10. METODYKA DOŚWIETLANIA ROŚLIN TRUSKAWKI	43
4.11. WIZUALNA OCENA EKSPERCKA	48
4.11.1. <i>Opis oceny wizualnej dokonanej przez eksperta dla sałaty, rukoli i sadzonek</i>	48
4.11.2. <i>Opis oceny wizualnej dokonanej przez eksperta dla truskawki</i>	51
4.12. METODY BADAŃ KONSUMENCKICH	52
4.12.1. <i>Ocena konsumentka sałaty i rukoli</i>	52
4.12.2. <i>Ocena konsumentka jakości owoców truskawki</i>	54
4.13. BADANIE OBRAZÓW SPEKTRALNYCH URZĄDZENIEM SPEKTROFOTOMETRYCZNYM	55
4.14. METODYKA BADAŃ POLOWYCH	60
4.15. STATYSTYCZNE OPRACOWANIE WYNIKÓW BADAŃ	63
5. WYNIKI BADAŃ.....	64
5.1. OCENA WPLYWU RODZAJU OŚWIETLENIA LED NA WZROST I KONDYCJĘ SAŁATY W SYSTEMIE AKWAPONICZNYM	64
5.1.1. <i>Ocena cech plonotwórczych i jakości</i>	64
5.1.2. <i>Analiza wpływu rodzaju oświetlenia na cechy sensoryczne sałaty</i>	71



5.1.3.	<i>Analiza chemiczna zawartości makro i mikro elementów oraz substancji chemicznych w roślinach sałaty</i>	76
5.1.4.	<i>Analiza obrazów spektralnych sałaty</i>	84
5.1.5.	<i>Wpływ widma światła LED na cechy plonotwórcze sałaty – interpretacja wyników PCA na podstawie pomiarów spektralnych liści</i>	86
5.2.	<i>OCENA WPŁYWU RODZAJU OŚWIETLENIA LED NA WZROST I KONDYCJĘ RUKOLI</i>	89
5.2.1.	<i>Ocena cech plonotwórczych i jakości</i>	89
5.2.2.	<i>Ocena sensoryczna rukoli – wpływ rodzaju oświetlenia LED</i>	94
5.2.3.	<i>Analiza chemiczna zawartości makro i mikro elementów oraz substancji chemicznych w roślinach rukoli</i>	98
5.2.4.	<i>Analiza obrazów spektralnych rukoli</i>	107
5.2.5.	<i>Wpływ widma światła LED na cechy plonotwórcze rukoli w świetle analizy składowych głównych (PCA)</i>	111
5.3.	<i>WPŁYW RODZAJU OŚWIETLENIA LED NA JAKOŚĆ ROZSADY SAŁATY W SYSTEMIE HYDROPONICZNYM</i> 114	
5.3.1.	<i>Analiza jakości i kondycji siewek rozsady sałaty</i>	114
5.3.2.	<i>Analiza chemiczna barwników i suchej masy dla siewek rozsady sałaty</i>	119
5.3.3.	<i>Analiza obrazów spektralnych siewek rozsady sałaty</i>	122
5.3.4.	<i>Wpływ widma światła LED na cechy plonotwórcze siewek rozsady sałaty w świetle analizy składowych głównych (PCA)</i>	124
5.4.	<i>ANALIZA STATYSTYCZNA WYNIKÓW BADAŃ NAD WPŁYWEM WARIANTÓW OŚWIETLENIA NA PLON I JAKOŚĆ OWOCÓW TRUSKAWKI</i>	126
5.4.1.	<i>Porównanie wartości cech względem kontroli</i>	127
5.4.2.	<i>Analiza statystyczna wyników oceny konsumenckiej truskawek uprawianych pod wpływem różnych wariantów doświetlania LED</i>	133
5.4.3.	<i>Analiza chemiczna zawartości makro i mikro elementów oraz substancji chemicznych w owocach truskawki</i>	137
5.4.4.	<i>Analiza obrazów spektralnych owoców i liści truskawki</i>	146
5.4.5.	<i>Wpływ spektralnego doświetlania LED na cechy plonotwórcze truskawek w kontekście analizy PCA na podstawie analizy owoców truskawki</i>	149
5.4.6.	<i>Wpływ spektralnego doświetlania LED na cechy plonotwórcze truskawek w kontekście analizy PCA na podstawie analizy liści truskawki</i>	151
5.5.	<i>ANALIZA OPTYCZNA I KOŃCOWA PLONU W KONTEKŚCIE ZAGOSPODAROWANIA PRODUKTÓW UBOCZNYCH PRODUKCJI UPRAW W ŚRODOWISKU KONTROLOWANYM</i>	154
5.5.1.	<i>Plon i cechy jakości ziarna dla poszczególnych wariantów</i>	154
5.5.2.	<i>Ocena stanu roślinności na poletkach doświadczalnych z wykorzystaniem wskaźnika NDVI z zdjęć satelitarnych z satelitów Sentinel- 2</i>	155
5.5.3.	<i>Powiązania między NDVI oraz plonem, składowymi plonu i cechami jakości ziarna oraz wielo cechowa charakterystyka obiektów</i>	163
5.5.4.	<i>Analiza obrazów spektralnych pszenicy</i>	169
5.5.5.	<i>Wpływ stosowania produktów ubocznych z uprawy truskawki (odciek z podłoża) na środowisko</i>	174
5.6.	<i>WPŁYW OŚWIETLENIA NA EKONOMIĘ UPRAWY</i>	177
6.	WYTWORZENIE INNOWACJI	182



6.1.	INNOWACJA ORGANIZACYJNA: STWORZENIE APLIKACJI UMOŻLIWIAJĄCEJ SYMULACJĘ I ANALIZĘ OPTYMALNEGO OŚWIETLENIA DLA DANEJ UPRAWY Z UWZGLĘDNIENIEM RÓŻNEGO SPEKTRUM BARW.....	182
6.1.1.	<i>Opis ogólny</i>	182
6.1.2.	<i>Dane dotyczące oświetlenia</i>	184
6.1.3.	<i>Symulacja - porównywanie zestawów oświetlenia</i>	185
6.2.	INNOWACJA TECHNOLOGICZNA W ZAKRESIE DOBORU ŚWIATŁA DO WSPOMAGANIA ROZWOJU ROŚLIN	188
6.3.	INNOWACJA TECHNOLOGICZNA W ZAKRESIE WYTWORZENIA SYSTEMU OŚWIETLENIA	189
6.4.	ULEPSZONA INNOWACJA TECHNOLOGICZNA W ZAKRESIE ZAGOSPODAROWANIA ODCIEKU Z PRODUKCJI TRUSKAWEK TUNELOWYCH.....	191
7.	PERSPEKTYWA DALSZEGO ROZWOJU I REKOMENDACJA DZIAŁAŃ:	193
8.	UPOWSZECHNIANIE WYNIKÓW	195
8.1.	STRATEGIA INFORMACYJNA– CELE I GRUPY DOCELOWE	195
8.2.	OBECNOŚĆ NA TARGACH I WYSTAWACH ROLNICZYCH	195
8.3.	UDZIAŁ W KONFERENCJACH I FORACH EKSPERCKICH	196
8.4.	WSPÓŁPRACA Z UCZELNIAMI I SZKOŁAMI BRANŻOWYMI.....	199
8.5.	OBECNOŚĆ W MEDIACH BRANŻOWYCH I SPOŁECZNOŚCIOWYCH.....	201
8.6.	ROZWÓJ NARZĘDZI CYFROWYCH DO KOMUNIKACJI PROJEKTOWEJ	203
8.7.	EFEKTY I ZASIĘG DZIAŁAŃ PROMOCYJNYCH	204
8.8.	WZMOCNIENIE SYSTEMU UPOWSZECHNIANIA WIEDZY	204
8.9.	PLANY ROZWOJU DZIAŁAŃ KOMUNIKACYJNYCH	205
9.	SPIS TABEL, FOTOGRAFII I RYSUNKÓW	206
9.1.	SPIS TABEL	206
9.2.	SPIS FOTOGRAFII	206
9.3.	SPIS RYSUNKÓW.....	207



1. Wstęp

Nowoczesne uprawy w środowisku kontrolowanym odgrywają coraz większą rolę w dostawach warzyw i owoców. Dzięki rozwojowi produkcji w środowisku kontrolowanym możliwe jest zapewnienie dostępu do świeżych warzyw przez cały rok. Od warzyw wyprodukowanych w takich warunkach oczekuje się wysokiej jakości. Produkty powinny charakteryzować się odpowiednią smakowitością i wyglądem, atrakcyjnym dla konsumentów oraz powinny jednocześnie zawierać składniki odżywcze i być pozbawione pozostałości chemicznych środków ochrony roślin. Wysokie wymagania odnośnie warzyw wymuszają stałą kontrolę warunków uprawy. W celu uzyskania danych plonów w oczekiwanym terminie konieczne jest zaplanowanie przebiegu cyklu produkcyjnego oraz ciągły monitoring rozwoju i wzrostu roślin. Nowoczesne uprawy w środowisku kontrolowanym wyposażane są w urządzenia i systemy pozwalające na monitorowanie warunków w jakich rozwijają się roślin oraz regulację ich paramentów. Na wzrost roślin znaczący wpływ ma światło, które determinuje szereg procesów fizjologicznych zachodzących w roślinach. „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.” (A. Puternicki, Zastosowanie półprzewodnikowych źródeł światła w doświetlaniu sadzonek wybranych gatunków roślin, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 256, 2012). Z tego względu w przypadku warzyw uprawianych w środowisku kontrolowanym stosuje się doświetlanie, a najnowsze technologie upraw opierają się głównie na lampach LED. Mogą one emitować światło o regulowanej mocy oraz pożądanej długości fal.

Obecnie prowadzi się badania dotyczące wykorzystania lamp LED i wpływu różnych barw światła na jakość oraz tempo wzrostu roślin. Wyniki pozwalają stwierdzić, że w przypadku niektórych upraw zastosowanie oświetlenia lampami LED o odpowiednim spektrum barw daje większe plony. Każda roślina ma odmienne wymagania fotosyntetyczne. Zmianę składu spektralnego promieniowania używanego do naświetlania roślin można wykorzystać w celu zwiększenia produkcji roślin uprawnych. (M.Kusior, M. Krośniak, P. Zagrodzki, Wpływ światła o różnej długości fal na rozwój roślin i wybrane parametry biochemiczne na przykładzie rzeżuchy (*Lepidum sativum*) i gorczycy (*Sinapis alba*), Bromatologia i Chemia Toksykologiczna, t.45, nr 3, 2012, s.717-721). Odpowiednio zaprojektowane, m.in. w zakresie intensywności, częstotliwości i długości fal, systemy sztucznego oświetlenia dedykowane do procesu wzrostu roślin pozwalają zaplanować i kontrolować przyrost ich wagi, kształt, kolor a nawet smak.



Wykorzystanie technologii oświetlenia LED oraz dostosowanie widma światła może być wykorzystane między innymi przy uprawie sałaty w środowisku kontrolowanym. Jest to roślina o krótkim okresie wegetacji, z uwagi na to jej uprawa pod osłonami staje się coraz bardziej powszechna. Sałata jest rośliną dnia długiego, co oznacza, że ponad 14-godzinna ekspozycja na światło stymuluje wykształcanie pędu kwiatostanowego. Niedobór światła, zwłaszcza po wschodach, skutkuje wydłużaniem się części podliścieniowej i wydolikaceniem roślin. W konsekwencji rozety są zbyt wysoko osadzone, mało stabilne i podatne na uszkodzenia w czasie sadzenia, a w uprawie główki ulegają deformacjom. Aby zapewnić optymalne warunki wzrostu konieczne jest stosowanie dodatkowych źródeł oświetlenia. Dzięki wykorzystaniu lamp LED o odpowiednim spektrum barw, dostosowanych do wymagań sałaty, możliwe będzie osiągnięcie lepszej jakości produktu. Wykorzystanie tego rozwiązania może być także korzystne w przypadku uprawy rukoli, znanej również jako rukieta siewna, która jest sadzona pod osłonami w ciągu całego roku. Z uwagi na dłuższe okresy niedoboru światła na plon korzystnie wpływa doświetlanie. W przypadku niższej intensywności światła otrzymany plon rukoli jest niższy i późniejszy. W zależności od stadium wzrostu liście rukoli różnią się smakiem – młode liście posiadają bardziej delikatny smak, starsze natomiast charakteryzują się wyraźniejszym aromatem. Zastosowanie technologii LED oraz dostosowanie widma światła może w tym przypadku być pomocne w uzyskaniu produktu o pożądanych cechach. Z uwagi na możliwość wydłużenia terminów uprawy truskawki o miesiące jesienno-zimowe zastosowanie doświetlania z optymalnym widmem światła może okazać się korzystne również w przypadku uprawy truskawki w tunelach. Dzięki temu rozwiązaniu roślinom zostanie zapewniona wymagana ilość światła oraz długość dnia potrzebna do fotosyntezy w miesiącach o ograniczonej ilości światła naturalnego. Należy zwrócić uwagę, że na polskim rynku ogrodniczym brakuje dobrej jakości sadzonek. Z tego względu są one importowane z krajów, gdzie są uprawiane z wykorzystaniem dodatkowego doświetlania systemami LED. Ponadto zastosowanie odpowiedniego widma światła może pozwolić na uzyskanie produktu o lepszej jakości. Nie da się opracować ogólnych zaleceń, a rozwiązania świetlne powinny być „szyte na miarę” dla każdej odmiany. Z tego względu operacja zakłada badania nad dostosowaniem optymalnego spektrum światła przy doświetlaniu upraw sałaty, rukoli i truskawki oraz różnego rodzaju sadzonek.

Podstawową metodą żywienia truskawek uprawianych w środowisku kontrolowanym jest fertygacja. Truskawki do prawidłowego wzrostu wymagają zapewnienia komfortowych warunków uprawy. Jednym z nich jest dostarczenie optymalnej ilości składników pokarmowych do aktywnej strefy systemu korzeniowego roślin, czyli zastosowanie fertygacji. Pożywka przygotowywana z nawozów doprowadzana jest za pomocą systemu nawodnieniowego. Pozostałości z pożywki pozostają natomiast niezagospodarowane, gdyż



nie nadają się do ponownego wykorzystania w uprawach tunelowych. Z tego względu poszukiwane są rozwiązania pozwalające na ich wykorzystanie w gospodarstwie. Biorąc pod uwagę, iż woda z nawadniania truskawek w uprawach tunelowych bogata jest w składniki mineralno-organiczne możliwe może być wykorzystane przelewu z pożywki przy nawożeniu upraw polowych. Z uwagi na to w ramach operacji planuje się przebadanie skuteczności nawozowego wykorzystania wody pochodzącej z nawadniania truskawek.

Projekt planowanej operacji został skonsultowany z rolnikami, hodowcami oraz środowiskiem naukowym. Grupą docelową innowacji są przede wszystkim rolnicy i producenci sałaty, rukoli, truskawek oraz różnego rodzaju sadzonek. Innowacje następnie mogą zostać zaadoptowane na masową skalę przez duże podmioty związane z hodowlą roślin. Jest to również szansa na spopularyzowanie upraw w środowisku kontrolowanym.

Potrzeba realizacji operacji jest uzasadniona wynikami badań naukowych w rozumieniu art. 4. ust. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Badania naukowe jednoznacznie sugerują potrzebę rozszerzenia przydatności upraw w środowisku kontrolowanym pod względem opłacalności uzyskiwanego z jednostki powierzchni plonu, a także zawartości składników odżywczych w uprawianych roślinach.

„Obecnie w szklarni można manipulować światłem w odniesieniu do intensywności (poprzez sztuczne oświetlanie lub stosowanie zasłon przeciwsłonecznych), fotoperiodu (regulacja przez sztuczne światło i ekrany zaciemniające) oraz rodzaju światła (uzupełnienie naturalnego światła sztucznym o określonej długości fali). Wymienione środki mają wpływ na wzrost i morfologię roślin.”

Najnowsze technologie upraw warzyw w środowisku kontrolowanym wymagających doświetlania opierają się głównie na lampach LED. Potwierdzają to autorzy publikacji naukowych, którzy wskazują, że „Lampy LED mogą być stosowane we wszystkich fazach wzrostu roślin, jak również przy ich klonowaniu. Przeznaczone do stosowania w miejskich farmach pionowych emitują światło o żądanych długościach fal i kolorze. Dla większości roślin uprawianych w miejskich farmach pionowych wymagane podstawowe barwy światła to niebieski konieczny podczas wegetatywnej fazy wzrostu i czerwony, który przyspiesza kiełkowanie oraz wspiera pąki i rozkwit roślin. Jako dopełnienie niebieskiego stosowany jest ultrafioletowy, który promuje pigmentację, pogrubia liście i zapobiega działalności szkodliwych owadów, podczerwony jako dopełnienie czerwonego w okresie kwitnienia i zielony w celu uzyskania obrazu rzeczywistego wyglądu roślin.” (M. Drożdż-Szczybura, Specyfika światła i oświetlenia w miejskich farmach pionowych ukierunkowanych na produkcję roślinną)

Publikacje naukowe potwierdzają wiele korzyści wynikających ze stosowania oświetlenia LED. „Przewagą tego rozwiązania nad innymi sztucznymi źródłami światła jest energooszczędność



oraz możliwość łatwej optymalizacji widma promieniowania modułów LED. Wykorzystanie diod elektroluminescencyjnych pozwala na budowanie dowolnych charakterystyk widmowych opraw oświetleniowych (poprzez integrację odpowiednich proporcji promieniowania o różnych barwach), które mogą być dostosowane do potrzeb danego gatunku.” (K.Klamkowski, W. Treder, A.Masny, Wpływ doświetlania lampami sodowymi i LED na aktywność fotosyntetyczną, wzrost oraz plonowanie roślin truskawki, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 268, 2015) „Dodatkowo światło emitowane przez pojedynczy LED charakteryzuje się widmem o bardzo wąskim paśmie i w związku z tym spektrum oświetlaczy może być dostosowane do potrzeb poszczególnych upraw” (P. Stefański, Przydatność źródeł światła zbudowanych w oparciu o diody charakteryzujące się widmem ciągłym światła białego wzbogaconym o pasmo niebieskie w hodowli zbóż, Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin, Nr 284, 2018).

Autorzy publikacji naukowych potwierdzają wpływ składu spektralnego światła na wzrost i rozwój roślin. Różne spektra światła są przedmiotem badań prowadzonych nad wpływem światła na wzrost i rozwój roślin. „Uzyskane wyniki potwierdzają obserwacje innych autorów o istotnym znaczeniu składu spektralnego światła używanego dla doświetlania roślin. Przykładowo, uzupełnienie emitowanego widma o światło niebieskie spowodowało zwiększenie akumulacji biomasy ogórka i papryki. Istotne znaczenie jakości widma emitowanego przez oprawy oświetleniowe wykazano także w przypadku truskawki.” „(...) z uwagi na różnorodność reakcji fotomorfogenetycznych, zakres spektralny emitowanego światła powinien być dopasowany nie tylko do konkretnego gatunku, ale także odmiany roślin uprawnych. Z tego powodu konieczne są dalsze prace nad doborem optymalnej jakości światła emitowanego przez oprawy LED dla danej uprawy (dobór diod o odpowiedniej charakterystyce spektralnej i udziale poszczególnych barw w widmie ogólnym oprawy oświetleniowej).” (K.Klamkowski, W. Treder, A.Masny, Wpływ doświetlania lampami sodowymi i LED na aktywność fotosyntetyczną, wzrost oraz plonowanie roślin truskawki, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 268, 2015). „Zmianę składu spektralnego promieniowania używanego do naświetlania roślin można wykorzystać w celu zwiększenia produkcji zarówno roślin uprawnych, jak i żywności funkcjonalnej.” (M.Kusior, M. Krośniak, P. Zagrodzki, Wpływ światła o różnej długości fal na rozwój roślin i wybrane parametry biochemiczne na przykładzie rzeżuchy (*Lepidium sativum*) i gorczycy (*Sinapis alba*), Bromatologia i Chemia Toksykologiczna, t.45, nr 3, 2012, s.717-721). „Długofalowe promieniowanie, a zwłaszcza czerwone jest najbardziej istotne dla przebiegu procesów fotosyntezy i fotomorfogenezy roślin. Niedostatek światła wpływa niekorzystnie na produktywność roślin oraz proces fotosyntezy, spowalniając jej tempo a zarazem hamując wzrost roślin, ale również negatywnie wpływa na aspekt morfogenezy – m.in. rośliny mogą mieć przesadnie wydłużone i wiotkie łodygi, a ilość



chlorofilu w tkankach może zostać zmniejszona.” „Różne spektra światła są szeroko stosowane w badaniach nad wpływem światła na wzrost i rozwój roślin. Wykazano, że rośliny wykazują wysoki stopień fizjologicznej, morfologicznej i anatomicznej plastyczności w stosunku do zmian w rodzaju światła.” (J. Jarosławska, Wpływ spektrum światła na wzrost i kwitnienie wybranych gatunków roślin ozdobnych)

Zastosowanie technologii LED przynosi również korzyści dla środowiska naturalnego, co potwierdzają autorzy publikacji. „W związku z dynamicznym postępowaniem 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 naświetlenia zarówno statycznego jak i dynamicznego.” „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.” (A. Puternicki, Zastosowanie półprzewodnikowych źródeł światła w doświetlaniu sadzonek wybranych gatunków roślin, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 256, 2012).

Informacje zawarte w opracowaniach naukowych potwierdzają potrzebę i korzyści dostosowania optymalnego spektrum światła przy uprawie sałaty w warunkach kontrolowanych, wymagającej doświetlania. „Sałata jest rośliną dnia długiego, co oznacza, że ponad 14-godzinna ekspozycja na światło stymuluje wykształcanie pędu kwiatostanowego. W okresie wydłużającego się dnia (>10 godz.) na przyspieszenie kwitnienia ma wpływ również wysoka temperatura i niedobór wilgoci w podłożu. W produkcji sałaty konsumpcyjnej zależy nam natomiast na jak najlepszym wzroście masy wegetatywnej, ukształtowaniu rozety (tzw. główki) i jej jakości biologicznej. Od fizjologicznej kondycji roślin zależy też ich podatność na stresy abiotyczne (klimatyczno-żywieniowe) i biotyczne (patogeniczne). Dlatego już od wysiewów trzeba zapewnić roślinom optymalne warunki wzrostu.” „Niedobór światła, zwłaszcza po wschodach, skutkuje wydłużaniem się części podliścieniowej i wydelikaczeniem roślin. W konsekwencji rozety są zbyt wysoko osadzone, mało stabilne i podatne na uszkodzenia w czasie sadzenia, a w uprawie główki ulegają deformacjom. Najbardziej wrażliwa na niedobór światła jest sałata krucha i masłowa, najmniej odmiany liściowe i rzymskie.” (Metodyka integrowanej ochrony sałaty uprawianej pod osłonami i w polu, Instytut Ogrodnictwa, Państwowy Instytut Badawczy, 2021).

Natomiast wyniki badania wpływu doświetlania lampami LED produkcji polskiej (DAPLON-plus) na wzrost i rozwój mikrosadzonek truskawki podczas aklimatyzacji wskazują, że na pokrój roślin i przyrost masy ma wpływ wzajemny udział światła czerwonego do niebieskiego



w widmie. (J. Treder, I. Sowik, A. Borkowska, K. Klamkowski, W. Treder, Aklimatyzacja mikrosadzonek truskawki z zastosowaniem doświetlania lampami LED, Instytut Ogrodnictwa w Skierniewicach, Prace Instytutu Elektrotechniki zeszyt 268, 2015).

Potrzeby realizacji opierają się na solidnych podstawach naukowych, biznesowych oraz legislacyjnych. Realizacja częściowo rozwiązuje problem rozszerzenia przydatności upraw w środowisku kontrolowanym pod względem opłacalności uzyskiwanego z jednostki powierzchni plonu, a także zawartości składników odżywczych w uprawianych roślinach. Jest to proces indukowany w dużej mierze przez instytucje publiczne oraz konsumentów.

1.1. Wpływ planowanej operacji

Planowana operacja wspiera zapewnienie stabilnych i zrównoważonych dostaw żywności poprzez innowacje związane z łagodzeniem skutków zmian klimatycznych i zwiększenie poziomu ochrony środowiska. Dzięki planowanym rozwiązaniom łatwiej będzie zapewnić ten sam poziom dostaw żywności przy mniejszym zużyciu środków ochrony roślin na jednostkę otrzymywanego plonu. Co więcej w wyniku realizowanej operacji znacząco może podnieść wielkość plonów niezależnie od zmian klimatu i tym samym przełożyć się na większą stabilność dostaw. Korzyścią będzie rozszerzenie przydatności upraw w środowisku kontrolowanym pod względem opłacalności uzyskiwanego z jednostki powierzchni plonu, a także wzrost zawartości składników odżywczych w uprawianych roślinach. Skuteczne zarządzanie oświetleniem i wykorzystanie optymalnego spektrum oświetlenia dla wzrostu roślin pozwoli na kontrolę warunków wzrostu, a dzięki temu osiągnięcie wysokiej jakości produktów, atrakcyjnych dla konsumentów, przy jednoczesnym ograniczeniu pozostałości chemicznych środków ochrony roślin. Wpłynie to na zachowanie wysokiej jakości produktu i ograniczy straty, a tym samym przyczyni się do zapewnienia stabilnych i zrównoważonych dostaw żywności.

Operacja może istotnie usprawnić proces w celu zachowania stanu środowiska oraz dostosowania się do zmiany klimatu i łagodzenia jej skutków lub stać się alternatywą dla aktualnych upraw. W warunkach naturalnych rośliny narażone są na działanie wielu niekorzystnych czynników. Technologia będąca przedmiotem operacji może przyczynić się do zwiększenia produktywności upraw w warunkach kontrolowanych. Dzięki rozwojowi upraw w środowisku kontrolowanym możliwe będzie zapewnienie dostępu do świeżych warzyw przez cały rok. Ma to szczególne znaczenie biorąc pod uwagę zagrożenia upraw związane ze zmianami klimatycznymi. W skutek zmieniających się od końca XX w. warunków gospodarczych i środowiskowych oraz wzrastającej liczby ludności koniecznością może okazać się, zwłaszcza w krajach wysoko zurbanizowanych, produkcja żywności w miastach. Rozwój nowoczesnego rolnictwa w postaci upraw zamkniętych przy zastosowaniu technologii wertykalnych oraz hydroponicznych w znacznym stopniu pozwoli na uniezależnienie produkcji



od warunków klimatycznych. Taka forma uprawy może być rozwijana na obszarach suchych, czy na terenach, gdzie gleba jest niezdatna pod uprawę. Dzięki temu do uprawianej lokalnie żywności możliwy byłby całoroczny dostęp. W Polsce całoroczna uprawa sałaty możliwa jest jedynie w warunkach kontrolowanych wykorzystujących sztuczne światło. Wykorzystanie technologii LED oraz optymalne dostosowanie poziomu oświetlenia i spektrum barw pozwala na produkcję, która w mniejszym stopniu przyczynia się do zmian klimatu.

Ponadto wykorzystana technologia LED umożliwia zminimalizowanie ewentualnych strat energii, dlatego większa ilość energii dostarczanej żarówce LED jest przetwarzana na światło. Zastosowanie systemu oświetlenia opartego na technologii LED oraz aplikacji do sterowania oświetleniem pozwoli na zmniejszenie zużycia energii w porównaniu do wykorzystania wysokoprężnych lamp sodowych, a co za tym idzie mniejsze oddziaływanie na środowisko.

Planowana operacja w znacznym stopniu tworzy pomosty między najnowszą wiedzą badawczą a rolnikami, przedsiębiorcami oraz usługami doradczymi. Dodatkowo szeroki skład konsorcjum gwarantuje skuteczne tworzenie nowych powiązań i sieci kontaktów, które znacznie przyspieszą rozpowszechnianie informacji o planowanej realizacji i być może w przyszłości przyczynią się do powstania nowych projektów. W skład konsorcjum wchodzi uczelnia – Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, która wykonuje działalność naukową w dyscyplinie naukowej niezbędnej do realizacji operacji. Udział w konsorcjum jednostki naukowej zapewnia wysoki poziom merytoryczny prowadzonych prac badawczo-rozwojowych. Natomiast czynny udział gospodarstw rolnych w procesie tworzenia innowacji potwierdza możliwość praktycznego zastosowania tego rozwiązania. Technologia w rolnictwie pozwala na poprawę wydajności procesów oraz produkcji. Przyspieszenie procesu adaptacji innowacji w rolnictwie wymaga dużej wiedzy, zrozumienia procesów zachodzących w gospodarstwach rolnych oraz znajomości czynników, które mają wpływ na decyzje podejmowane przez rolników. Z tego względu w projekcie założono współpracę podmiotów z różnych sektorów. Zawiązana współpraca pozwoli na powstanie kultury współpracy opartej na zaufaniu różnorodnych podmiotów, włączających się w realizację założonych celów rozwojowych oraz tworzenie pomostów między najnowszą wiedzą badawczą i technologiami a podmiotami z różnych sektorów.

2. Cel i zakres projektu

Celem operacji jest wytworzenie ulepszonej innowacji technologicznej i organizacyjnej, związanych z wykorzystaniem lamp LED o odpowiednim spektrum barw, dostosowanych do uprawy sałaty, rukoli truskawki oraz sadzonek w warunkach, w których wymagają one doświetlania.



Realizacja celu przedkłada się na poprawienie wyników gospodarczych i poziomu innowacyjności producentów sałaty, rukoli, truskawek oraz sadzonek, zwiększenie ochrony środowiska i łagodzenie zmian klimatu.

Planowana operacja bardzo mocno wpisuje się w założenia Wspólnej Polityki Rolnej w zakresie rozwiązań konkurencyjnych, niskoemisyjnych oraz przyjaznych dla klimatu i odpornych na jego zmianę poprzez skupienie się na wytworzeniu innowacji związanych z wytworzeniem innowacji technologicznej skupionej wokół optymalizacji zasobów zużywanych w rolnictwie. Wykorzystanie innowacyjnego systemu oświetlania do wspomagania wzrostu roślin oraz systemu do zarządzania oświetleniem w formie aplikacji, pozwoli na kontrolę warunków wzrostu, a dzięki temu osiągnięcie wysokiej jakości produktów, atrakcyjnych dla konsumentów, przy jednoczesnym ograniczeniu pozostałości chemicznych środków ochrony roślin. Wpłyne to na możliwość rozwoju rolnictwa ekologicznego. Przy ekologicznej produkcji rezygnuje się ze stosowania syntetycznych środków produkcji, co umożliwia ochronę środowiska i produkcję zdrowej żywności. Certyfikowane uprawy w znaczny sposób zmniejszają negatywny wpływ działalności rolniczej na glebę, wodę i powietrze.

Zwraca się uwagę, że dodatkowym impulsem do rozwoju rolnictwa zrównoważonego będzie rozwój rolnictwa miejskiego i upraw wertykalnych, które będą tworzyć wysokokwalifikowane miejsca pracy, zmniejszać koszty transportu i wykorzystywać przy tym odnawialne źródła energii. „W kontrolowanym otoczeniu bezglebowym, nie wymagają one wykorzystania środków ochrony roślin i pozwalają zmniejszyć zużycie wody nawet o 95%. Są też odpowiedzią na ryzyko utraty plonów przez zmiany pogodowe” (Zrównoważona żywność w Polsce – Raport, 2021). Efekty projektu mogą przyczynić się do rozwoju takiej formy uprawy.

Rolnictwo zrównoważone to działania, które prowadzą do ograniczania niekorzystnego wpływu produkcji rolniczej na środowisko i bardziej efektywnego wykorzystania zasobów, w sposób przyjazny dla środowiska. Zrównoważone rolnictwo będzie rozwijać się coraz szybciej, między innymi za sprawą popytu konsumentów oraz szeregu rozwiązań prawnych i instrumentów finansowych wspierających tego rodzaju produkcję. Jest to też efektem rozwoju technologii związanych z uprawą, hodowlą oraz sprzedażą produktów. Technologia znacząco przyspiesza rozwój rolnictwa zrównoważonego, ułatwia jego wdrażanie i prowadzenie. W tym duże znaczenie mają rozwiązania cyfrowe, zapewniające sprawne zarządzanie uprawą. Innowacja będąca przedmiotem operacji wspierać będzie rozwój tego rodzaju rolnictwa.

2.1. Cele szczegółowe

Wytworzenie ulepszonej innowacji technologicznej: metodologia wykorzystania optymalnego spektrum światła do wspomagania wzrostu sałaty, rukoli oraz truskawki o w środowisku kontrolowanym. Wykorzystywane będą lampy LED umożliwiające dostosowanie spektrum



światła do warunków rozwoju roślin. Planowane są badania nad określeniem spektrum światła optymalnego do wzrostu sałaty, rukoli truskawek oraz sadzonek.

Wytworzenie ulepszonej innowacji technologicznej: innowacyjny system oświetlania do wspomagania wzrostu sałaty w uprawach w środowisku kontrolowanym, wykorzystujący lampy LED umożliwiające dostosowanie spektrum światła do warunków rozwoju roślin. Wykorzystana zostanie energia elektryczna, która zmieniana jest w światło absorbowane przez rośliny. Diody LED umożliwią dostosowanie optymalnego spektrum światła do potrzeb procesu fitocenozy.

Wytworzenie ulepszonej innowacji technologicznej w zakresie zagospodarowania produktów ubocznych produkcji upraw w środowisku kontrolowanym roślin uprawnych. W ramach projektu zostanie wytworzona ulepszona technologia zagospodarowania wody o dużej zawartości mikroelementów, będącej produktem ubocznym procesu precyzyjnego nawadniania. W ramach projektu zostaną przetestowane różne sposoby wykorzystywania tego produktu ubocznego jako surowca podnoszącego walory odżywcze oraz poziom plonowania uprawianych roślin.

Wytworzenie innowacji organizacyjnej: Stworzenie aplikacji umożliwiającej symulację i analizę optymalnego oświetlenia dla danej uprawy z uwzględnieniem różnego spektrum barw. Pozwoli to na skuteczne zarządzanie i planowanie i estymowanie efektywności ekonomicznej inwestycji w wymianę oświetlenia na uprawach zamkniętych. Dzięki takiemu rozwiązaniu rośliny będą miały zapewnione optymalne warunki i odpowiednią ilość energii zapewniającej ich wzrost. Przez to, że systemem można będzie kontrolować za pomocą aplikacji mobilnej, aktualny stan parametrów i warunki oświetlenia będzie można monitorować w sposób zdalny, z dowolnego miejsca.

W ramach operacji planuje się przebadanie skuteczności nawozowego wykorzystania wody pochodzącej z nawaniania truskawek. Planowane jest przebadanie substratu uprawowego, pożywki oraz przelewu z pożywki. Produkty uboczne pochodzące z nawadniania i nawożenia truskawek w uprawach kontrolowanych bogate są w składniki mineralno-organiczne, dlatego możliwe może być wykorzystanie ich przy nawożeniu upraw polowych. W pierwszych dniach po posadzeniu roślin w substracie kokosowym donice podlewane są co godzinę, nawet wtedy, gdy podłoże jest optymalnie wilgotne. Ubytki wody są wtedy tak szybkie, że po paru godzinach bez nawadniania mogłoby nastąpić wędnięcie roślin. Dlatego nawadnianie roślin w tej technologii wymaga zainstalowania precyzyjnych urządzeń dostarczających jednakowych ilości wody w pobliżu każdej rośliny. Uprawa w substracie kokosowym wymaga regularnego podawania mikroelementów — to jest magnezu (w postaci saletry magnezowej), boru, manganu, cynku i miedzi (w postaci siarczanu miedzi) oraz żelaza. Ze względu na to można



przypuszczać, iż pożywka odpływająca z uprawy może być wykorzystana przy uprawie polowej i przynieść korzyści związane z plonowaniem uprawianych roślin.

3. Organizacja projektu

3.1. Konsorcjanci

Projekt dotyczący wytworzenia ulepszonej innowacji technologicznej i organizacyjnej, związanych z wykorzystaniem lamp LED o odpowiednim spektrum barw, dostosowanych do uprawy sałaty, rukoli truskawki oraz sadzonek w warunkach, w których wymagają one doświetlania zrealizowano w ramach konsorcjum złożonego z pięciu partnerów:

- Umola Sp. z o. o.,
- Łukasz Czech Agrowe,
- Gospodarstwo Rolne Dariusz Pawlak,
- Firma Profesor Ziółko Grzegorz Skrobisz,
- Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie.

Każdy z partnerów wносił do projektu unikalne kompetencje i zasoby, które w połączeniu pozwoliły na kompleksowe przeprowadzenie badań.

Umola Sp. z o.o. to polska firma z siedzibą w Gdyni, specjalizująca się w projektowaniu i dostarczaniu zaawansowanych systemów oświetlenia LED dla upraw szklarniowych i farm wertykalnych. Oferuje kompleksowe rozwiązania obejmujące projektowanie, produkcję oraz wdrażanie dedykowanych modułów LED, dostosowanych do indywidualnych potrzeb klientów. Firma Profesor Ziółko Grzegorz Skrobisz z siedzibą w Starogardzie Gdańskim, specjalizuje się w projektowaniu i utrzymaniu ogrodów oraz prowadzi miejską farmę wertykalną, zajmującą się uprawą i sprzedażą mikro roślin przez cały rok. Firmy Umola Sp. z o. o. oraz Profesor Ziółko Grzegorz Skrobisz, jako partnerzy technologiczni projektu, odpowiadali za praktyczną stronę badań. W zakres jej obowiązków wchodził zakup i konfiguracja niezbędnego sprzętu, w tym systemów oświetlenia LED oraz urządzeń pomiarowych. Specjaliści z Umola Sp. z o. o. projektowali i testowali różne warianty oświetlenia, a następnie przeprowadzali szczegółowe badania roślin przy użyciu specjalistycznej aparatury, takiej jak ScanSpectrum. Firmy były także odpowiedzialne za opracowanie i testowanie aplikacji służącej do gromadzenia i analizy danych, w tym tworzenie baz danych i interfejsów użytkownika. Dzięki swojemu doświadczeniu technologicznemu i zapleczu badawczemu, firmy zapewniły projektowi niezbędną infrastrukturę i narzędzia pomiarowe.

Łukasz Czech Agrowe to firma z siedzibą w Królewskim Dworze, specjalizująca się w doradztwie rolniczym, technologicznym oraz wsparciu w pozyskiwaniu funduszy unijnych dla sektora agro. Firma łączy wiedzę z zakresu rolnictwa i informatyki, oferując innowacyjne



rozwiązania dla rolników i przedsiębiorców. Firma pełniła w projekcie rolę koordynatora i integratora działań wszystkich partnerów. Jego głównym zadaniem było zapewnienie sprawnej współpracy między podmiotami poprzez organizację regularnych spotkań konsorcjalnych i nadzór nad realizacją poszczególnych zadań. Łukasz Czech Agrowe odpowiadał także za przygotowanie dokumentacji projektowej i przeprowadzenie niezbędnych procedur zakupowych. Dodatkowo wspierał partnerów w zakresie gromadzenia i przetwarzania danych, a na końcowym etapie projektu przygotował kompletną dokumentację technologiczną. Dzięki swojej roli koordynacyjnej, zapewnił spójność całego przedsięwzięcia i terminową realizację założonych celów.

Gospodarstwo Rolne Dariusza Pawlaka zlokalizowane w województwie łódzkim prowadzi produkcję roślinną i jednocześnie specjalizuje się w uprawie truskawek w tunelach foliowych. Gospodarstwo korzysta z nowoczesnych technologii uprawowych, umożliwiających wcześniejsze kwitnienie i zbiory truskawek. Gospodarstwo stanowi przykład nowoczesnego podejścia do rolnictwa w regionie łódzkim, łącząc tradycyjne metody z innowacyjnymi rozwiązaniami technologicznymi. Rolnik oraz firmy produkcyjne zaangażowane w projekt pełniły kluczową rolę w zapewnieniu praktycznego wymiaru badań. Ich udział był szczególnie cenny jako ogniwo łączące badania naukowe z rzeczywistymi warunkami produkcji roślinnej. Rolnicy odpowiadali za prawidłowe prowadzenie upraw zgodnie z ustalonym protokołem badawczym, co obejmowało wykonanie wszystkich niezbędnych zabiegów agrotechnicznych (siew, nawadnianie, nawożenie, ochrona roślin) w ściśle określonych terminach. Codzienna obserwacja plantacji przez rolników pozwalała na szybkie wychwycenie ewentualnych nieprawidłowości w rozwoju roślin pod wpływem różnych wariantów oświetlenia, a także zagospodarowania produktów ubocznych z produkcji truskawek. Rolnicy uczestniczyli aktywnie w procesie zbioru plonów, dbając o prawidłowe pobranie próbek do dalszych analiz. Ich praktyczne doświadczenie było szczególnie cenne podczas testów aplikacji opracowanej przez firmę Umola – jako użytkownicy końcowi mogli ocenić jej funkcjonalność i użyteczność w warunkach polowych. Udział rolników w grupach fokusowych pozwolił na weryfikację, czy proponowane rozwiązania technologiczne są rzeczywiście użyteczne i ekonomicznie uzasadnione w praktyce rolniczej. Dzięki ich zaangażowaniu, wyniki badań mogły być weryfikowane w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków produkcyjnych.

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie (SGGW) to jedna z wiodących uczelni przyrodniczych w Polsce, wyróżniająca się silnym zapleczem naukowym i badawczym. W kontekście realizacji projektów naukowych, SGGW prowadzi liczne badania w obszarach rolnictwa, biologii, biotechnologii, ochrony środowiska, żywienia, leśnictwa, weterynarii oraz ekonomii i zarządzania. Uczelnia stawia na transfer wiedzy, rozwój technologii i wspieranie innowacji w sektorze agro, środowiskowym i żywnościowym. Szkoła Główna Gospodarstwa



Wiejskiego (SGGW) pełniła w projekcie rolę eksperta naukowego, zapewniając merytoryczne podstawy badań. Zespół naukowców z SGGW odpowiadał przede wszystkim za opracowanie założeń metodologicznych, uwzględniających aktualny stan wiedzy z zakresu fizjologii roślin i fotomorfogenezy. Naukowcy z SGGW nadzorowali również proces poboru i przygotowania próbek roślinnych do analiz, dbając o zachowanie odpowiednich standardów badawczych. Kluczowym obszarem ich działalności była kompleksowa analiza statystyczna zgromadzonych danych, pozwalająca na weryfikację postawionych hipotez badawczych. Uczelnia wykorzystywała w tym celu swoje specjalistyczne laboratoria wyposażone w zaawansowaną aparaturę pomiarową oraz zespoły ekspertów z dziedziny fizjologii roślin, statystyki i biotechnologii.

Współpraca między tymi podmiotami została zaplanowana w etapach, z których każdy miał określone zadania i oczekiwane rezultaty. Podział ról między poszczególnymi partnerami pozwolił na efektywne wykorzystanie ich unikalnych kompetencji. SGGW wniosła do projektu wiedzę akademicką i metodologię naukową, firmy Umola Sp. z o. o. oraz Profesor Ziółko Grzegorz Skrobisz zapewniły know-how technologiczne i wykonawcze, rolnicy – praktyczną weryfikację w rzeczywistych warunkach uprawowych, podczas gdy Łukasz Czech Agrowe zadbał o spójność całego przedsięwzięcia. Taka synergia umożliwiła przeprowadzenie kompleksowych badań, których wyniki mogą mieć istotne znaczenie dla rozwoju nowoczesnych metod uprawy roślin przy wykorzystaniu oświetlenia LED.

3.2. Prowadzenie badań

3.2.1. Doświadczenia w uprawach zamkniętych

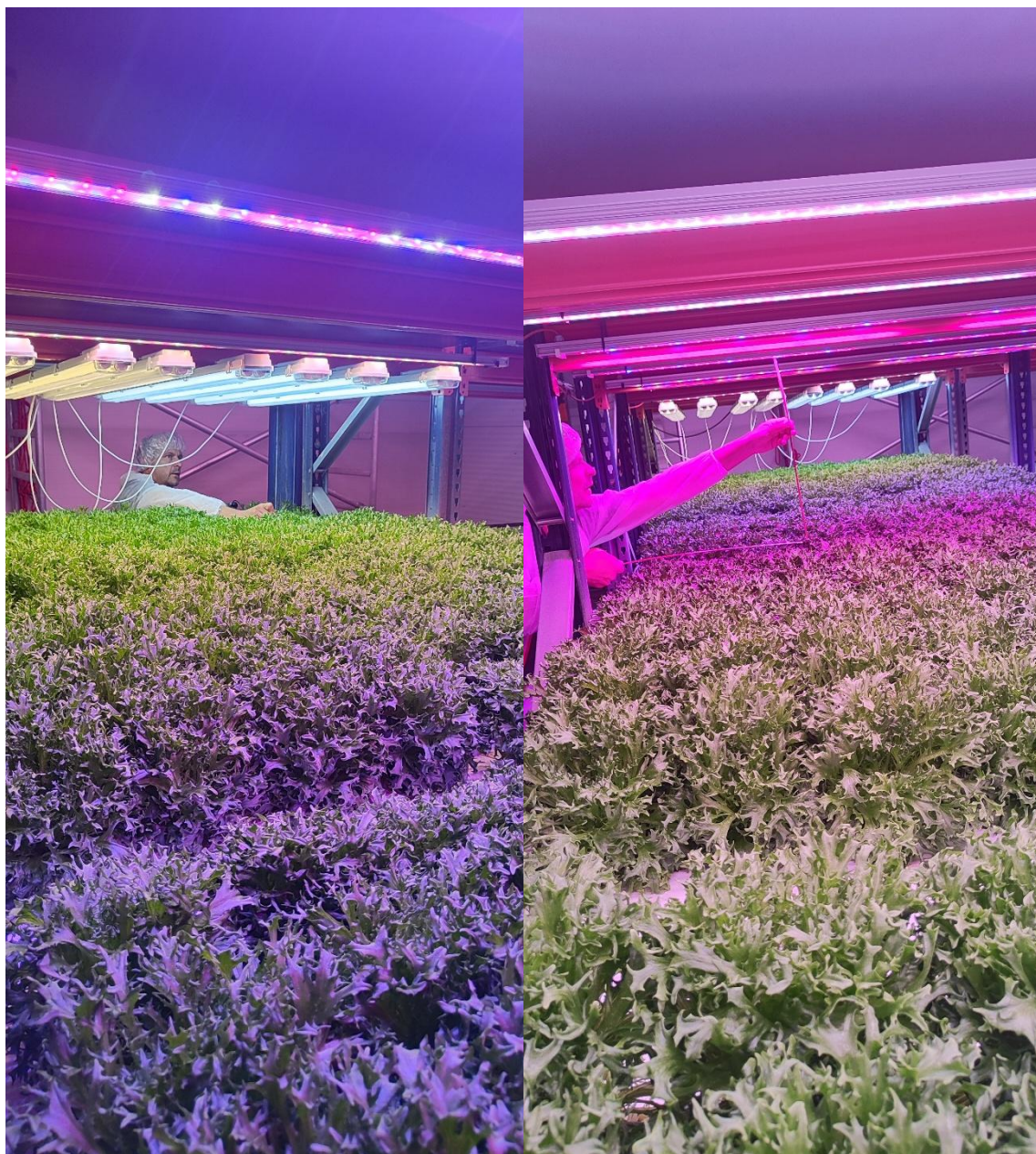
System lamp LED został zamontowany w doświadczeniach w uprawach zamkniętych tj. z sałatą, rukolą, sadzonkami oraz truskawkami.

Wstępne doświadczenia związane z uprawą sałaty z zastosowaniem doświetlania LED przeprowadzono w ramach testowej instalacji farmy wertykalnej. Obiekt ten posłużył jako środowisko eksperymentalne dla nowoczesnej metody uprawy sałaty rzymskiej w systemie akwaponicznym z recyrkulacją pożywki. Zastosowanie zintegrowanego modelu łączącego hodowlę ryb z produkcją roślinną umożliwiło ocenę potencjału tworzenia zamkniętego, zrównoważonego ekosystemu, w którym produkty przemiany materii ryb pełnią rolę naturalnego źródła składników odżywczych dla roślin. Trzytygodniowe sadzonki sałaty rzymskiej przenoszone były do specjalnych, pływających platform wykonanych z polistyrenu (raftów) o wymiarach 90x60 cm. Na każdy metr kwadratowy przypada aż 40 roślin, co świadczy o wysokim zagęszczeniu produkcji. Rośliny pływają w basenach uprawowych o szerokości 1,8 metra, wypełnionych wodą o głębokości 15 cm.



Fotografia 1. Rafty w basenach wodnych oraz system korzeniowy uprawianej sałaty

Wewnątrz hali uprawowej utrzymywane były stabilne warunki mikroklimatyczne: temperatura wynosiła 22°C - 24°C, a wilgotność względna powietrza utrzymywana jest na poziomie 65%-75%. Rośliny doświetlane były energooszczędnymi lampami LED (4 różne widma) lub standardowymi lampami stosowanym w uprawach zamkniętych. Czas naświetlania wynosił 15 godzin dziennie, co zapewniło odpowiednie tempo fotosyntezy i równomierny wzrost biomasy.



Fotografia 2. Uprawa sałaty w oświetleniu LED (4 widma) oraz kontrolnym

Kluczowym elementem systemu akwaponicznego jest obieg wody z hodowli ryb. Zagęszczenie ryb w zbiornikach zapewnia odpowiedni poziom metabolitów azotowych. Woda z basenów rybnych trafia do reaktora biologicznego, w którym pożyteczne mikroorganizmy przeprowadzają proces nitryfikacji – utleniają amoniak (NH_4^+) do azotanów (NO_3^-), przyswajalnych przez rośliny. Następnie, po przefiltrowaniu, wzbogacona pożywka trafia do basenów z sałatą. Woda, w której uprawiane są rośliny, charakteryzuje się stabilnymi parametrami: pH utrzymywane jest na poziomie 6,4, a przewodność elektryczna (EC) wynosi 1,81 mS/cm. Są to warunki sprzyjające zarówno korzeniom sałaty, jak i mikroorganizmom obecnym w systemie. Pożywka, na której wzrastała sałata miała następujący skład: N- NO_3 -143; P- PO_4 -3 14,7; K⁺ 155,0; Ca⁺² 196; Mg⁺² 41,8; Na⁺ 28,6; Cl⁻ 46,1; SO_4 -2 60; Fe 1,77;

Fe ogólne 1,78; Mn 1,20; Cu 0,45; Zn 0,95; B 0,53. W trakcie całego cyklu uprawowego regularnie pobierane są próbki pożywki celem monitorowania jej składu chemicznego i ewentualnego korygowania parametrów. System ten, łącząc nowoczesną technologię z zasadami zrównoważonego rozwoju, pozwala na efektywną produkcję świeżych warzyw przy minimalnym zużyciu wody i nawozów mineralnych. Sałata rzymska uprawiana w tym systemie jest nie tylko zdrowa i smaczna, ale także produkowana w sposób przyjazny dla środowiska.



Fotografia 3. System uprawy sałaty w basenach na półkach z oświetleniem LED oraz stałym obiegiem pożywki

Doświadczenie z rukolą oraz sadzonkami sałaty zostało założone na famie wertykalnej firmy Profesora Ziółko Grzegorz Skrobisz.

Uprawa rukoli (*Eruca sativa*), znanej również jako rókietta siewna, została przeprowadzona w systemie wertykalnym w warunkach kontrolowanych, umożliwiającym precyzyjne zarządzanie parametrami środowiskowymi oraz odżywczymi w trakcie całego cyklu wzrostu roślin. Proces uprawy obejmował zarówno fazę wegetatywną (siewka, sadzonka) jak i generatywną (roślina dorosła). Materiał siewny został umieszczony w kostkach wełny mineralnej marki GRODAN, zapewniających odpowiednią strukturę i wilgotność dla optymalnego kiełkowania. Po

ukorzeniu, siewki zostały przesadzone do doniczek wypełnionych podłożem kokosowo-perlitowym w stosunku 5:1, co zapewniło dobre warunki dla rozwoju systemu korzeniowego, a także odpowiednią retencję wody i dostęp powietrza. Na etapie początkowym (pierwsze dwa tygodnie uprawy) stosowano pożywkę o przewodnictwie elektrycznym (EC) na poziomie 1,5 mS/cm oraz pH wynoszącym 5,6. Składniki pokarmowe dostarczano w proporcjach NPK równych 12:6:16, co odpowiadało zapotrzebowaniu roślin na składniki niezbędne do intensywnego rozwoju wegetatywnego, z naciskiem na wzrost biomasy liściowej. Po upływie dwóch tygodni, wraz z przejściem roślin w bardziej zaawansowane fazy rozwojowe, parametry pożywki zmieniły się: wartość EC zwiększyła się do 1,6 mS/cm, a pH do poziomu 5,8, co wspierało dalszy dynamiczny wzrost i przygotowanie roślin do fazy generatywnej. Długość dnia utrzymywano na stałym poziomie 16 godzin na dobę, co zapewniało odpowiednią ilość światła do prowadzenia wydajnych procesów fotosyntezy oraz sprzyjało utrzymaniu optymalnej dynamiki wzrostu rukoli. Warunki klimatyczne w miejscu uprawy były utrzymywane na stałym poziomie: temperatura powietrza wynosiła 21,5°C, a wilgotność względna 55%, co sprzyjało prawidłowemu rozwojowi roślin oraz ograniczało ryzyko wystąpienia chorób grzybowych. Warunki te, w połączeniu z odpowiednio dobranym składem podłoża, pożywki i kontrolą parametrów środowiskowych, pozwoliły na realizację założonego doświadczenia.

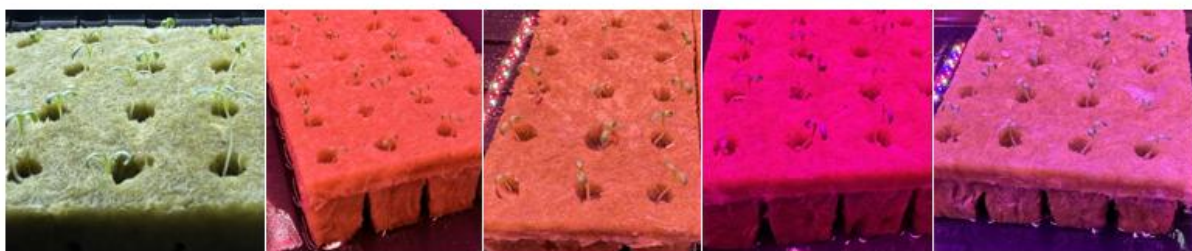


Fotografia 4. Uprawa rukoli w warunkach kontrolowanych oświetlana LED (4 widma) oraz kontrolnym – badanie śródkresowe

Uprawa sadzonek sałaty odmiany Verdaggio została przeprowadzona w warunkach kontrolowanych, z zastosowaniem nowoczesnych technologii uprawy wertykalnej i oświetlenia LED. Projekt obejmował fazę wegetatywną rozwoju roślin, tj. od momentu kiełkowania nasion do etapu w pełni rozwiniętej sadzonki. Wysiew nasion wykonano do kostek wełny mineralnej marki GRODAN, które zapewniały odpowiednią wilgotność oraz strukturę dla procesu kiełkowania i wstępnego wzrostu roślin. Po trzech dniach od siewu, młode siewki zostały przeniesione pod oświetlenie LED o widmach światła stosowanych w tym projekcie, co umożliwiło dalsze prowadzenie badań i uprawy w warunkach optymalnych dla fotosyntezy i



morfogenezy roślin. W trakcie całego procesu uprawy długość dnia ustalono na 16 godzin, co stymulowało intensywny rozwój części nadziemnych oraz sprzyjało formowaniu zwartej, zdrowej rozety liściowej, typowej dla wysokiej jakości sadzonek sałaty. Warunki klimatyczne w miejscu uprawy były utrzymywane na stałym poziomie: temperatura powietrza wynosiła 21,5°C, a wilgotność względna 55%, co sprzyjało prawidłowemu rozwojowi roślin oraz ograniczało ryzyko wystąpienia chorób grzybowych. Odżywianie roślin realizowano poprzez dostarczanie pożywki o stałym składzie makroskładników w proporcjach NPK wynoszących 12:6:16. Taki bilans składników pokarmowych zapewniał harmonijny rozwój sadzonek, wspierając dynamiczny wzrost masy liściowej przy zachowaniu odpowiednich proporcji pomiędzy azotem, fosforem a potasem – kluczowych pierwiastków w fazie wegetatywnej. Parametry fizykochemiczne pożywki utrzymywano na poziomie EC = 1,2 mS/cm oraz pH = 5,7, zapewniając optymalną dostępność składników pokarmowych i stabilne warunki dla pobierania wody oraz jonów przez system korzeniowy. W wyniku zastosowania precyzyjnej kontroli warunków środowiskowych oraz odpowiedniego zarządzania nawożeniem, uzyskano sadzonki o wyrównanej strukturze, dobrze rozwiniętym systemie korzeniowym i wysokim potencjale dalszego wzrostu, spełniające standardy jakości wymagane w profesjonalnej produkcji warzywnej.



Fotografia 5. Uprawa rozsady sałaty w warunkach kontrolowanych oświetlana LED (4 widma) oraz kontrolnym – badanie śródkresowe

Ponadto, w celach kontrolnych zbudowano system farmy wertykalnej z doświetlaniem LED w lokalizacji firmy Łukasz Czech Agrowe, gdzie prowadzono doświadczenia z sałatą, rukolą oraz produkcją rozsady sałaty. Utrzymywanie farmy wertykalnej jako stałego elementu infrastruktury badawczej umożliwia bieżący monitoring parametrów wzrostu i rozwoju roślin, co stanowi cenne źródło danych do dalszych prac rozwojowych. Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwe jest szybkie testowanie nowych konfiguracji oświetlenia, składów pożywek czy parametrów mikroklimatu, bez konieczności każdorazowego uruchamiania kosztownych cykli eksperymentalnych. W praktyce pozwala to "mieć zawsze rękę na pulsie" i elastycznie reagować na potrzeby badawcze oraz rynkowe.

W gospodarstwie rolnym Dariusza Pawlaka zostało zlokalizowane doświadczenie z doświetlaniem uprawy truskawki. Truskawka w tej lokalizacji jest uprawiana w tunelach

foliowych otwartych, nieogrzewanych, prowadzona na podłożu substratowym. Taki system uprawy stanowi coraz popularniejszą metodę produkcji owoców w Polsce, zwłaszcza wśród plantatorów dążących do uzyskania wcześniejszych i bardziej wyrównanych plonów. System ten łączy zalety uprawy pod osłonami z większą kontrolą nad warunkami rozwoju roślin oraz ich systemem korzeniowym, co przekłada się na wyższą jakość i zdrowotność plonu. Tunele, w których prowadzona jest uprawa, to lekkie konstrukcje pokryte przezroczystą folią polietylenową, otwarte na obu końcach, co zapewnia dobrą wentylację i pozwala uniknąć nadmiernego przegrzewania w cieplejsze dni. Brak ogrzewania sprawia, że uprawa pozostaje niskonakładowa pod względem energetycznym, jednocześnie chroniąc rośliny przed przymrozkami i opadami atmosferycznymi w okresie wczesnowiosennym. Taki system sprzyja przyspieszeniu wegetacji w porównaniu z uprawą gruntową w polu otwartym.



Fotografia 6. Uprawa truskawek w tunelach foliowych w rynnach na podłożu substratowym



Fotografia 7. System fertygacji w uprawie truskawki na podłożu substratowym

Truskawki uprawiane są w specjalnych rynnach, skrzynkach lub workach wypełnionych substratem organicznym – najczęściej mieszaniną torfu, włókna kokosowego i perlitu. Podłoże to zapewnia odpowiednią strukturę, zatrzymywanie wody oraz dostępność powietrza dla korzeni, co jest kluczowe dla zdrowego wzrostu i owocowania roślin. Substrat jest wolny od patogenów glebowych, co zmniejsza konieczność stosowania środków ochrony roślin i pozwala utrzymać wysoki poziom higieny uprawy.



Fotografia 8. Podłoże substratowe do uprawy truskawki

Rośliny sadzone są jako gotowe sadzonki frigo, co pozwala na precyzyjne planowanie terminu zbiorów. System uprawy oparty był na fertygacji, czyli jednoczesnym nawadnianiu i

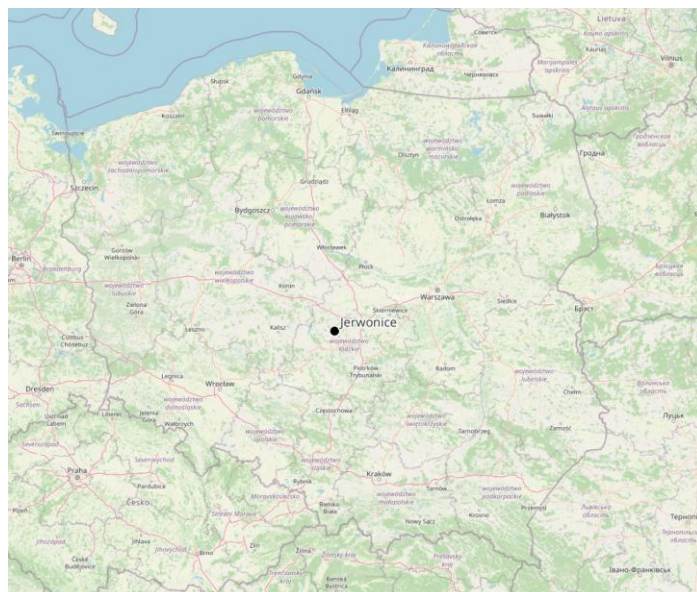


nawożeniu, przy pomocy linii kroplujących. Dzięki temu możliwe jest dokładne dostarczanie wody i składników pokarmowych w zależności od potrzeb roślin na różnych etapach rozwoju – od kwitnienia, przez zawiązywanie owoców, aż po ich dojrzewanie.

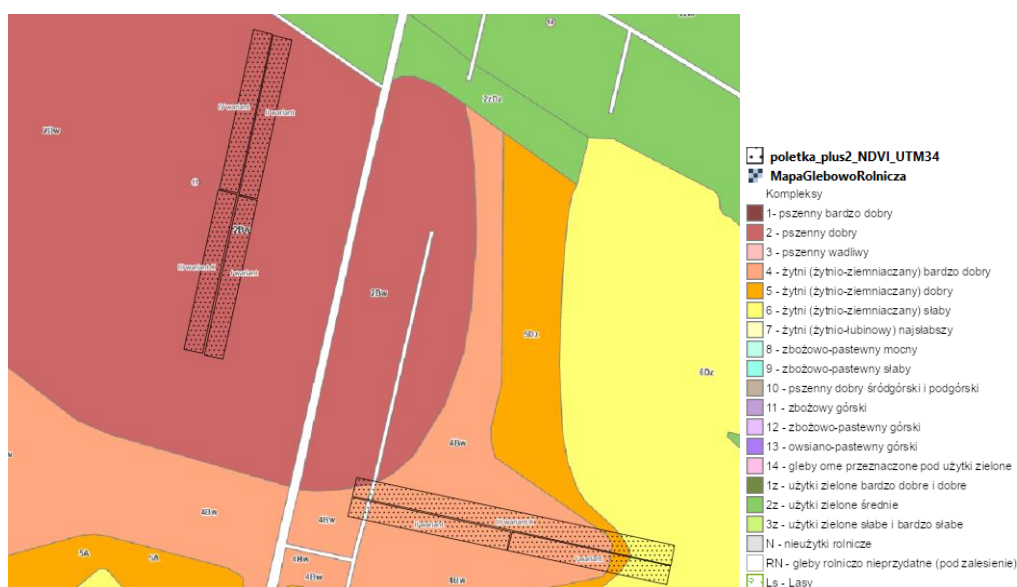
W tunelach utrzymywana jest stabilna, podwyższona temperatura w ciągu dnia, co sprzyja wcześniejszemu kwitnieniu i dojrzewaniu owoców. Z kolei osłona folii zabezpiecza kwiaty przed uszkodzeniami mrozowymi oraz ogranicza ryzyko wystąpienia chorób grzybowych wywołanych nadmierną wilgocą, jak szara pleśń.

3.2.2. Doświadczenia polowe

Doświadczenie polowe z uprawą pszenicy zlokalizowane zostało w Gospodarstwie Rolnym Dariusza Pawlaka w miejscowości Jerwonice w centralnej Polsce, w województwie łódzkim, na obszarze Wysoczyzny Łaskiej, stanowiącej część Wyżyny Łódzkiej. Współrzędne geograficzne doświadczenia to 51°46'19"N 19°07'38"E. Teren ten charakteryzuje się lekko falistym krajobrazem, a średnia wysokość nad poziomem morza wynosi około 200 metrów. Klimat Jerwonice ma cechy klimatu umiarkowanego przejściowego, z dość wyraźnymi wpływami zarówno klimatu morskiego, jak i kontynentalnego. Średnie roczne opady wynoszą około 550–600 mm, a średnia temperatura roczna oscyluje wokół 7–8°C. Gleby należą głównie do brunatnych i płowych, często wytworzonych z utworów gliniastych i lessowych. Występują tu także mozaiki gleb lekkich i średnich o przeciętnej lub niskiej klasie gleb. Doświadczenie było założone na glebach brunatnych wylugowanych (Bw) oraz czarnych ziemiach zdegradowanych (Dz) na kompleksach przydatności rolniczej: 2 – pszeniczny dobry; 4 – żytni bardzo dobry oraz częściowo na kompleksie 5 i 6, czyli żytnim dobrym i żytnim słabym. Rysunek 2 przedstawia mapę glebowo-rolniczą wraz z położeniem poszczególnych poletek doświadczalnych.



Rysunek 1. Mapa Polski przedstawiająca lokalizację doświadczenia w miejscowości Jeronice.



Rysunek 2. Mapa przedstawiająca lokalizację poletek doświadczalnych na tle mapy glebowo-rolniczej z typami gleb i kompleksami przydatności (Bw - gleby brunatne wylugowane i brunatne kwaśne; Dz czarne ziemie zdegradowane i gleby szare).

3.3. Innowacyjny system oświetlenia LED do wspomagania wzrostu roślin wytworzony w ramach projektu

Na potrzeby zaplanowanych i prowadzonych badań w ramach projektu, firma Umola opracowała innowacyjne podejście do projektowania oświetlenia LED, dostosowanego do potrzeb eksperymentów z udziałem różnych gatunków roślin. Efektem tego procesu było



stworzenie czterech wariantów lamp LED, zróżnicowanych pod względem składu widmowego i parametrów promieniowania. Warianty te oznaczone zostały jako LED 1 – RW, LED 2 – RWFR, LED 3 – RB oraz LED 4 – BW, każdy charakteryzujący się unikalnym zestawem parametrów świetlnych.

Pierwszy wariant, LED 1 – RW (Rysunek 3, Rysunek 7), wyróżnia się wysokim udziałem czerwieni (70%) i umiarkowanymi poziomami zieleni (18%) oraz niebieskiego światła (12%). To podejście skupia się na dostarczaniu specyficznych długości fal, wspierających procesy fotosyntezy i wzrost roślin.

Drugi wariant, LED 2 – RWFR (Rysunek 4, Rysunek 8), zawiera nieco mniej czerwonego światła (68%), ale wyższe niż w poprzednim przypadku udziały niebieskiego (8%) oraz dodatkowe spektrum dalekiej czerwieni (8%). Taki zrównoważony miks ma na celu optymalizację absorpcji światła przez rośliny, wspierając ich metabolizm i rozwój.

Trzeci wariant, LED 3 – RB (Rysunek 5, Rysunek 9), charakteryzuje się dominacją dalekiej czerwieni (90%) oraz mniejszymi ilościami niebieskiego (10%). Takie podejście koncentruje się na głębokim przenikaniu światła do roślin, wspomagając ich rozwój korzeni i procesy kwitnienia.

Czwarty wariant, LED 4 – BW (Rysunek 6, Rysunek 10), jest mieszanką niebieskiego (25%) i czerwonego (65%) światła, z naciskiem na krótsze fale niebieskie wspomagające strukturalny wzrost roślin. Ten model jest skoncentrowany na równowadze między różnymi spektrami, wspierając ogólny rozwój i zdrowie roślin.

Zaprojektowane warianty oświetlenia różniły się nie tylko składem widmowym, ale również parametrami fotometrycznymi i radiometrycznymi, takimi jak: strumień świetlny, efektywność świetlna, całkowity strumień fotonów aktywnych fotosyntetycznie (PPF), rozkład spektralny promieniowania w zakresie PAR oraz wartość barwy dominującej (Tabela 1). Każdy z tych parametrów został dostosowany w taki sposób, aby umożliwić prowadzenie badań w warunkach maksymalnie zbliżonych do naturalnych, a zarazem umożliwić precyzyjną kontrolę warunków świetlnych w środowisku wzrostu. Dzięki temu możliwe było uzyskanie spójnych, porównywalnych i powtarzalnych wyników, co ma kluczowe znaczenie w badaniach eksperymentalnych z zakresu biologii roślin i technologii produkcji żywności.

Innowacyjność tych podejść polega na precyzyjnym dostosowaniu proporcji barw oraz intensywności światła, co umożliwia skuteczniejsze wykorzystanie energii świetlnej przez rośliny, przy jednoczesnym minimalizowaniu zużycia energii. Wyniki tych eksperymentów mają kluczowe znaczenie dla dalszych badań nad optymalizacją warunków uprawy roślin przy użyciu technologii LED

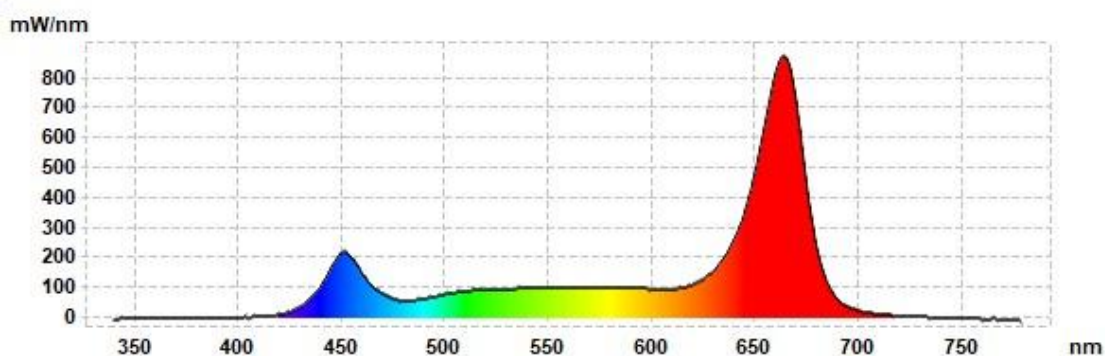
Szczegółowe charakterystyki tych wariantów opisano w dalszej części raportu.



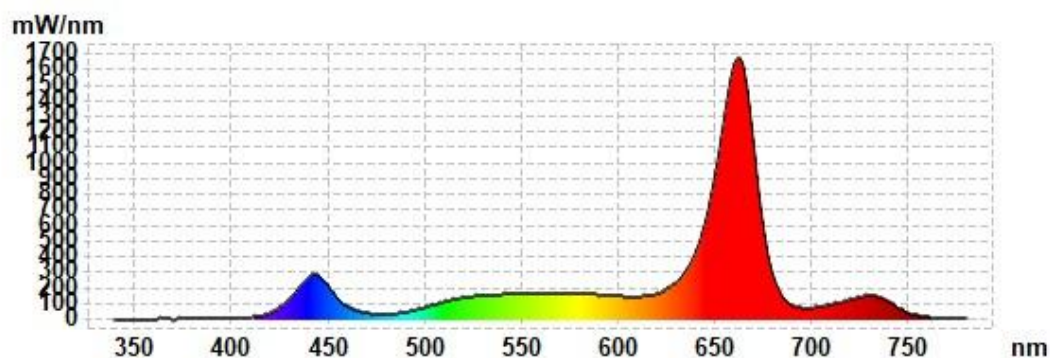
Tabela 1. Parametry fotometryczne, wytworzonego oświetlenia LED

Parametr	Kody wytworzonego oświetlenia			
	LED 1 - RW	LED 2 - RWFR	LED 3 - RB	LED 4 - BW
PROPORCJE BARW				
FR (>700NM)	0%	8%	0%	0%
RED (600-700NM)	70%	68%	90%	65%
GREEN (500-600NM)	18%	16%	0%	10%
BLUE (400-500NM)	12%	8%	10%	25%
Dane CIE 1931				
x	0,3931	0,4265	0,4272	0,3043
y	0,3175	0,3319	0,1454	0,1700
u'	0,2611	0,2783	0,4393	0,2746
v'	0,4744	0,4873	0,3363	0,3453
L	100,00	100,00	100,00	100,00
a	46,08	52,87	228,44	117,39
b	11,51	25,15	-78,51	-83,22
X	9548,98	15476,28	12872,67	17356,58
Strumień świetlny	7711,76 lm	12044,01 lm	4379,88 lm	9699,63 lm
Z	7028,87	8763,34	12877,95	29990,84
Podsumowanie rozkładu widmowego				
CCT	3047 K	2511 K	- K	- K
Wartość maks.	664,09	662,31	660,53	660,53
Dominanta barwy	699,0	611,9	601,5	360,0
Radiometria	44,9514	78,0611	81,3518	84,7473
Skuteczność świetlna		88,58 lm/W	34,97 lm/W	67,79 lm/W
PAR	-	-	-	-
PPFD	-	-	-	-
PPF	230,891	374,586	430,645	409,351
PBAR flux	231,918	407,064	431,106	411,201
YPF	172,45	283,85	352,91	327,50
PPF UV (<400nm)	0	0	0	0,012
PPF blue (400-499nm)	26,66	30,80	42,83	101,01
PPF green (500-599nm)	42,34	65,28	0,44	44,27
PPF red (600-700nm)	161,89	278,50	387,37	264,07
PPF IR (>700)	1,03	32,48	0,46	1,84
PPF R/B	6,07	9,04	9,04	2,61
PPF R/IR	157,64	8,58	840,48	143,62
PARF	33,98 W	55,14 W	67,58 W	68,46 W
CRI				
Ra	59,5	62,6	-81,5	3,2
R1	53,9	62,3	-100,0	-25,8
R2	73,4	85,4	-100,0	11,9
R3	90,5	74,2	-100,0	85,8
R4	58,4	57,8	-2,2	9,2
R5	52,9	62,5	-100,0	-23,3
R6	74,7	93,2	-100,0	14,0
R7	68,2	59,9	-49,9	54,0
R8	4,0	5,4	-100,0	-100,0
R9	-100,0	-86,6	-100,0	-100,0
R10	42,6	71,3	-100,0	-71,1
R11	51,6	53,1	-4,6	-1,3
R12	39,6	70,2	-100,0	-57,0

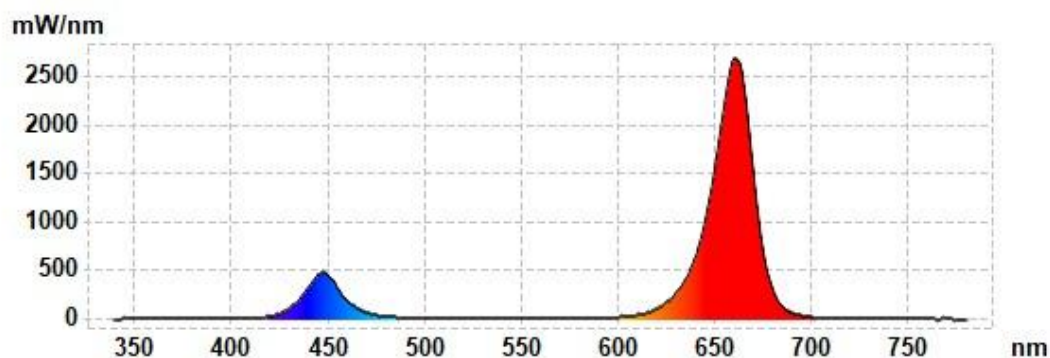
R13	56,1	66,3	-100,0	-27,3
R14	93,2	83,9	-100,0	83,0



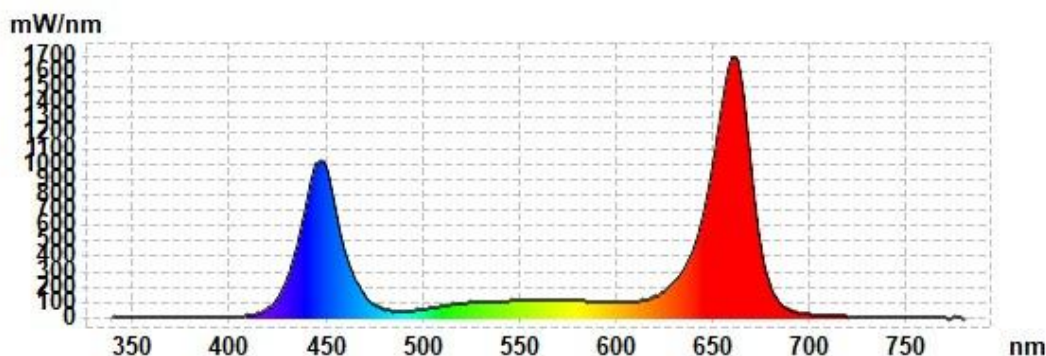
Rysunek 3. Rozkład widmowy dla lamp w układzie czynnikowym – LED 1 - RW



Rysunek 4. Rozkład widmowy dla lamp w układzie czynnikowym – LED 2 - RWFR

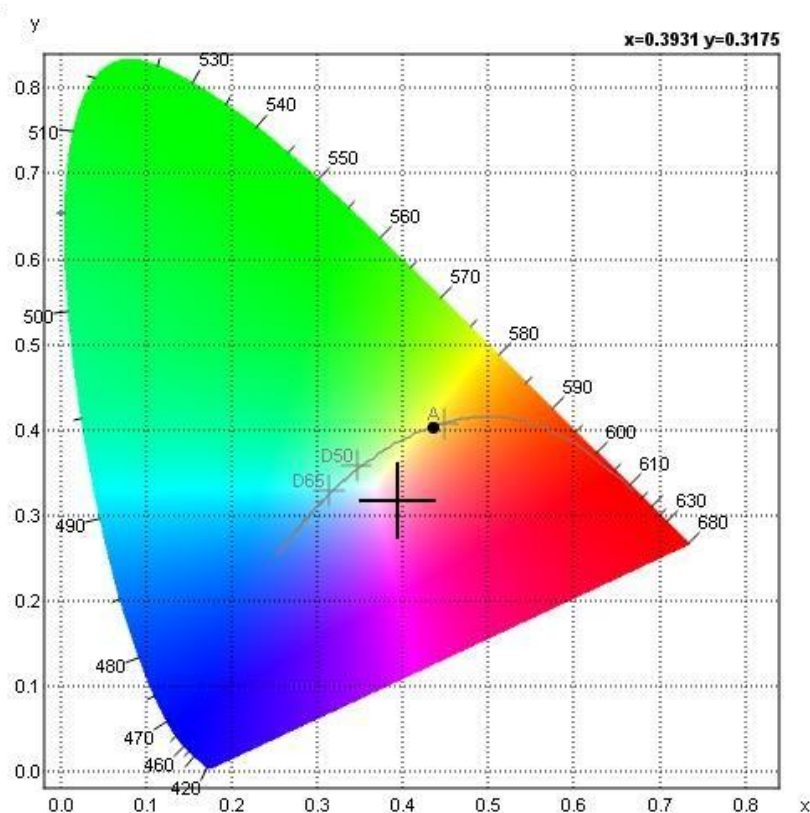


Rysunek 5. Rozkład widmowy dla lamp w układzie czynnikowym – LED 3 - RB

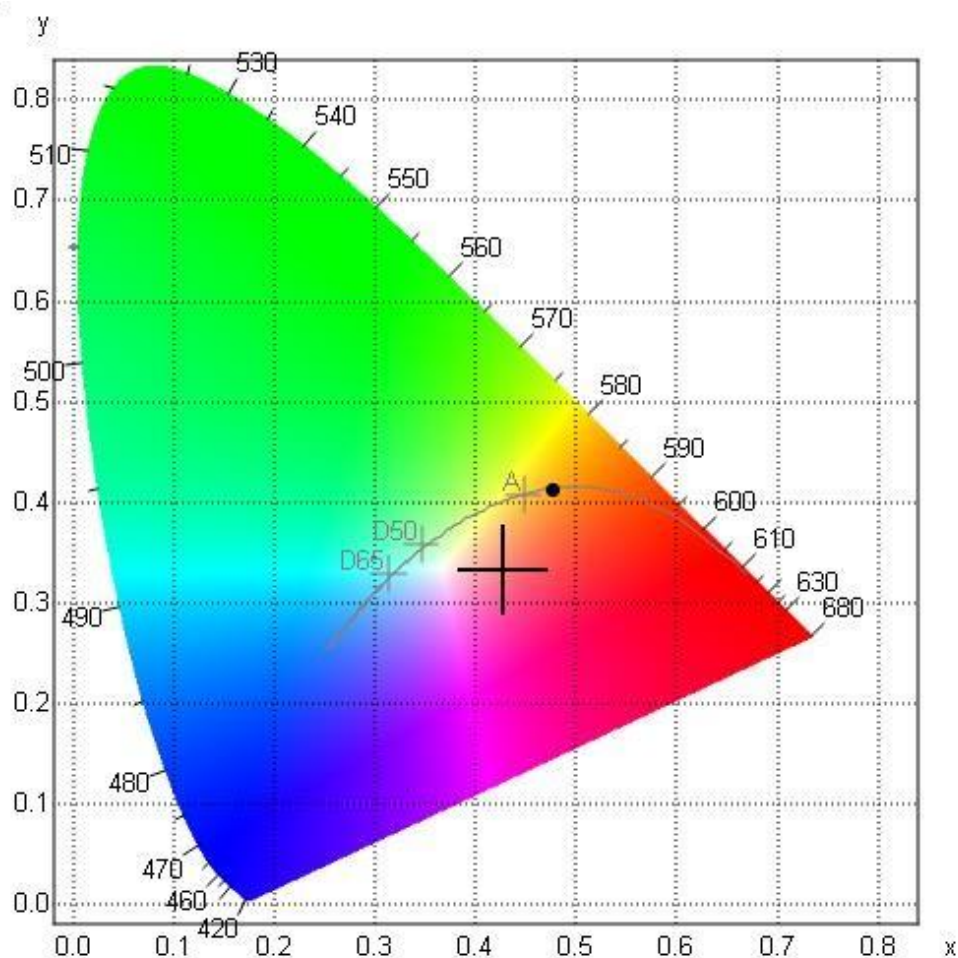


Rysunek 6. Rozkład widmowy dla lamp w układzie czynnikiemowym – LED 4 – BW

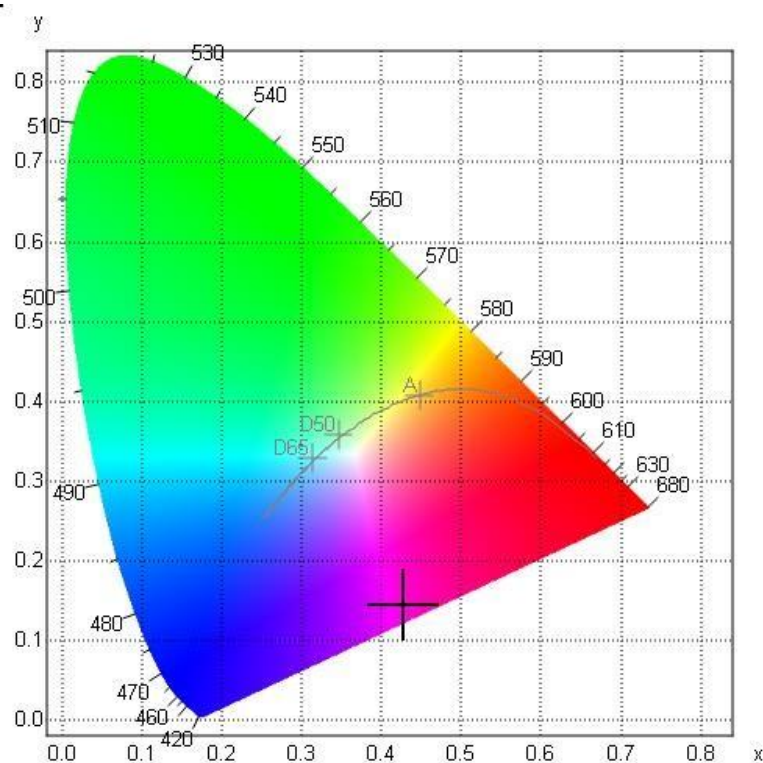
Diagram chromatyczności CIE 1931 przedstawia sposób, w jaki ludzkie oko postrzega kolory. Jest to dwuwymiarowy wykres, na którym zaznaczone są wszystkie barwy widzialne dla człowieka. Oś pozioma i pionowa odpowiadają współrzędnym chromatyczności x i y , które określają odcień koloru, niezależnie od jego jasności. Na obrzeżach wykresu znajdują się barwy spektralne – czyste kolory odpowiadające konkretnym długościom fal światła, takie jak zieleń, czerwień czy błękit. Wewnątrz obszaru kolory są mniej nasycone – są to mieszanki barw.



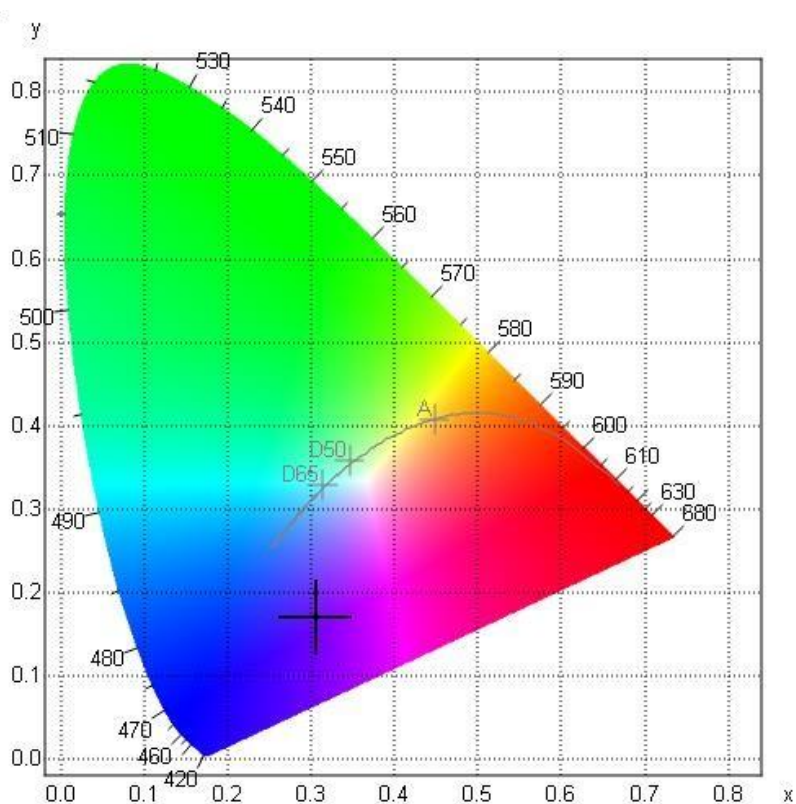
Rysunek 7. Wykres chromatyczności (trójkąt barw) dla lamp w układzie czynnikiemowym – LED 1 - RW



Rysunek 8. Wykres chromatyczności (trójkąt barw) dla lamp w układzie czynnikiemowym – LED 2 - RWFR



Rysunek 9. Wykres chromatyczności (trójkąt barw) dla lamp w układzie czynnikiem – LED 3 - RB



Rysunek 10. Wykres chromatyczności (trójkąt barw) dla lamp w układzie czynnikiem – LED 4 – BW



4. Metodyka badań

W ramach prac badawczych i rozwojowych przebadano następujące obszary w celu wytworzenia innowacji i realizacji operacji:

4.1. Analiza procesu fotosyntezy przy odpowiednim oświetleniu LED

Koniecznym czynnikiem wzrostu roślin jest światło. Wpływa ono nie tylko na przebieg fotosyntezy, lecz również na szereg innych procesów fizjologicznych takich jak kiełkowanie, wzrost, ruchy oraz kwitnienie roślin. Energia świetlna jest głównym czynnikiem, dzięki któremu zachodzi proces fotosyntezy, w którym wytwarzane są związki organiczne. Niedobory promieniowania słonecznego w okresie wegetacji roślin mogą wpływać na obniżenie plonów roślin. Jest to wynikiem selektywnego pochłaniania światła przez chlorofil. W produkcji szklarniowej stosowane są coraz nowsze formy oświetlenia z uwagi na rośliny dla których najważniejszym jest osiągnięcie punktu kompensacyjnego, w którym to równoważą one procesy pobierania i wydalenia dwutlenku węgla. Dopasowanie światła pozwoliło na zapewnienie jak najlepszych warunków rozwojowych roślin. Diody elektroluminescencyjne w porównaniu do tradycyjnych form oświetlenia wyróżniają się wieloma zaletami takimi jak: niewielkie rozmiary, długa żywotność, brak emisji promieniowania długofalowego a także możliwość wyboru określonych długości fal i kompozycji dowolnego spektrum. Sprawia to, że budzą wielkie nadzieje na wzrost efektywności upraw wymagających naświetlania lub doświetlania. Stosowane aktualnie systemy oświetleniowe w uprawach ogrodniczych oparte na żarówkach metalohalogenkowych oraz sodowych wysokociśnieniowych, charakteryzują się szerokim widmem spektralnym. Obejmuje ono promieniowanie ultrafioletowe UV, fotosyntetyczne czynne a także bliską podczerwień – NIR. Szerokie spektrum zapewnia zarówno efekt fotosyntetyczny czyli zapewnienie stałego procesu fotosyntezy, jak również pozwala roślinom odbierać sygnały świetlne, a więc wpływać na ich fotomorfogenezę. Jednak brak regulacji poszczególnych zakresów widmowych uniemożliwia dopasowanie oświetlenia tradycyjnego do wymagań konkretnych gatunków roślin. Budowa lamp z zastosowaniem diod LED, umożliwia dokonywanie wyboru wąskich zakresów widmowych, które są wydajne fotosyntetycznie lub fotomorfogenetycznie jednocześnie unikając zakresów potencjalnie niekorzystnych. Najczęściej widma lamp wykorzystujących diody LED, próbują naśladować widma absorpcji chlorofilu i emitują światło czerwone wraz z niebieskim, w różnych proporcjach, najczęściej od 10:1 do 3:1. Rzadziej są stosowane diody koloru zielonego, uważanego przez wiele lat za mało efektywne fotosyntetycznie. Dodatek diod emitujących daleką czerwień ok. 725 oraz UV ma znaczenie jedynie fotomorfogenetyczne co oznacza, że światło reguluje procesy zachodzące w roślinach podczas całego życia. Chlorofil liści zielonych wykazuje najwyższą absorpcję w zakresie widm fioletowo-niebieskim oraz czerwonym i minimalną w



zielono-żółtym. Przeprowadzenie tej analizy było istotnym elementem podczas prowadzenia badań w kierunku innowacji. Przeprowadzenie badań pozwoliło na doprecyzowanie długości widm i intensywności światła przy którym proces fotosyntezy jest najefektywniejszy. W ten sposób możliwe było dopasowanie odpowiedniego naświetlenia do uprawy.

Analiza procesu fotosyntezy opierała się na obliczeniu zawartości chlorofilu a i b poprzez badania laboratoryjne oraz odczyty przenośnym urządzeniem z możliwością analizy widma. Pobieranie prób przeprowadzone było w formie trzech kampanii pomiarowych na losowo wytypowanych liściach truskawki i sałaty: pierwszego dnia wstawienia rozsady, 15 dnia po wstawieniu, oraz 30 dnia lub w momencie zakończenia cyklu w momencie zbioru plonów, w przypadku rukoli terminy pobrania prób przypadają na pierwszy dzień wstawienia rozsady 7 dzień od wstawienia rozsady, oraz 14 dzień będący zakończeniem cyklu uprawy w momencie zbioru plonów. W analizie udział brało 5 grup badawczych, z których 4 były doświetlane różnymi widmami światła LED oraz jedną grupą kontrolną, uprawianą wyłącznie w świetle naturalnym (lub stosowanym standardowo w uprawach zamkniętych). Obiektem badań były również sadzonki wytypowanych do projektu roślin. Decyzja ta była argumentowana napotykaniami niskiej jakości rozsady na rynku, która spowodowana jest najczęściej niedostateczną ilością światła. Ma ono wpływ na prawidłowy rozwój roślin szczególnie ich wzrost rozkrzewienie oraz inicjację pąków. Dlatego też prowadzone w projekcie badania obejmują sadzonki w celu dostarczenia rolnikom wysokiej jakości rozsady. Przed dostarczeniem materiału badanego do laboratorium przeprowadzona została analiza indeksów zdrowia roślin VIS-NIR spektrum o zakresie fal 400 – 1000 nm. Badanie polegało na przyłożeniu urządzenia do liścia rośliny, dzięki zastosowaniu własnego źródła światła oraz bezpośredniemu połączeniu z bankiem energii, którym jest telefon komórkowy wyniki pomiarów zapisują się w wybranym przez nas miejscu np. OneDrive, Google Drive czy sama aplikacja urządzenia, z której możemy importować dane w formie edytowalnej. Dzięki temu badaniu poznano indeksy chlorofilowe, żelaza oraz wody. Do przeprowadzenia dokładnych badań fotosyntezy i chlorofilów a i b próbki zostały przebadane laboratoryjnie. W tym celu liście (badane próbki) dostarczone do akredytowanego laboratorium.

Badania te były niezbędne w procesie tworzenia innowacji, ze względu na korelację zależności pomiędzy odpowiednio dobranym widmem światła LED a prawidłowymi, efektywnymi procesami fotosyntezy w roślinach. Dzięki tym analizom uzyskano niepodważalne dane świadczące o konieczności regulacji widm LED na danej uprawie.

4.2. Analiza wpływu światła LED na pobieranie składników pokarmowych

Warunki świetlne są bardzo ważnym czynnikiem w procesie odżywiania roślin. Składniki pokarmowe mają fundamentalne znaczenie dla ich wzrostu i rozwoju. Dla wydania



odpowiedniego plonu potrzebują one wszelkich niezbędnych składników pokarmowych, które pobierane są w większych ilościach - w przypadku makroelementów oraz mniejszych ilościach w przypadku mikroelementów. Jeśli jednego ze składników pokarmowych zaczyna roślinie brakować, jej wzrost ulega zahamowaniu, a ponadto roślina kończy zbyt wcześnie swój cykl życiowy przez co nie jest możliwe uzyskanie odpowiedniego plonu. Na pobieranie składników pokarmowych wpływają warunki świetlne panujące podczas okresu wegetacyjnego danej rośliny. Światło a dokładniej fale elektromagnetyczne wzmagają transport jonów w roślinie co powoduje otwieranie aparatów szparkowych, przez co rozpoczyna się ruch transpiracyjny wody i tym samym bierny transport jonów. Światło ma także wpływ na aktywne pobieranie jonów z podłoża, bowiem asymilaty powstałe w procesie fotosyntezy są dla korzeni substratami oddechowymi, a uwolniona z nich energia zwiększa aktywne pobieranie jonów z podłoża dlatego podczas długotrwałej pochmurnej pogody mogą występować niedobory fosforu, potasu i magnezu poprzez zahamowanie procesu fotosyntezy oraz pobierania jonów. Może to mieć również niekorzystny wpływ na pobieranie mikroelementów takich jak żelazo, mangan czy bor. Podsumowując, objawy niedoboru składników pokarmowych wynikają bardzo często nie tylko z braku określonego składnika w podłożu lub w glebie ale również z zaburzenia warunków świetlnych. Analiza ta była istotnym elementem podczas prowadzenia badań w kierunku innowacji. Doprecyzowała ona długość widm i intensywności światła, przy którym pobieranie składników pokarmowych jest najefektywniejsze. W ten sposób możliwe było skrócenie cyklu uprawy dzięki optymalnym warunkom świetlnym jednocześnie podnosząc jakość surowca dzięki zapewnieniu odpowiednich warunków dla rozwoju.

Analiza wpływu światła LED na pobieranie składników pokarmowych została przeprowadzona trzykrotnie w trakcie trwania jednego cyklu uprawy każdej z badanych roślin. Próby zostały pobrane na zasadzie losowej selekcji w następujących etapach: pierwsze badanie oraz pobranie nastąpiło w momencie wstawienia rozsad pod osłony drugie pobranie nastąpiło po 15 dniach trwania cyklu a trzecie pobranie nastąpiło w momencie zakończenia cyklu i tym samym zbioru plonów w przypadku uprawy rukoli pierwsze pobranie również odbyło się w momencie wstawienia rozsad do obiektu, drugie pobranie odbyło się po 7 dniach uprawy a trzecie pobranie odbyło się 14 dnia w momencie zakończenia cyklu oraz zbioru plonów. Projekt zakładał utworzenie pięciu grup badawczych, w których jedna była grupą kontrolną uprawianą w świetle wyłącznie naturalnym (lub stosowanym standardowo w uprawach zamkniętych), cztery pozostałe podległy naświetlaniu w różnych widmach oświetlenia LED. Losowo wytypowane rośliny zostały przebadane spektrofotometrem QED w celu ustalenia indeksów chlorofilowych, żelaza, wody oraz czynników stresowych następnie były przekazane do laboratorium akredytowanego. Badania prowadzone urządzeniem QED polegały na przyłożeniu spektrofotometru do liścia rośliny oraz dokonaniu pomiaru w spektrum pomiędzy



400 a 1000 nm. W tym wypadku do urządzenia wykorzystany został telefon komórkowy. Wyniki pomiarów były dostępne w formie edytowalnej, pozwalającej również na eksportowanie plików na wybrane, umożliwiające ich odczyt nośniki oraz urządzenia cyfrowe. Analizie poddane zostały indeksy zawarte w roślinach. Wyniki tych analiz pozwoliły w sposób precyzyjny ustalić zachowanie roślin oraz pobieranie przez nie składników pokarmowych względem użytego do ich naświetlania widma LED. Było to badanie niezbędne do wytworzenia innowacji gdyż w oparciu o uzyskane wyniki możliwe jest podejmowanie decyzji dążących do uzyskania założonych celów względem wytworzenia produktu dokładnego oraz precyzyjnego.

4.3. Badanie wpływu światła LED na długość wzrostu roślin

Warunki oświetleniowe są jednym z ważniejszych czynników wpływających na długość wzrostu roślin. Ich wzrost i rozwój to procesy zachodzące jednocześnie lub oddzielnie w jej organizmie. Przez wzrost w fizjologii rozwoju rozumie się proces nieodwracalnego powiększania biomasy rośliny. Zachodzi on w określonych strefach w wyniku podziałów komórek i zwiększania ich objętości. Długość wzrostu roślin jest czynnikiem, który można regulować udziałem światła LED. Dzięki odpowiedniemu naświetleniu zarządzany jest proces fotosyntezy, podczas którego spalane są cukry. Brak światła hamuje rozrost korzeni, dlatego w warunkach charakteryzujących się ograniczonym dostępem do światła niezbędne jest zastosowanie oświetlenia LED. Dobierając odpowiednią kombinację diod emitujących światło o różnej barwie można idealnie dopasować spektrum jego emisji do widma absorpcji roślin. Liczne badania potwierdzają, że oświetlenie LED pozytywnie wpływa na przyspieszenie tempa wzrostu roślin oraz wielkości i jakości plonu. Odpowiednie oświetlenie pobudza procesy fotosyntezy co przyczynia się do dynamicznego rozwoju. Światło czerwone (600–700 nm) odznacza się dużą wydajnością w procesie fotosyntezy i wpływa na tworzenie oraz rozwój liści, a także produkcję chlorofilu. Światło czerwone hamuje wzrost elongacyjny roślin - wydłużanie. Jest to podstawowy kolor we wszystkich systemach oświetleniowych wykorzystywanych w szklarniach. Światło niebieskie (400–500 nm) jest bardzo istotne ze względu na jego wpływ na morfologię roślin. Redukuje wydłużanie łodyg, powoduje tworzenie mniejszych, grubszych liści o wyższej zawartości chlorofilu, działa zatem podobnie jak chemiczne retardanty. Ponadto wpływa na poprawę pracy aparatów szparkowych. Światło zielone (500–600 nm) daje efekt przeciwny do światła niebieskiego, ponieważ powoduje wydłużanie łodyg i rozłożysty pokrój roślin. Jest to światło o małej efektywności fotosyntezy. Daleka czerwień (700–800 nm) wywołuje w roślinach tzw. syndrom unikania cienia, tj. stymuluje wzrost elongacyjny, ogranicza rozgałęzianie, liście stają się cienkie i duże, stymuluje kwitnienie i ukorzenianie. Efekt dodatniego wpływu dalekiej czerwieni na ukorzenianie się roślin można wykorzystać przy produkcji sadzonek. Najlepiej jest stosować je w połączeniu ze światłem niebieskim, które sprawia, że młode rośliny nie wyciągają się i pozostają zwarte.



Poznanie możliwości wpływu oświetlenia LED na długość wzrostu roślin pozwoliło określić optymalny zakres dla każdej rośliny, w którym ustalone widmo pozwalało uzyskać najlepsze efekty wzrostowe. Badanie to było niezbędne do przeprowadzenia w trakcie trwania procesu tworzenia innowacji. Jego wyniki pozwoliły na określenie wpływu stosowanego oświetlenia LED o różnych długościach fal na wzrost roślin. Dzięki korelacji danych możliwe jest wywnioskowanie, które z nich jest odpowiednie i ma pozytywny wpływ na rozwój roślin.

Badanie wpływu światła LED na długość wzrostu roślin było prowadzone na bieżąco w trakcie trwania cykli w każdej z założonych grup. Polegało na analizie spektrofotometrycznej truskawki, sałaty oraz rukoli, w celu kontroli indeksów chlorofilowych, stresowych, wodnych a także ich zieloności. Pomiary przeprowadzone zostały przenośnym spektrofotometrem i polegały na zbieraniu odczytów z liści roślin (owoców w przypadku truskawki) w celu analizy wyżej wymienionych indeksów. Ocenie poddany został również czas w jakim rośliny przechodzą cykl rozwojowy od momentu rozpoczęcia uprawy do etapu końcowego, którym jest sprzedaż plonów. W standardowych uprawach akwaponicznych sałaty, cykl trwa od 30 do 45 dni, uprawach hydroponicznych rukoli 21 – 30 dni, natomiast truskawki na podłożu substratowym 60 – 70 dni. Badanie to istotnie wpłynęło na tworzenie innowacji ze względu na prostą ocenę, które ze stosowanych widm LED przyczynia się do skrócenia cyklu uprawy.

Był to kluczowy element ze względu na istotny wpływ zwiększania dochodowości gospodarstwa. Skrócenie czasu od momentu wstawienia rozsady do obiektu do momentu zbioru dojrzałej rośliny pozwoli na zwiększenie liczby cykli w ciągu roku, a finalnie powiększenie plonu końcowego oraz dochodów gospodarstwa.

4.4. Badanie wpływu światła LED na właściwości rośliny

Warunki oświetleniowe są jednym z najważniejszych czynników wpływających na aktywność fotooksydacyjną, która to z kolei odpowiada za procesy biochemiczne w roślinie. Odpowiednie oświetlenie pobudza procesy fotochronne i wzrostowe roślin co może wpływać na właściwości chemiczne owoców. Tak więc synteza związków bioaktywnych i przeciwutleniaczy w roślinie może być wyzwalana przez zastosowanie różnych pasm LED, wpływając w ten sposób na jakość odżywczą roślin. Dlatego ich odpowiednie oświetlenie ma kluczowe znaczenie w przypadku chęci uzyskania wysokiej jakości produktów. Różne konfiguracje światła LED mogą wpływać na zawartość przeciwutleniaczy i polifenoli, których stymulacja może odbywać się poprzez odpowiednie dawkowanie światłem czerwonym i niebieskim. Kolejną zmienną, na którą ma wpływ intensywność oświetlenia LED jest stężenie związków fenolowych w roślinie. Związki fenolowe są naturalnymi metabolitami wtórnymi w warzywach, ziołach i owocach. Odpowiadają między innymi za smak, aromat oraz kolor płodów. Te zmienne będą głównym wyznacznikiem pomyślności prowadzonych badań oraz wyznacznikami skuteczności



stosowania oświetlenia o różnych parametrach. Dodatkowo związki fenolowe działają jako przeciwutleniacze, wykazują szereg korzyści zdrowotnych, w tym mogą zapobiegać nowotworom i działać przeciwstarzeniowo na organizm. Dla niektórych roślin np. młodej sałaty, dodatkowe oświetlenie LED w kolorze czerwonym 638nm może zwiększać stężenie związków fenolowych, co może przełożyć się na większą wartość odżywczą danej rośliny. Kolejnym aspektem, na który wpływ ma odpowiednie naświetlenie roślin, jest produkcja cukru i witamin w organach roślinnych, która uzależniona jest od intensywności procesu fotosyntezy. W głównej mierze to od intensywności i widma oświetlenia zależy biosynteza i akumulacja kwasu askorbinowego. Oprócz wpływu oświetlenia LED na rozwój morfologiczny roślin, może ono także wpływać na produkcję witamin i pomaga w redukowaniu szkodliwych związków chemicznych takich jak azotany. W przypadku niektórych roślin poddanie ich dodatkowej obróbce światłem zielonym (590nm) można zaobserwować znaczący spadek stężenia azotanów w częściach zielonych. Azotany same w sobie nie są toksyczne dla człowieka, jednak w kwaśnym środowisku żołądka w $\text{pH} < 4$, a także pod wpływem bakterii bytujących w przewodzie pokarmowym są przekształcane do azotynów, które w nadmiarze są niebezpieczne dla zdrowia. Poznanie możliwości wpływu oświetlenia LED na właściwości roślin pozwoliło wytworzyć optymalny zakres dla każdej rośliny, w którym ustalone widmo umożliwia uzyskać najlepsze efekty produkcyjne.

Odpowiednia konfiguracja oświetlenia LED może też wpływać na zawartość karotenoidów w roślinach. Warzywa to rośliny, które należą do najlepszych naturalnych źródeł karotenoidów, które to w przypadku konsumenta ostatecznego jakim jest człowiek, wpływają pozytywnie na jego zdrowie. U niektórych roślin intensywność niebieskiego światła ma dominujący wpływ na akumulację karotenoidów. Badanie to było niezbędne do wytworzenia innowacji związanej z naświetlaniem LED roślin, ponieważ umożliwiło poznanie najlepszych zakresów widm absorpcji na wytwarzanie konkretnych substancji odżywczych przez rośliny. Umożliwiło również zestawienie otrzymanych owoców roślin pod względem oceny organoleptycznej, wizualnej jak również przeprowadzenie badań konsumenckich w celu porównania odczuć smaku.

Badania właściwości owoców rośliny polegały na określeniu jej smaku, zabarwienia oraz rozmiarów. Przeprowadzone zostały w formie ankiety konsumenckiej oraz pomiarów polegających na określeniu wagi i powierzchni owoców truskawki oraz liści sałaty i rukoli a także jakości sadzonek. Do przeprowadzenia takiej formy prac badawczych typowane były losowo owoce truskawki oraz liście sałaty i rukoli, a także sadzonki np. sałaty. W tym przypadku przeprowadzona została ocena ekspercka, która pozwoliła na analizę jakościową produktu przeznaczonego do dalszej uprawy. Próby pobierane były po zakończeniu każdego z cykli, w formie losowej z każdej grupy owoców badanych roślin. Szczegóły metodyki oceny



konsumenckiej dla sałaty i rukoli przedstawiono w rozdziale 4.11, a dla truskawki 4.12.2. Konsumenci na podstawie ankiety ocenili smak poprzez ocenę aromatu, słodkości, kwaśności oraz ogólne preferencje poprzez ocenę wizualną całego, przekrojonego owocu i walorów smakowych według ich podświadomych ideałów danego obiektu badań. Ankietowani odpowiadali na przedstawione im pytania odnoszące się do ogólnych odczuć określanych w przedziale 0 – 9. Prowadzone były również pomiary tychże próbek pod kątem ich wagi. Z wykorzystaniem wzorów matematycznych przeprowadzone zostały dokładne wyliczenia w celu odpowiedzi na postawione pytania takie jak: jaka jest średnia wielkość owoców. Badania te były konieczne w celu wytworzenia innowacji. Na ich podstawie określono wpływ odpowiedniego widma LED na produkt końcowy oraz jego właściwości, za którymi stoi również zawartość witaminy C oraz wiele elementów wpływających na pozytywny wpływ polepszonych nawyków żywieniowych.

4.5. Badanie wpływu światła LED na tempo rozwoju roślin

Drugim najważniejszym procesem po fotosyntezie, gdzie światło odgrywa bardzo istotną rolę jest fotomorfogeneza. Jest to proces wspomagany przez fotoreceptory na roślinie i definiowany jako domyślny proces rozwoju roślin, w którym fitochromy odgrywają kluczową rolę w odpowiedzi na sygnały świetlne. Według badań nad fotomorfogenezą, stwierdzono, że widmo oświetlenia LED ma duży wpływ na fizjologię i morfologię wzrostu, między innymi niebieskie, czerwone, daleko czerwone i zielone pasma oświetlenia LED mogą silnie wpływać na wzrost i wartość odżywczą roślin. Naświetlanie diodami LED o barwie niebieskiej może sprzyjać wzrostowi wegetatywnemu roślin, natomiast zastosowanie czerwone diody LED mogą wpływać na wzrost części generatywnych. Aby określić efektywność fotosyntezy często określa się wzrost powierzchni liści jako reprezentatywny parametr fizjologiczny w roślinie. Zastosowanie niebieskiego oświetlenia LED wpływa na największy przyrost powierzchni liścia co może przełożyć się na większą efektywność fotosyntezy, a co z tym związane na szybszy rozwój roślin i plon o wyższej jakości. U niektórych roślin połączenie światła niebieskiego i czerwonego może wpływać na wytwarzanie większej liczby liści na roślinie, co ma istotne znaczenie przy warzywach przeznaczonych na pozyskiwanie liści.

Kolejnym z ważniejszych wskaźników rozwoju roślin jest zawartość suchej masy, która to także jest zależna od spektrum zastosowanego światła. U niektórych roślin działanie światłem niebieskim i czerwonym znacząco może wpływać na zwiększenie zawartości świeżej masy. Działanie światłem niebieskim na niektóre rośliny może wpływać znacząco na przyrost suchej masy w plonie, co ma istotne znaczenie na etapie produkcji końcowej, gdyż zbyt rozwodnione rośliny często nie są kwalifikowane jako produkt nadający się do dalszej sprzedaży i spożycia. Dla niektórych z nich odpowiednia konfiguracja światła LED może pozwolić uzyskać znaczące przyrosty plonu biomasy sięgające nawet dwukrotnej standardowej wydajności. Wszystko to



można zawdzięczyć szybszemu przyrostowi roślin, ewentualnie większym organom wegetatywnym co przekładać się może na efektywniejszą fotosyntezę i szybsze ukończenie cyklu wegetacji rośliny w celu zebrania plonu. Jest to badanie, bez którego wytworzenie innowacji nie będzie możliwe, ze względu na złożoność czynników i konsekwencji które niesie ze sobą konfiguracja pasmami światła LED.

W celu wytworzenia innowacji niezbędne było badanie polegające na monitorowaniu tempa rozwoju roślin podlegających doświetlaniu oraz próby kontrolnej. Do badania były brane pod uwagę wyniki uzyskane z roślin kontrolnych oraz tych poddanych naświetlaniu różnym widmem światła. W miejscu realizowania operacji, gdzie była prowadzona plantacja roślin, zostały założone próby kontrolne oraz próby badane. Próba kontrola to rośliny, które nie są poddawane działaniu lampami LED, lecz wzrastają w niekontrolowanych warunkach przy naturalnym słonecznym naświetleniu lub sztucznym oświetleniu stosowanym standardowo w uprawach zamkniętych. Próba badana to rośliny, które są poddawane doświetlaniu lampami LED o ustalonej długości fali światła. Kampania pomiarowa odbywała się w następujący sposób: Próby zostały pobrane zgodnie z metodyką pobierania prób w następujących etapach: pierwsze badanie oraz pobranie nastąpiło w momencie wstawienia rozsąd do warunków kontrolowanych drugie pobranie nastąpiło po 15 dniach trwania cyklu a trzecie pobranie nastąpiło w momencie zakończenia cyklu lub zbioru plonów czyli nie później niż w 30 dniu od momentu wstawienia do obiektu w przypadku upraw takich jak sałata oraz w momencie zbioru w przypadku truskawki, w przypadku uprawy rukoli pierwsze pobranie również odbyło w momencie wstawienia rozsąd do obiektu, drugie pobranie odbyło się po 7 dniach uprawy a trzecie pobranie ok. 14 dnia w momencie zakończenia cyklu oraz zbioru plonów. Projekt zakładał utworzenie pięciu grup badawczych, w których jedna była grupą kontrolną uprawianą w świetle wyłącznie naturalnym lub oświetleniu stosowanym standardowo w uprawach zamkniętych, cztery pozostałe podlegały naświetlaniu w różnych widmach oświetlenia LED. Pomiar prób odbywał się na podstawie dokładnych pomiarów rośliny, jej wysokości, ilości liści, wizualnej oceny zieloności. Celem badania tempa rozwoju roślin było określenie wpływu naświetlania LED na szybkość i intensywność wegetacji roślin. Próba kontrola posłużyła do porównania rezultatów pomiędzy naturalnymi warunkami oświetleniowymi (lub stosowanym standardowo w uprawach zamkniętych), a doświetlaniem roślin światłem LED. Wyniki posłużyły do określenia wpływu doświetlania roślin na ich naturalne tempo wzrostu, dzięki czemu możemy poznać ewentualne korzyści jakie niesie ze sobą doświetlanie roślin odpowiednim widmem światła, a to może przełożyć się na ograniczenie kosztów produkcji i zwiększenie efektywności plantacji.



4.6. Analiza wpływu odpowiedniego oświetlenia LED na ekonomię uprawy

Analiza wpływu odpowiedniego oświetlenia LED na ekonomię uprawy jest punktem podsumowującym całość projektu. Jego celem była innowacja polegająca na dopasowaniu odpowiednich widm oraz mocy LED, tak aby osiągnąć jak najkrótszy okres wegetacji roślin uzyskując tym samym produkt wysokiej jakości. Projekt zakładał również aspekty takie jak: oszczędność prądu, oszczędności związane z nawozami oraz oszczędności związane z wykorzystaniem nawadniania. Jednakże głównym założeniem było osiągnięcie innowacji pozwalającej na przyspieszenie cykli upraw w roku, dzięki czemu zwiększy się dochodowość gospodarstwa spowodowana powiększeniem plonu finalnego, rocznego, utrzymując lub wręcz podnosząc właściwości jakościowe produktu.

Przełożenie odpowiedniego oświetlenia widmem LED na ekonomię uprawy zostało przeprowadzone na podstawie podsumowania końcowego. W praktyce założono, że koszty nawozów, wody, pracy ludzkiej nie różnią się istotnie pomiędzy poszczególnymi rodzajami oświetlenia. Nie widać było różnicy w presji chorób albo innych zjawiskach wymuszających dodatkową pracę ludzką. Skupiono się jednak na analizie głównej pozycji kosztowej - prądu, wraz z porównaniem zużycia prądu i efektywności ekonomicznej. Najważniejszym czynnikiem jest w tym przypadku zwiększenie plonu końcowego dzięki powstaniu danej innowacji. Głównym założeniem całego projektu jest wytworzenie produktu pozwalającego zmniejszyć nakłady finansowe uprawy zwiększając jednocześnie jej dochodowość i poprawiając jakość oraz właściwości uzyskanego plonu.

4.7. Badanie zasobności gleby, substratu uprawowego, pożywki nawozowej, oraz przelewu (wycieku) pożywki nawozowej z podłoża uprawowych mające na celu określenie zasolenia, odczynu pH, a także zasobności w makro i mikro elementy

Na badanych powierzchniach upraw zostały przeprowadzone wybrane badania mające na celu zbadanie zasobności w makro i mikro elementy m.in., N-NO₃, N-NH₄, P, K, Mg, Ca, CL, S-SO₄, Fe, Mn, Zn, CU, B) oraz oznaczony został odczyn pH oraz zasolenie EC. Próby po pobraniu dostarczone zostały do laboratorium akredytowanego. Zasolenie i wilgotność podłoża uprawowych oraz gleby była badana także podczas badań terenowych.

System wertykalny: Woda, w której uprawiane są rośliny, charakteryzuje się stabilnymi parametrami: pH utrzymywane jest na poziomie 6,4, a przewodność elektryczna (EC) wynosi 1,81 mS/cm. Są to warunki sprzyjające zarówno korzeniom sałaty, jak i mikroorganizmom obecnym w systemie. Pożywka, na której wzrastała sałata miała następujący skład: N-NO₃-143; P-PO₄-3 14,7; K⁺ 155,0; Ca⁺² 196; Mg⁺² 41,8; Na⁺ 28,6; Cl⁻ 46,1; SO₄-2 60; Fe 1,77;



Fe ogólne 1,78; Mn 1,20; Cu 0,45; Zn 0,95; B 0,53. W trakcie całego cyklu uprawowego regularnie pobierane są próbki pożywki celem monitorowania jej składu chemicznego i ewentualnego korygowania parametrów.

Analiza właściwości gleby jest bardzo ważnym elementem uprawy roślin, dzięki któremu mamy stałą kontrolę nad zapotrzebowaniem roślin w odpowiednią ilość składników pokarmowych oraz odczynem gleby. Utrzymanie odpowiedniego pH jest bardzo istotne ze względu na jego duży wpływ na przyswajalność nawozów. Dostępność niezbędnych makroelementów takich jak azot, fosfor, potas oraz magnez warunkują prawidłowy rozwój roślin. Są one pobierane przez system korzeniowy z roztworu glebowego w formie przyswajalnej, zaś rozpuszczalność składników pokarmowych w glebie jest uwarunkowana odczynem pH gleby, dlatego też jego optymalna wartość jest tak istotna. Gdy dochodzi do zakwaszenia gleby, spada również poziom przyswajalności makroelementów co wpływa negatywnie na rozwój roślin. Dzięki tym badaniom poznano dokładne właściwości podłoży uprawowych, gleby, pożywki nawozowej oraz jej przelewu, co przyczyniło się do zoptymalizowania nawożenia w obrębie przebadanych obszarów. Był to niezbędny element do prawidłowego rozwoju roślin. Optymalna zawartość magnezu w glebie pozwala na pobudzenie rozwoju systemu korzeniowego oraz aktywację procesów, które są odpowiedzialne za pobieranie składników mineralnych z gleby. Ma on istotny wpływ na wykorzystywanie azotu, potasu oraz fosforu. Jego obecność ma korzystne oddziaływanie na transport oraz gromadzenie fosforu w ziarnach jak również wpływa na poprawę jakości białka i ograniczenie zawartości azotanów. Zawartość potasu w glebie dostępnego dla rośliny pozwoli na regulację gospodarki wodnej rośliny dzięki czemu będzie ona bardziej tolerancyjna na wiosenne susze w szczególności u roślin jarych. W oziminach jego obecność pomaga w zmniejszeniu ryzyka wymarzania roślin ze względu na udział w gospodarce węglowodanowej rośliny. Ma to istotny wpływ podczas mrozów, ponieważ po zamarznięciu soku komórkowego w roślinie, jej ściany komórkowe rozciągają się a nie rozrywają co prowadzi do redukcji strat. Potas wpływa również na wzmocnienie tkanek mechanicznych w ścianach komórkowych rośliny, dzięki czemu zboża posiadają grubsze źdźbła, są one bardziej sztywne co przekłada się na zmniejszenie wylegania oraz utrzymanie stabilności plonu. Jego zadaniem jest również kontrola przemiany aminokwasów oraz białek co przekłada się na zmniejszenie porażeń roślin chorobami oraz porażeń związanych ze szkodnikami, prowadzi do zwiększenia wiązania azotu atmosferycznego oraz efektywności plonotwórczej stosowanych nawozów azotowych. Równie istotną rolę w glebie pełni fosfor. Jego nieregularne nawożenie może przyspieszyć procesy jego uwsteczniania w glebie co oznacza obniżenie jego przyswajalności oraz spadek efektywności uzupełniania jego niedoborów. Niedostateczna ilość dostępnego fosforu ma wpływ na zmniejszenie



wykorzystania azotu co wiąże się ze spadkami plonu. Dlatego też jego nawożenie powinno być regularne, w innym przypadku, gdy dojdzie do niedoborów w glebie mogą przyspieszyć procesy uwsteczniania w glebie co odznaczy się obniżeniem przyswajalności oraz spadkiem efektywności uzupełniania jego niedoborów. Uzyskane wyniki zostały wykorzystane do dostosowania precyzyjnych dawek nawożenia dolistnego, w przypadku gdy zachodzi potrzeba wykorzystania odpadów poprodukcyjnych z upraw – resztki wody z nawozami, której rośliny nie będą w stanie przyjąć są zbierane do zbiorników, a następnie są stosowane do oprysku zboża. Badania powyższych makroelementów są niezbędnym elementem przeprowadzanej operacji, ponieważ informacja o zasobności gleby w składniki odżywcze na całym obszarze będzie warunkowała dostosowanie precyzyjnego nawożenia dolistnego, a uzyskane wiarygodne i reprezentatywne wyniki, będą miały przełożenie na osiągnięte rezultaty, co przyczyni się do wzrostu jakości i wielkości plonowania roślin, a w efekcie do zwiększenia plonu ostatecznego.

Próby gleby, susztratu, pożywki nawozowej, oraz przelewu były pobierane kilkakrotnie. Na obszarach wytypowanych do prowadzenia badań polowych wytypowano punkty, w których zostały pobrane próby pośrednie zgodnie z metodyką pobierania próbek. Badanie to umożliwiło precyzyjne określenie zapotrzebowania gleby na makroelementy co przyczyniło się do ustalenia precyzyjnych dawek nawożenia dolistnego tj. zagospodarowania produktów ubocznych z upraw truskawki (odcieku).

4.8. Analiza optyczna roślin (wizualna podczas całego okresu wegetacji)

Podczas trwania projektu przeprowadzono również badania z wykorzystaniem teledetekcji. Stanowią one istotne źródło informacji na temat roślin znajdujących się w obszarze analiz badawczych. Zastosowanie to ma swoje uzasadnienie z powodu dwóch grup badawczych znajdujących się na jednym polu. W jednej z nich zastosowane zostanie nawożenie produktem ubocznym z nawożenia truskawek rosnących w substracie uprawowym – wykorzystanie przelewu (odcieku) pożywki nawozowej. Drugą grupę stanowi grupa kontrolna, na której zostało przeprowadzone nawożenie dolistne standardowo stosowanym środkiem dopuszczonym do obrotu. Dzięki pozyskanym w ten sposób zdjęciom satelitarnym rolnik może na bieżąco lub historycznie monitorować swoją uprawę oraz różnice w zabarwieniu roślin. Ma to istotny wpływ na czas reakcji ze względu na widoczny kontrast kolorystyczny uzyskany na zdjęciu. W ten sposób możemy podjąć działania zapobiegawcze, przeprowadzając również kontrolę urządzeniem referencyjnym na polu, w celu określenia w roślinie indeksów stresowych, chlorofilowych lub wodnych. Do tego typu badań wykorzystano urządzenie z mobilnym spektrofotometrem, które umożliwiło pozyskanie informacji dotyczących indeksów w roślinie. Dzięki teledetekcji w sposób wyznaczano obszary, w których konieczne jest przeprowadzenie ewentualnych badań kontrolnych. Badania były prowadzone na pszenicy



ozimej w trakcie sezonu wegetacji. Zabarwienie łanu pozwoliło określić jaki wpływ na wyrównanie zabarwienia – co za tym idzie polepszenie stanu fizjologicznego roślin ma nawożenie produktem ubocznym jakim jest przelew pożywki nawozowej wykorzystywanej w uprawie truskawek w substracie uprawowym. Badanie to było niezbędne w celu wytworzenia innowacji ze względu na łatwy sposób określenia wpływu na stan fizjologiczny określany zabarwieniem. Wyniki badań w postaci zdjęć satelitarnych pozwoliły również na szybką analizę wizualną łanu grup badawczych znajdujących się na jednym polu, w celu weryfikacji skuteczności stosowanych zabiegów.

Podczas całego okresu wegetacyjnego prowadzono wizualną analizę optyczną roślin z wykorzystaniem teledetekcji i przenośnego spektrofotometra. Zdjęcia satelitarne wykonywane były regularnie w celu ogólnej kontroli łanu. Dzięki możliwości analizy zdjęć satelitarnych z pól określono stan fizjologiczny plantacji. Kolor łanu na zdjęciach przedstawia stopień rozwoju roślin. Ze względu na zabarwienie, intensywnie zielone rośliny, będą wyróżniać się na tle słabiej rozwiniętych. Badania wykonane przenośnym spektrofotometrem umożliwiły określenie indeksów stresowych, chlorofilowych i wodnych. Urządzenie mierzy odbite lub przepuszczone światło w całym spektrum i tworzy krzywą wizualną, która opisuje kolor na danym podłożu. Spektrofotometr uwzględniając światło inne niż widzialne pozwolił na precyzyjne dostrzeżenie zjawisk w uprawach na podstawie przebadanych liści. Zdrowy i prawidłowo rozwinięty łan będzie odbijać zielone światło, czyli będzie charakteryzował się wysoką wartością indeksu. Natomiast słabo rozwinięte rośliny więcej światła czerwonego i takie obszary będą miały kolor czerwony, czyli niski indeks. To da całkowity obraz tego, jak dobrze lub słabo rozwinięte są rośliny w uprawie. Badanie to było niezbędne w czasie procesu tworzenia tej innowacji i miało istotny wpływ na korelację wyników, a także porównanie bezpośredniego wpływu stosowanego nawożenia w uprawie względem wyników i analiz z próby kontrolnej.

4.9. Analiza końcowa plonu

W ramach projektu oceniono wielkość plonu podczas przeprowadzanego doświadczenia polowego. Za badanego obszaru doświadczalnego z każdej kombinacji pobrano losowo próby w celu określenia masy ziaren. Na wielkość plonu mają wpływ dwie składowe, części wegetatywne oraz generatywne. Pozostawione na polu resztki poźniwne są cennym źródłem składników pokarmowych dla roślin poźniwnych oraz wzbogacają glebę w materię organiczną, której wartość jest nieoceniona dla zdolności absorpcji wody przez glebę. Natomiast pielęgnowanie roślin w okresie wegetacji jest jednym z ważniejszych czynników decydujących o wysokości i jakości plonu zboża. Ważnym elementem jest chociażby dobór nawożenia dolistnego i jego precyzyjne zastosowanie na uprawie. Dokarmianie dolistne nawozami ma dla roślin olbrzymie znaczenie, ponieważ stymuluje je do prawidłowego wzrostu, wspomaga prawidłowy rozwój systemu korzeniowego, aktywuje procesy metaboliczne oraz podnosi



odporność roślin w warunkach stresowych. Wpływa również na poprawę wartości biologicznej plonu, podnosi jego wydajność w efekcie czego jest możliwe otrzymanie ziarna o lepszych parametrach takich jak zawartość białka czy popiołu. Na dokarmianie dolistne najlepiej reagują rośliny w początkowej fazie wzrostu. Jest to spowodowane tym, że młodsze rośliny nie są pokryte grubą warstwą wosku, tak jak starsze, i przez co mogą pobierać znacznie większą ilość cieczy. W chwili pobrania przez roślinę zaaplikowanego nawozu dolistnego, jego stężenie w sokach roślinnych jest znacznie większe. Następnie roślina dąży do przywrócenia właściwego stężenia składnika, które jest niższe niż w aplikowanej cieczy roboczej. Rośliny rozcieńczają składnik poprzez zwiększone pobranie wody z gleby, jednak wraz ze zwiększonym ciągiem transpiracyjnym pobierają nie tylko wodę, ale i dostępne w strefie korzeniowej składniki pokarmowe. Dzięki temu lepiej wykorzystują to co oferuje siedlisko, w którym rosną, a co za tym idzie możliwe jest otrzymanie większego plonu opartego o dostępne zasoby przy mniejszym zapotrzebowaniu na bieżące dostawy składników. Badanie to było niezbędne w celu wytworzenia innowacji ze względu na łatwy sposób określenia wpływu nawożenia dolistnego na poprawę wielkości i jakości plonu. Wyniki badań w postaci wielkości plonu na jednostkę powierzchni pozwoliły również na dostosowanie dawek precyzyjnego nawożenia.

Badanie polowe w zakresie wielkości plonu miało na celu poznanie wpływu na zdolność i wielkość plonowania badanej rośliny dzięki zastosowanej innowacji. Jest to najbardziej wymierny wyznacznik, który można zbadać w prosty i tani sposób. Podczas realizacji operacji został wyznaczony obszar produkcyjny, na którym prowadzono uprawę zboża. Na powierzchniach tego arealu wyznaczono siatkę poletek badawczych do czego wykorzystano zdjęcia satelitarne, aby określić interesujące obszary, na których przeprowadzono zbiór ziaren w celu oszacowania plonu na danym obszarze. Zbiór był przeprowadzony ręcznie. Masa ziaren była zważona oraz przeprowadzono badania jakości ziarna. Uzyskane wyniki porównano do próby kontrolnej. Dało to obraz tego jak zmienia się plon w wyniku wypracowanej innowacji.

4.10. Metodyka doświetlania roślin truskawki

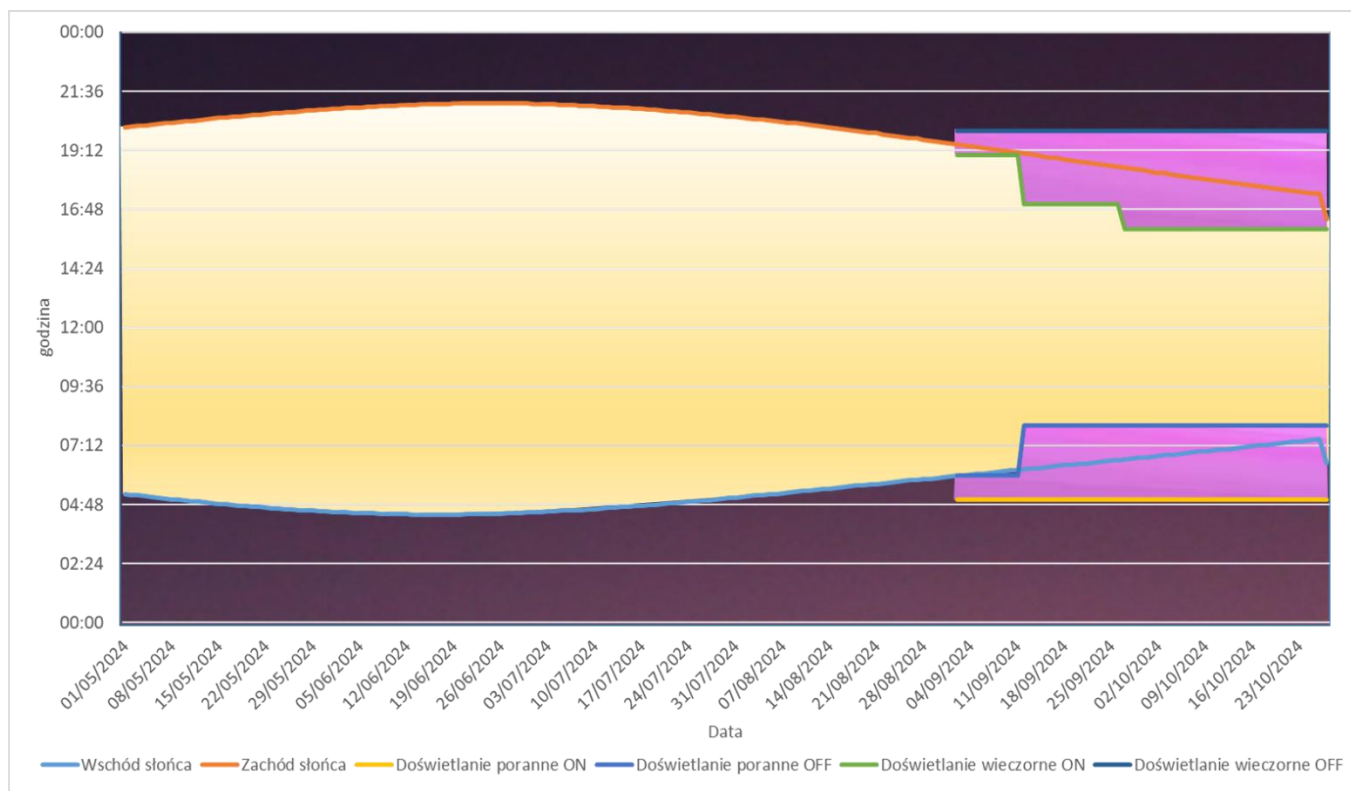
W warunkach klimatycznych Polski, charakteryzujących się sezonową zmiennością długości dnia i ograniczoną ilością światła słonecznego w okresie jesiennym, utrzymanie odpowiednich warunków świetlnych dla roślin uprawianych w tunelach foliowych staje się wyzwaniem wymagającym zastosowania technologii wspomagających naturalne oświetlenie. Szczęólnego znaczenia nabiera to w przypadku produkcji intensywnej, obejmującej gatunki o długim okresie owocowania, jak truskawka (*Fragaria × ananassa*) w typie odmian samopowtarzających się. W takich systemach, prowadzonych metodą hydroponiczną, celem jest maksymalizacja plonów wysokiej jakości w możliwie najdłuższym okresie wegetacyjnym.



Truskawki tego typu wykazują zdolność do ciągłego zawiązywania i dojrzewania owoców przez cały sezon, obejmujący miesiące od maja aż do listopada. Jednak wraz z początkiem września dochodzi do znacznego skrócenia dnia, a ilość dostępnego światła słonecznego przestaje być wystarczająca do utrzymania intensywnej fotosyntezy i aktywności fizjologicznej roślin na poziomie umożliwiającym utrzymanie wysokiej produktywności.

Z perspektywy fizjologii roślin światło pełni fundamentalną funkcję nie tylko jako źródło energii niezbędnej do procesu fotosyntezy, ale również jako sygnał regulujący wiele procesów rozwojowych, takich jak elongacja pędów, indukcja kwitnienia czy kierunki wzrostu. W warunkach ograniczonego nasłonecznienia w miesiącach jesiennych, w tym szczególnie od września do końca października, wskazane jest wdrożenie zintegrowanego systemu doświetlania, który kompensuje niedobór światła dziennego poprzez stosowanie sztucznego źródła światła o odpowiednich parametrach spektralnych i natężeniu. W omawianym przypadku, na potrzeby zapewnienia ciągłości intensywnej produkcji owoców w uprawie truskawek prowadzonych w tunelach foliowych, zastosowano systemowe wydłużenie dnia świetlnego do poziomu 15 godzin na dobę w godzinach od 5:00 do 20:00. Założenie to opiera się na wiedzy empirycznej i wynikach wcześniejszych badań, które wykazują, że dla odmian truskawek o przedłużonym okresie owocowania, zapewnienie dobowej dostępności światła na poziomie około 14–16 godzin pozwala na utrzymanie wysokiej aktywności fotosyntetycznej i intensywnego zawiązywania kwiatów oraz owoców.

W praktyce wdrażanie systemu doświetlania odbywa się poprzez stopniowe wydłużanie dobowego okresu ekspozycji roślin na światło, począwszy od pierwszych dni września. W tym czasie długość dnia naturalnego spada poniżej 14 godzin, co skutkuje koniecznością zastosowania dodatkowego oświetlenia – początkowo w formie godzinnego doświetlania w godzinach porannych (od 5:00 do 6:00) oraz wieczornych (od 19:00 do 20:00). W miarę postępującego skracania się dnia, doświetlanie poranne jest stopniowo wydłużane, zgodnie z coraz późniejszym wschodem słońca, natomiast doświetlanie wieczorne również ulega wydłużeniu, aby łączny czas naświetlania – obejmujący zarówno światło naturalne, jak i sztuczne – niezmiennie wynosił 15 godzin na dobę. Taki rozkład czasowy ma na celu płynne uzupełnianie niedoboru światła słonecznego oraz zapewnienie stabilnego rytmu dobowego dla roślin, co sprzyja ich prawidłowemu wzrostowi, procesom fizjologicznym i minimalizuje stres wywołany zmianami fotoperiodycznymi. Skuteczne prowadzenie tego typu uprawy wymaga bieżącego monitorowania rzeczywistej długości dnia świetlnego oraz regularnej korekty godzin pracy systemu doświetlania – zazwyczaj co kilkanaście do kilkudziesięciu dni – w zależności od zmian długości dnia charakterystycznej dla danego okresu jesiennego.



Rysunek 11. Wschody i zachody słońca dla szerokość geograficzną N 51° 46' 14.66" i długość geograficzną E 19° 7' 48.993" oraz układ doświetlania doświadczenia roślin truskawki w okresie września i października.

W praktyce uprawowej zastosowanie doświetlania w okresie jesiennym nie tylko wspomaga fotosyntezę, ale również wpływa pozytywnie na jakość owoców, ich wyrównanie, jędrność, a także barwę i zawartość substancji bioaktywnych. Rośliny utrzymywane w warunkach optymalnego oświetlenia wykazują mniejsze oznaki stresu świetlnego, co przekłada się na lepszą ogólną kondycję fizjologiczną, a tym samym na wydłużenie okresu ich produktywności. Istotnym elementem pozostaje również wybór odpowiedniego źródła światła – zastosowano cztery typy systemów oświetlenia LED (LED1 - RW (red-white), LED2 - RWFR (red-white-far red), LED3 - RB (red-blue), oraz LED4 - BW (blue-white)), które dzięki możliwości dostosowania spektrum światła do potrzeb fizjologicznych roślin oraz wysokiej efektywności energetycznej, stają się rozwiązaniem korzystnym zarówno z punktu widzenia produkcyjnego, jak i ekonomicznego.

Podsumowując, wprowadzenie systemu kontrolowanego doświetlania w uprawie hydroponicznej truskawki odmian samopowtarzających w tunelach foliowych w okresie jesiennym jest działaniem w pełni uzasadnionym agronomicznie. Utrzymywanie łącznego czasu naświetlania – naturalnego i sztucznego – na poziomie 15 godzin do końca października umożliwia utrzymanie ciągłości plonowania i wysokiej jakości owoców w warunkach



skracającego się dnia. Stanowi to kluczowy element metodyki uprawy w warunkach kontrolowanych, który wspiera stabilność produkcji i umożliwia uzyskanie satysfakcjonujących efektów ekonomicznych mimo niekorzystnych uwarunkowań świetlnych w okresie jesiennym.



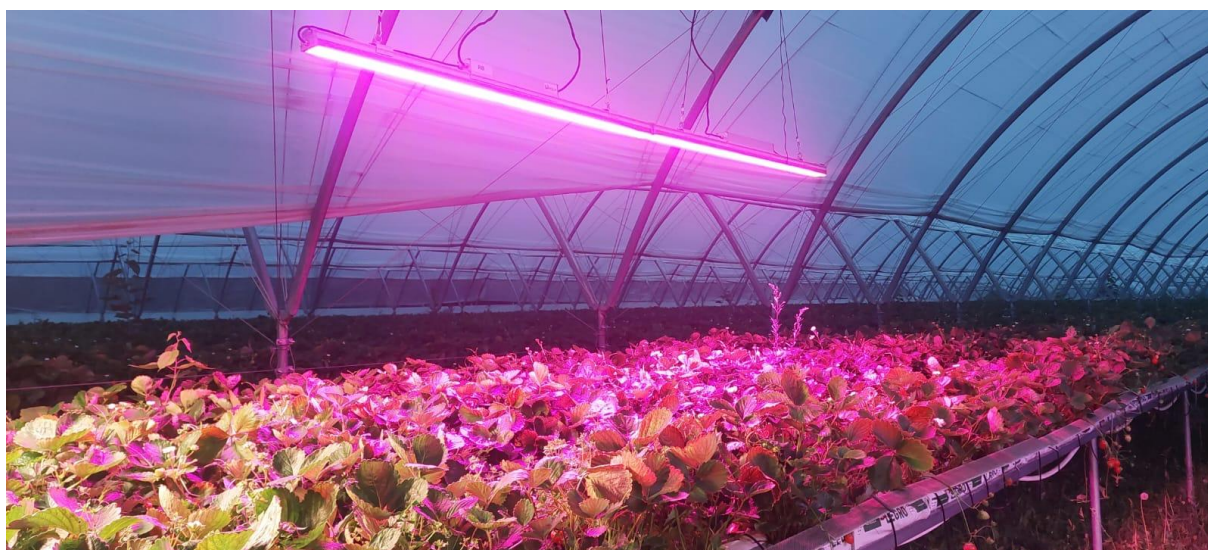
Fotografia 9. Widmo RW (LED 1) dzień w uprawie truskawki w tunelu foliowym



Fotografia 10. Widmo RW (LED 1) i BW (LED 4) noc w uprawie truskawki w tunelu foliowym



Fotografia 11. Widmo BW (LED 4) dzień w uprawie truskawki w tunelu foliowym



Fotografia 12. Widmo RB (LED 3) noc w uprawie truskawki w tunelu foliowym



Fotografia 13. Widmo RWFR (LED 2) i RB (LED 3) dzień w uprawie truskawki w tunelu foliowym



Fotografia 14. Widmo RWFR (LED 2) i RB (LED 3) noc w uprawie truskawki w tunelu foliowym

4.11. Wizualna ocena ekspercka

4.11.1. Opis oceny wizualnej dokonanej przez eksperta dla sałaty, rukoli i sadzonek

Ocena wizualna została przeprowadzona na pięciu losowo wybranych roślinach sałaty i rukoli. Każdą z ocenianych cech określono w skali od 0 do 5, gdzie **0 oznacza brak danej cechy**, natomiast **5 – jej maksymalne nasilenie**. Wartości pośrednie określały stopień intensywności cechy.

Oceniane cechy:



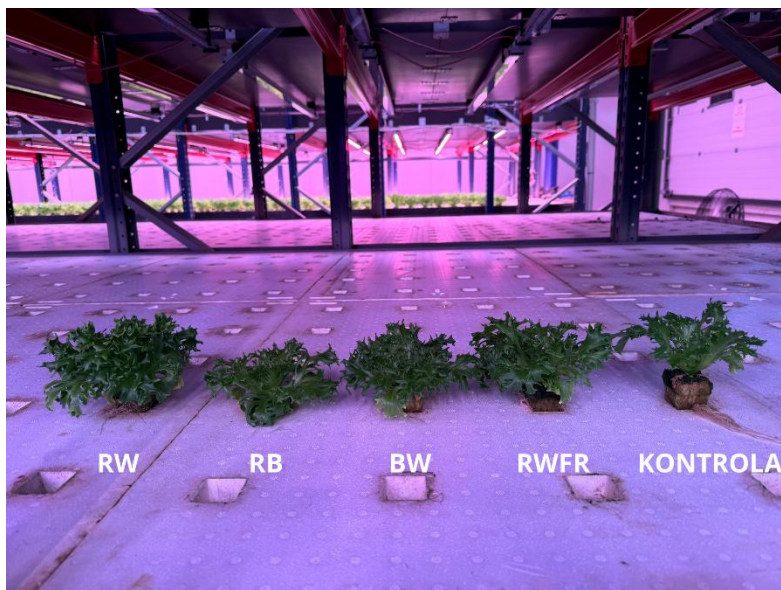
1. **Ogólna kondycja rośliny** – określano na podstawie wyglądu i struktury rośliny, jej jędrności, barwy oraz ewentualnych oznak stresu fizjologicznego.
2. **Zieloność liści** – oceniano intensywność zielonej barwy liści, przy czym wyższa wartość oznaczała głębszy, bardziej jednolity kolor zielony.
3. **Chlorozy** – określano stopień odbarwień liści na żółtawy kolor; 0 oznaczało brak chlorozy, a 5 jej bardzo intensywne występowanie.
4. **Nekrozy** – oceniano obecność martwych, brązowych lub czarnych fragmentów tkanek na liściach; 0 oznaczało brak nekroz, a 5 ich znaczne nasilenie.
5. **Wyrównanie roślin** – określano jednorodność wielkości i kształtu roślin w danej próbie; 0 oznaczało całkowity brak wyrównania, a 5 wysoką jednorodność.
6. **Sztywność i wiotkość roślin** – oceniano stopień jędrności roślin, gdzie niższe wartości wskazywały na wiotkość, a wyższe na sztywność i sprężystość.
7. **Świeża masa liści** – określano na podstawie zmierzonej wagi liści wyrażonej w gramach.
8. **Liczba liści na roślinie** – określano jako liczbę całkowitą policzonych liści na pojedynczej roślinie.

Każda cecha została oceniona indywidualnie dla każdej z pięciu roślin, a wyniki posłużyły do analizy i oceny różnic między kombinacjami badawczymi.

Tabela 2. Przykładowa tabela oceny jakości sałaty, rukoli i sadzonek sałaty

Kombinacja	Nr rośliny	Kondycja (0-5)	Zieloność (0-5)	Chlorozy (0-5)	Nekrozy (0-5)	Wyrównanie (0-5)	Sztywność (0-5)	Świeża masa (g)	Liczba liści
kontrola									
LED1	1								
LED2	1								
...	...								

Taki schemat pozwala na systematyczne prowadzenie badań oraz analizowanie wpływu różnych warunków oświetlenia na wzrost i jakość sadzonek.



Fotografia 15. Przykładowe rośliny sałaty wybrane do oceny eksperckiej



Fotografia 16. Przykładowe pomiary masy liści rukoli



Fotografia 17. Przykładowe pomiary rozsady sałaty – widok rozety liściowej z kostką



Fotografia 18. Przykładowe pomiary masy liści dla rozsady sałaty

4.11.2. Opis oceny wizualnej dokonanej przez eksperta dla truskawki

Badania mające na celu ocenę wpływu czterech wariantów oświetlenia LED na wybrane parametry plonu oraz jakość owoców truskawki przeprowadzono w warunkach kontrolowanych w okresie od września do października. Doświadczenie obejmowało cztery serie pomiarowe, realizowane w równych odstępach czasowych. Grupę kontrolną stanowiły rośliny uprawiane bez dodatkowego oświetlenia, co pozwoliło na jednoznaczne określenie efektu zastosowanych technologii LED.

Oceniane cechy:

1. **Masa owoców:**
 - Całkowita masa owoców (g)
 - Masa owoców handlowych (g)
2. **Liczba owoców:**
 - Całkowita liczba owoców (szt.)
 - Liczba owoców handlowych (szt.)
3. **Średnia wielkość owoców:**
 - Średnia wielkość wszystkich owoców
 - Średnia wielkość owoców handlowych
4. **Liczba owoców przypadających na jedną roślinę:**
 - Całkowita (szt./roślinę)
 - Handlowa (szt./roślinę)
5. **Kondycja roślin:**
 - Ocena wizualna w skali 0–9 (0 – silnie uszkodzone; 9 – bardzo zdrowe)
6. **Stopień dojrzałości owoców:**
 - Ocena wizualna w skali 0–9 (0 – zielone; 9 – przejrzyste)

Masa owoców mierzona była przy użyciu laboratoryjnej wagi analitycznej o dokładności 0,01 g. Pomiar obejmował całkowitą masę owoców uzyskanych z doświetlanych roślin i

przeprowadzany był co ok. 10-15 dni, podczas każdorazowego zbioru w okresie trwania doświadczenia. Liczbę owoców określano poprzez bezpośrednie zliczanie dojrzałych jednostek handlowych przypadających na zbiór. Określano wagę całkowitą oraz wagę handlową. Analogicznie określono liczbę owoców całkowitą oraz liczbę owoców handlowych (mających wartość sprzedażową). Ponadto, z każdego zbioru obliczano średnią wielkość owoców również w podziale na wartość całkowitą oraz handlową. W celu oceny plonu ilościowego i jakościowego określano także liczbę owoców na jednej roślinie (w ujęciu całkowitym i handlowym)



Fotografia 19. Przykładowe pomiary masy owoców

Kondycję roślin oceniano metodą wizualną według dziesięciopunktowej skali, gdzie 9 oznaczało rośliny zdrowe, intensywnie zielone, bez oznak stresu, a 0 – rośliny silnie uszkodzone, wykazujące symptomy zamierania. Ocena przeprowadzana była przez zespół ekspercki na podstawie obserwacji bezpośrednich oraz dokumentacji fotograficznej. Stopień dojrzałości owoców klasyfikowano zgodnie z dziesięciopunktową skalą, gdzie 0 oznaczało owoce zielone, a 9 – owoce przejrzałe. Ocen dokonano wizualnie przy każdym zbiorze. Dane pomiarowe wprowadzano do właściwej bazy danych bezpośrednio po każdym pomiarze, z przypisaniem do konkretnego wariantu oświetlenia oraz serii pomiarowej. Metodyka badań oparta została na obowiązujących wytycznych i standardach branżowych.

4.12. Metody badań konsumenckich

4.12.1. Ocena konsumencka sałaty i rukoli

Do oceny konsumenckiej losowo wybrano co najmniej pięć roślin z każdej kombinacji. Przed przeprowadzeniem badania od każdej rośliny odcięto kostkę z korzeniami i dokonano ważenia samej rośliny.

Na stanowisku do oceny konsumenckiej przygotowano pojedyncze liście, które umyto wodą dejonizowaną, osuszono, a następnie umieszczono na talerzykach. Dla każdego oceniającego przeznaczono dwa większe oraz dwa środkowe liście z rozety w celu oceny konsystencji i smaku.

Ocenie poddano następujące cechy, stosując skalę od 0 do 5, gdzie:



- **0** – brak danej cechy lub jej niewyczuwalność,
- **5** – maksymalne nasilenie cechy,
- wartości pośrednie (1–4) oznaczały stopnie nasilenia danej cechy.

Opis ocenianych cech i skali

1. **Kruchość liści** – określono na podstawie odczucia przy gryzieniu liścia.
 - **0** – całkowity brak kruchości, liść miękki, wiotki, bez oporu podczas gryzienia,
 - **5** – bardzo wysoka kruchość, liść łamliwy, wyraźnie chrupiący.
2. **Twardość liści** – oceniono jako opór, jaki liść stawia podczas gryzienia.
 - **0** – brak twardości, liść bardzo delikatny, niemal rozpływający się,
 - **5** – bardzo wysoka twardość, liść trudny do przegryzienia, tykowaty.
3. **Smak słodki** – oceniono intensywność słodkiego posmaku w liściach.
 - **0** – brak słodczy,
 - **5** – wyraźnie słodki smak, dominujący nad innymi.
4. **Smak trawiasty** – oceniono nasilenie aromatu i posmaku świeżej trawy.
 - **0** – brak trawiastego posmaku,
 - **5** – bardzo intensywny trawiasty posmak, przypominający świeżo skoszoną trawę.
5. **Smak gorzki** – określono intensywność gorzkiego posmaku.
 - **0** – brak goryczki,
 - **5** – bardzo intensywna, dominująca goryczka.
6. **Smak "stęchły"** – oceniono obecność nieprzyjemnego, stęchłego posmaku.
 - **0** – brak posmaku stęchlizny,
 - **5** – bardzo wyraźny, nieprzyjemny posmak.
7. **Smak kwaśny** – określono intensywność kwaśnego smaku.
 - **0** – brak kwaśnego posmaku,
 - **5** – bardzo intensywny, dominujący kwaśny smak.
8. **Smak piekący** – oceniono intensywność ostrego, piekącego odczucia na języku.
 - **0** – brak pieczenia,
 - **5** – bardzo intensywne pieczenie, porównywalne do pikantnych przypraw.
9. **Ogólna ocena rośliny** – podsumowano jakość rośliny na podstawie wszystkich analizowanych wyróżników.
 - **0** – bardzo niska jakość, nieakceptowalna sensorycznie,
 - **5** – najwyższa jakość, bardzo pozytywne wrażenia sensoryczne.
10. **Ogólna pożądalność produktu** – oceniono stopień, w jakim produkt byłby chętnie spożywany przez konsumentów.
 - **0** – produkt niepożądany, oceniający nie chciałby go spożywać ponownie,



- 5 – produkt bardzo pożądaný, chętnie wybierany do ponownej konsumpcji.

Każda z cech została oceniona indywidualnie przez uczestników badania. Uzyskane wyniki posłużyły do analizy jakości sensorycznej i preferencji konsumenckich dla różnych kombinacji badawczych.

4.12.2. Ocena konsumencka jakości owoców truskawki

Ocena konsumencka polegała na porównawczej analizie cech jakościowych truskawek. Panel badawczy składał się z osób o zróżnicowanym wieku, płci, wykształceniu i zawodzie, co zapewniało reprezentatywność wyników.

Eksperyment miał charakter krótkoterminowy, a wszystkie warianty badawcze prowadzono w identycznych warunkach uprawowych. Truskawki były uprawiane w tunelach foliowych przez cały okres kwitnienia i owocowania (maj – październik) w obiekcie zlokalizowanym w gospodarstwie rolnym Dariusza Pawlaka. Od 2 września, w okresie krótszego dnia, rozpoczęto doświetlanie roślin czterema rodzajami lamp LED o zróżnicowanym spektrum, zgodnym z rozwiązaniami stosowanymi w innych doświadczeniach realizowanych w ramach tego projektu.

Zebrane owoce, po odpowiednim przygotowaniu, podlegały ocenie pod względem następujących cech:

- aromat truskawkowy,
- nietypowy aromat,
- odporność skórki na pocieranie,
- słodki smak,
- kwaśny smak,
- jędrność miąższu,
- preferencje ogólne.

Ocena była przeprowadzana w skali od 0 do 9. Aby zwiększyć precyzję wyników, jako punkt odniesienia przyjęto owoce z uprawy niedoświetlanej (kontrola), dla których – z wyjątkiem cechy „nietypowy aromat” – przyjęto wartość 5. Członkowie panelu porównywali oceniane owoce z próbką kontrolną, stosując następujące zasady:

- wynik poniżej 5 oznaczał jakość gorszą niż kontrola,
- wynik równy 5 wskazywał brak różnicy,
- wynik powyżej 5 oznaczał jakość lepszą od kontroli.



Fotografia 20 Widok stanowiska do oceny konsumenckiej jakości owoców truskawki.

Przyjęta metodologia bazowała na rozwiązaniach stosowanych w projekcie Horyzont¹, w którym oceniano cechy jakościowe owoców jagodowych, w tym truskawek.

4.13. Badanie obrazów spektralnych urządzeniem spektrofotometrycznym

Eksperyment przeprowadzono w kontrolowanych warunkach szklarniowych, w tunelu foliowym w celu oceny wpływu zróżnicowanego oświetlenia LED na wzrost oraz stan fizjologiczny trzech gatunków roślin uprawnych: *Eruca sativa* (rukola), *Lactuca sativa* (sałata) oraz *Fragaria × ananassa* Duchesne (truskawka). Badanie miało na celu identyfikację różnic w reakcjach roślin na cztery typy oświetlenia LED, zróżnicowane pod względem składu widmowego oraz intensywności promieniowania:

- LED1 RW (Red-White),
- LED2 RWFR (Red-White-Far Red),
- LED3 RB (Red-Blue),
- LED4 BW (Blue-White).

System oświetlenia zainstalowany był nad oddzielnymi poletkami doświadczalnymi, w sposób zapewniający jednolite i powtarzalne warunki świetlne w obrębie każdego wariantu. Każdy typ oświetlenia stanowił osobny wariant doświadczalny dla badanych gatunków roślin, przy czym

¹ "Improving the stability of high-quality traits of berry in different environments and cultivation systems for the benefit of European farmers and consumers." Deliverable No. D1.1. Harmonized protocol for phenotyping strawberry, raspberry and black currant. Projekt ten otrzymał dofinansowanie z programu badań naukowych i innowacji Unii Europejskiej „Horyzont 2020” na podstawie umowy o dotację nr 679303.



warunki środowiskowe (temperatura, wilgotność, nawadnianie) utrzymywano na stałym poziomie w trakcie całego okresu uprawy.

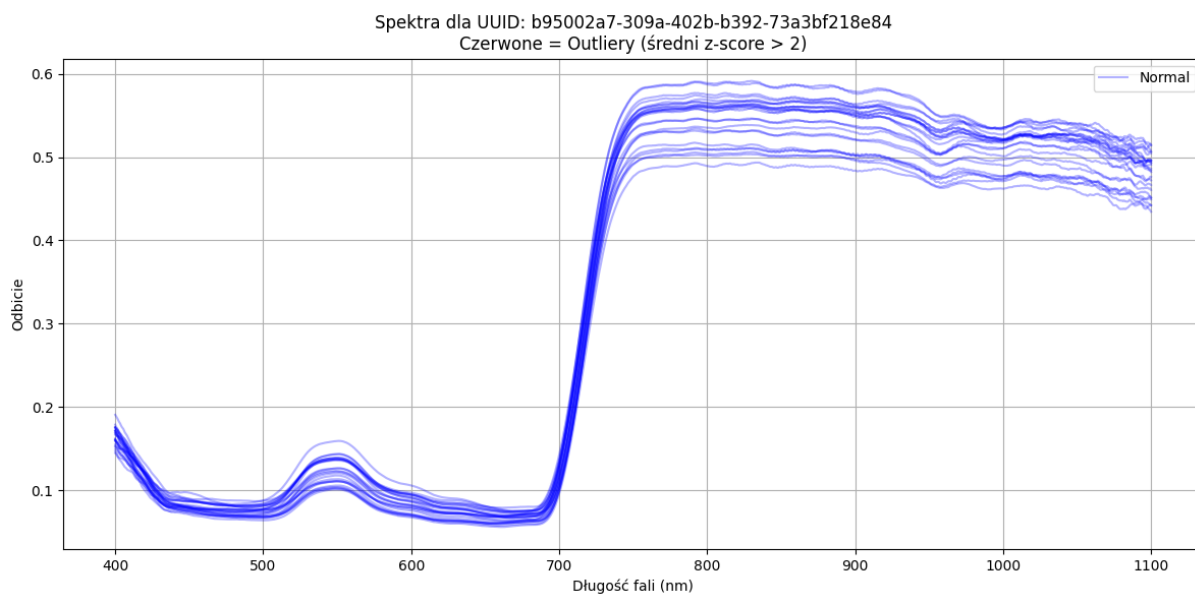
Okolo 20 dni po posadzeniu roślin (sałaty i rukoli) dokonano oceny spektralnej ich stanu fizjologicznego. Pomiarów dokonano za pomocą przenośnego spektrometru ScanSpectrum v4, działającego w zakresie długości fal 400–1000 nm, o rozdzielczości spektralnej FWHM 3 nm oraz stosunku sygnału do szumu (SNR) ≥ 500 . Urządzenie umożliwia szybki, ośmiosekundowy odczyt, a dzięki zintegrowanemu mocowaniu do liści pozwala na dokładną analizę refleksyjności *in situ*. Pomiarów dokonywano w trybie odbiciowym, stosując materiał zaciemniający umieszczony po przeciwnej stronie liścia, celem wyeliminowania zakłóceń pochodzących ze światła otoczenia.

Dla każdego wariantu oświetlenia i każdego gatunku rośliny wykonano po 25 indywidualnych skanów spektralnych – po pięć skanów z pięciu różnych roślin. Takie podejście pozwoliło na uśrednienie danych w sposób reprezentatywny dla całej uprawy. Grubość liści nie była kompensowana w procesie analizy, ponieważ wpływa ona na poziom sygnału w całym spektrum, co traktowano jako dodatkowy parametr jakościowy roślin.

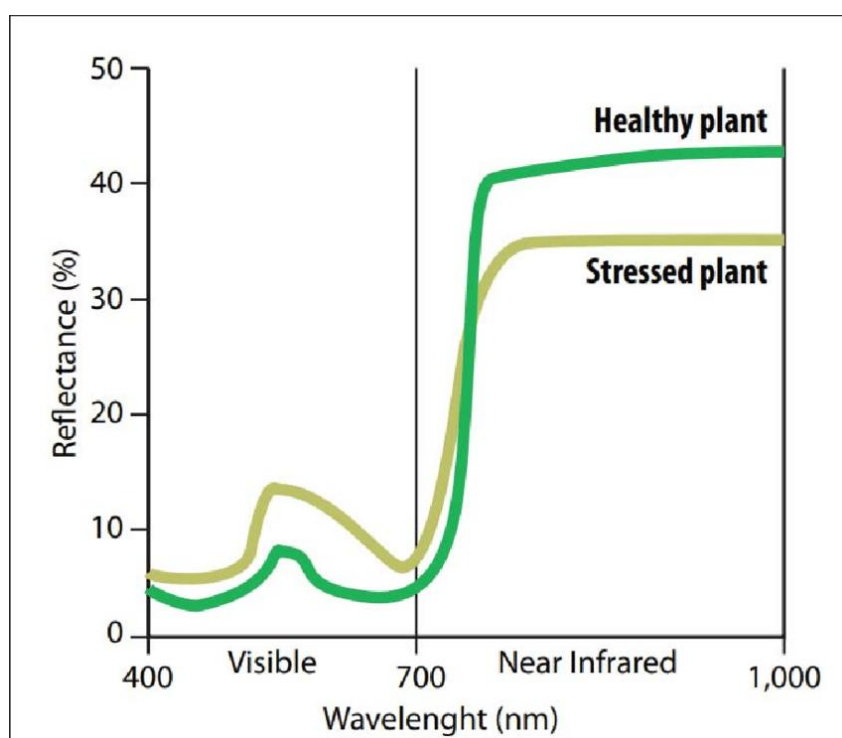
Doświadczenie przeprowadzono pięciokrotnie w różnych terminach, zachowując możliwie identyczne warunki uprawy, co umożliwiło ocenę powtarzalności wyników oraz ich odporności na czynniki losowe.

Weryfikacji poprawności danych dokonano poprzez analizę statystyczną oraz wizualną – każdy zestaw 25 spektrów poddano ocenie graficznej w celu identyfikacji obserwacji odstających, charakteryzujących się istotnie wyższym odchyleniem standardowym. Analiza nie wykazała obecności błędnych lub zakłóconych pomiarów, w związku z czym wszystkie dane zostały uwzględnione w dalszych etapach opracowania wyników.

Wizualna analiza przebiegu krzywych spektralnych umożliwiła wstępną ocenę stanu fizjologicznego roślin. Zdrowe osobniki charakteryzowały się niższą refleksyjnością w zakresie widzialnym, co jest związane z intensywną absorpcją promieniowania przez chlorofil (głęboka zieleń liści), oraz wyższą refleksyjnością w zakresie bliskiej podczerwieni (NIR), wynikającą z niezakłóconej struktury komórkowej liścia. Porównanie spektrów pomiędzy roślinami pozwoliło na identyfikację osobników znajdujących się w lepszej kondycji wegetacyjnej, co przedstawiono na poniższych wykresach.



Rysunek 12. Przykład szukania próbek odstających



Rysunek 13. Porównanie uśrednionych widm odbiciowych dla poszczególnych powtórzeń eksperymentu w zależności od zastosowanego typu oświetlenia.

Źródło: https://www.researchgate.net/figure/Typical-reflectance-spectrum-of-a-healthy-and-stressed-plant_fig1_336870715



Rysunek 14. Urządzenie ScanSpectrum v4

W ramach analizy spektralnej wykonanej przy użyciu systemu ScanSpectrum, określono szereg wskaźników wegetacyjnych, pozwalających na kompleksową ocenę stanu fizjologicznego badanych roślin. Obliczenia oparto na danych spektralnych uzyskanych w określonych zakresach długości fal, a każdy z wyznaczonych wskaźników dostarcza informacji o różnych aspektach kondycji roślin.

Pierwszym z zastosowanych wskaźników jest **NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)**, obliczany według wzoru $(NIR - Red) / (NIR + Red)$, gdzie Red to średnia wartość odbicia w zakresie 660–680 nm, a NIR w zakresie 800–880 nm. NDVI jest szeroko stosowanym wskaźnikiem do monitorowania zdrowia roślinności i ilości biomasy. Wartości tego indeksu mieszczą się w przedziale od 0 do 1, przy czym wyższe wartości wskazują na zdrowszą i bardziej aktywną fotosyntetycznie roślinność.

Drugim wskaźnikiem jest **PRI (Photochemical Reflectance Index)**, obliczany jako $(R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$. PRI umożliwia ocenę wydajności fotosyntetycznej oraz wczesne wykrywanie stresu u roślin. Zakres wartości PRI wynosi od -1 do 1, a wyższe wartości świadczą o lepszej kondycji fizjologicznej rośliny.

W celu oceny poziomu nawodnienia roślin wykorzystano **Water Stress Index (WSI)**, definiowany jako stosunek wartości odbicia przy 970 nm do odbicia przy 900 nm (R_{970}/R_{900}).



Interpretacja wskaźnika jest następująca: wartość >1 wskazuje na występowanie stresu wodnego, wartość około 1 oznacza odpowiednie nawodnienie, natomiast wartość <1 sugeruje wysokie nawodnienie tkanek roślinnych.

Kolejnym parametrem jest **Red-Edge Stress Index**, wyznaczany ze wzoru $(R750-R705)/(R750+R705)$. Wskaźnik ten służy do oceny stresu roślin w zakresie tzw. czerwonej krawędzi spektrum. Wartość 0 oznacza brak stresu, wartości dodatnie świadczą o zdrowej roślinności, natomiast wartości ujemne sygnalizują występowanie stresu. Im wyższa wartość indeksu, tym mniejszy poziom stresu fizjologicznego.

Analizę stanu roślin uzupełniono poprzez wyznaczenie **Chlorophyll Index (CIgreen)**, którego wzór to $(R750/R550)-1$. Wskaźnik ten koreluje z zawartością chlorofilu w liściach roślin, a jego wyższe wartości oznaczają lepszą kondycję i intensywniejsze procesy fotosyntetyczne.

Ostatnim z badanych wskaźników był **Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index (MCARI)**, obliczany według wzoru $(R700-R670)-0.2 \times (R700-R550) \times (R700/R670)$. MCARI umożliwia dokładniejszą ocenę zawartości chlorofilu oraz ogólnego zdrowia roślin, uwzględniając zmienność w odbiciu w niewrażliwych pasmach spektralnych. Wysokie wartości tego wskaźnika świadczą o wysokiej koncentracji chlorofilu i dobrej kondycji roślin.

Łączne zastosowanie powyższych wskaźników umożliwia precyzyjną i wieloaspektową ocenę stanu wegetacyjnego roślin, obejmującą zarówno ich zdrowie, efektywność fotosyntezy, jak i reakcje na czynniki stresowe.



Fotografia 21. Ocena stanu wegetacyjnego roślin pszenicy przy pomocy ScanSpectrum v4

4.14. Metodyka badań polowych

Doświadczenie polowe przeprowadzono w sezonie wegetacyjnym na dwóch polach uprawnych z zastosowaniem odmiany pszenicy ozimej BATAJA. Głównym celem badań było określenie wpływu zastosowania odcieku pożywki wykorzystywanej w fertygacji truskawki uprawianej w tunelach na plonowanie oraz jakość ziarna pszenicy w odniesieniu do kontroli (bez dodatkowego nawożenia) oraz dodatkowym nawożeniem standardowo stosowanym mikroelementowego nawozem dolistnym PLONVIT® ZBOŻA.

Na każdym z pól założono doświadczenie w czterech wariantach nawożeniowych:

- Wariant I: aplikacja odcieku pożywki w dawce 2000 l/ha,
- Wariant II: aplikacja odcieku pożywki w czterech dawkach po 2000 l/ha (łącznie 8000 l/ha),
- Wariant III (kontrola): brak aplikacji odcieku pożywki (0 l/ha),

- Wariant IV: zastosowanie komercyjnego nawozu dolistnego PLONVIT® ZBOŻA zgodnie z zaleceniami producenta (1 l/ha).

Warianty I, II oraz III realizowano równolegle na obu polach, natomiast wariant IV został wdrożony wyłącznie na drugim polu (Rysunek 15). Na wszystkich poletkach wykonano jednolite nawożenie przedsiewne saletrą amonową ZAKSAN (33,5% N) w łącznej dawce 300 kg/ha, aplikowaną w dwóch równych dawkach. Odciek pożywki, wykorzystywany w wariantach I i II, pochodził z systemu nawadniania truskawek prowadzonych w uprawie tunelowej w podłożu substratowym, gdzie stosowano zbilansowaną pożywkę bogatą w mikro- i makroelementy.



Rysunek 15. Oznaczenie układów doświadczeń z pszenicą na ortofotomapie. (stan sprzed założenia doświadczenia)

W ramach doświadczenia, w każdym z czterech wariantów wylosowano po 20 punktów badawczych. W wybranych punktach przeprowadzono pomiary spektrometryczne z



wykorzystaniem urządzenia ScanSpectrum v4, a także wykonano zbiór metrowki dla oceny plonu i cech jakościowych ziarna. Dodatkowo, zaplanowano szczegółowe analizy substratu kokosowego, pożywki oraz odcieku, z uwzględnieniem ich parametrów fizykochemicznych i zawartości składników pokarmowych. Skład zastosowanego odcieku charakteryzował się m.in. odczynem pH 6,27, przewodnością elektryczną EC 1,17 mS/cm, oraz obecnością takich składników jak azot ($89 \text{ mg/dm}^3 \text{ N-NO}_3$), fosfor ($24 \text{ mg/dm}^3 \text{ P}$), potas ($95 \text{ mg/dm}^3 \text{ K}$), wapń ($82 \text{ mg/dm}^3 \text{ Ca}$), magnez ($17 \text{ mg/dm}^3 \text{ Mg}$), a także mikroelementy, w tym żelazo, mangan, cynk, miedź i bor. W przypadku wariantu IV zastosowano dolistny nawóz PLONVIT® ZBOŻA, zawierający azot całkowity (5,0%), tlenek magnezu (2,0%), tritlenek siarki (6,5%) oraz pełen zestaw mikroelementów w formach łatwo przyswajalnych przez rośliny. Technologia NUTRIBOOST™ zawarta w nawozie umożliwia skuteczne pobieranie składników przez liście i sprzyja intensyfikacji procesów metabolicznych w roślinie.

W celu porównania efektywności nawożenia pochodzącego z zastosowanego odcieku pożywki oraz komercyjnego środka dolistnego PLONVIT® ZBOŻA, dokonano przeliczenia ilości dostarczanych składników pokarmowych na jednostkę powierzchni (g/ha) w odniesieniu do rzeczywistych dawek aplikacyjnych. Tabela 3 zawiera zestawienie masy poszczególnych składników dostarczanych w ww. dawkach.

Tabela 3. Skład makro i mikroelementów w zastosowanych dawkach nawożenia dolistnego

Składnik	PLONVIT® (1 l/ha) (g/ha)	Odciek 2000 l/ha (g/ha)	Odciek 8000 l/ha (g/ha)
Azot (N)	67,5	183,3	733,2
Magnez (Mg)	16,28	34	136
Siarka (S)	35,2	36	144
Bor (B)	0,54	0,8	3,2
Miedź (Cu)	5,4	0,04	0,16
Żelazo (Fe)	23	1,52	6,08
Mangan (Mn)	23	1	4
Cynk (Zn)	17	0,5	2
Fosfor (P)	—	48	192
Potas (K)	—	190	760
Wapń (Ca)	—	164	656

Analiza wykazała, iż odciek pożywki, szczególnie w dawce 8000 l/ha, dostarcza znacznie wyższe ilości makroskładników, takich jak azot (733,2 g/ha), potas (760 g/ha), wapń (656 g/ha), fosfor (192 g/ha) czy magnez (136 g/ha), które mogą istotnie wpływać na wzrost biomasy i plonowanie roślin. Z kolei środek PLONVIT®, mimo niskiej dawki aplikacyjnej,



wyróżniał się wysoką koncentracją mikroelementów – głównie żelaza (23 g/ha), manganu (23 g/ha), cynku (17 g/ha) oraz miedzi (5,4 g/ha), których ilość w odcieku była znacząco niższa.

Wyniki te wskazują, że odciek może stanowić cenne źródło składników pokarmowych, zwłaszcza w kontekście nawożenia podstawowego upraw polowych. Jednocześnie PLONVIT® ZBOŻA wykazuje potencjał jako uzupełniający nawóz mikroelementowy, szczególnie efektywny w aplikacji dolistnej. Zastosowanie obu źródeł nawożenia może prowadzić do synergicznego efektu, umożliwiającego zarówno zaspokojenie potrzeb pokarmowych roślin, jak i optymalizację wykorzystania produktów ubocznych z upraw tunelowych.

Analizę wyników odniesiono do warunków siedliskowych każdego pola, w tym parametrów gleby, takich jak pH, zasobność w fosfor, potas i magnez, a także potrzeby wapnowania. Na obu polach gleby zakwalifikowano jako lekkie, o odczynie od kwaśnego do lekko kwaśnego, z wysoką zasobnością w składniki mineralne, przy czym wykazano lokalne zróżnicowanie w zakresie zasobności i pH.

Doświadczenie ma na celu ocenę możliwości zagospodarowania produktów ubocznych pochodzących z upraw tunelowych truskawki w kontekście ich potencjalnego wykorzystania w nawożeniu upraw polowych, jako alternatywy dla tradycyjnych nawozów mineralnych.

4.15. Statystyczne opracowanie wyników badań

W celu opracowania wyników badań zastosowano szereg metod statystycznych, umożliwiających kompleksową analizę uzyskanych danych. W pierwszej kolejności przeprowadzono analizę statystyk opisowych, obejmującą podstawowe miary tendencji centralnej, takie jak średnia arytmetyczna, mediana oraz dominanta, a także miary zróżnicowania, w tym odchylenie standardowe i współczynnik zmienności. Pozwoliło to na uzyskanie ogólnego obrazu zbioru danych oraz określenie stopnia ich rozproszenia.

W celu graficznej prezentacji wielowymiarowych wyników zastosowano wykresy radarowe, które umożliwiły jednoczesne przedstawienie wartości dla wielu zmiennych. Dzięki tej metodzie możliwe było wizualne porównanie analizowanych obiektów oraz identyfikacja ewentualnych wzorców w strukturze danych.

Do oceny istotności różnic pomiędzy grupami zastosowano analizę wariancji (ANOVA). Metoda ta pozwoliła na weryfikację hipotezy o równości średnich w różnych grupach badawczych oraz określenie, czy zaobserwowane różnice były statystycznie istotne. W przypadku stwierdzenia istotnych różnic zastosowano dodatkowe testy post-hoc, które umożliwiły identyfikację par grup odpowiedzialnych za te różnice.



W celu redukcji wymiarowości danych oraz identyfikacji głównych składowych struktury badanych zmiennych przeprowadzono analizę głównych składowych (PCA). Metoda ta umożliwiła transformację zbioru zmiennych skorelowanych na nowy zbiór zmiennych niezależnych, co pozwoliło na lepsze zrozumienie relacji pomiędzy badanymi czynnikami oraz redukcję liczby zmiennych w dalszej analizie.

W przypadku analizy danych pochodzących z badań ankietowych zastosowano odpowiednie metody statystyczne, uwzględniające zarówno pytania o charakterze ilościowym, jak i jakościowym. Oceniono rozkłady odpowiedzi, obliczono podstawowe statystyki opisowe oraz przeanalizowano zależności pomiędzy zmiennymi. W celu weryfikacji zależności pomiędzy zmiennymi kategorialnymi przeprowadzono test chi-kwadrat, który pozwolił na ocenę zgodności rozkładów empirycznych z rozkładami teoretycznymi oraz określenie, czy istnieją statystycznie istotne związki pomiędzy analizowanymi zmiennymi.

Zastosowanie powyższych metod pozwoliło na kompleksową i wieloaspektową analizę uzyskanych wyników, umożliwiając zarówno eksplorację struktury danych, jak i ocenę istotności statystycznej obserwowanych zależności. Dzięki temu możliwe było wyciągnięcie rzetelnych i naukowo uzasadnionych wniosków dotyczących badanego zagadnienia.

5. Wyniki badań

5.1. Ocena wpływu rodzaju oświetlenia LED na wzrost i kondycję sałaty w systemie akwaponicznym

5.1.1. Ocena cech plonotwórczych i jakości

Badanie miało na celu ocenę wpływu różnych wariantów oświetlenia LED na rozwój sałaty uprawianej w warunkach akwaponicznych. Eksperyment przeprowadzono w warunkach kontrolowanych, gdzie jedynym źródłem światła były sztuczne systemy oświetleniowe. Jako punkt odniesienia (kontrolę) przyjęto średnie wartości uzyskane w dwóch niezależnych doświadczeniach, w których zastosowano świetlówki o barwie zimnej (6500 K) i barwie ciepłej (3000 K).

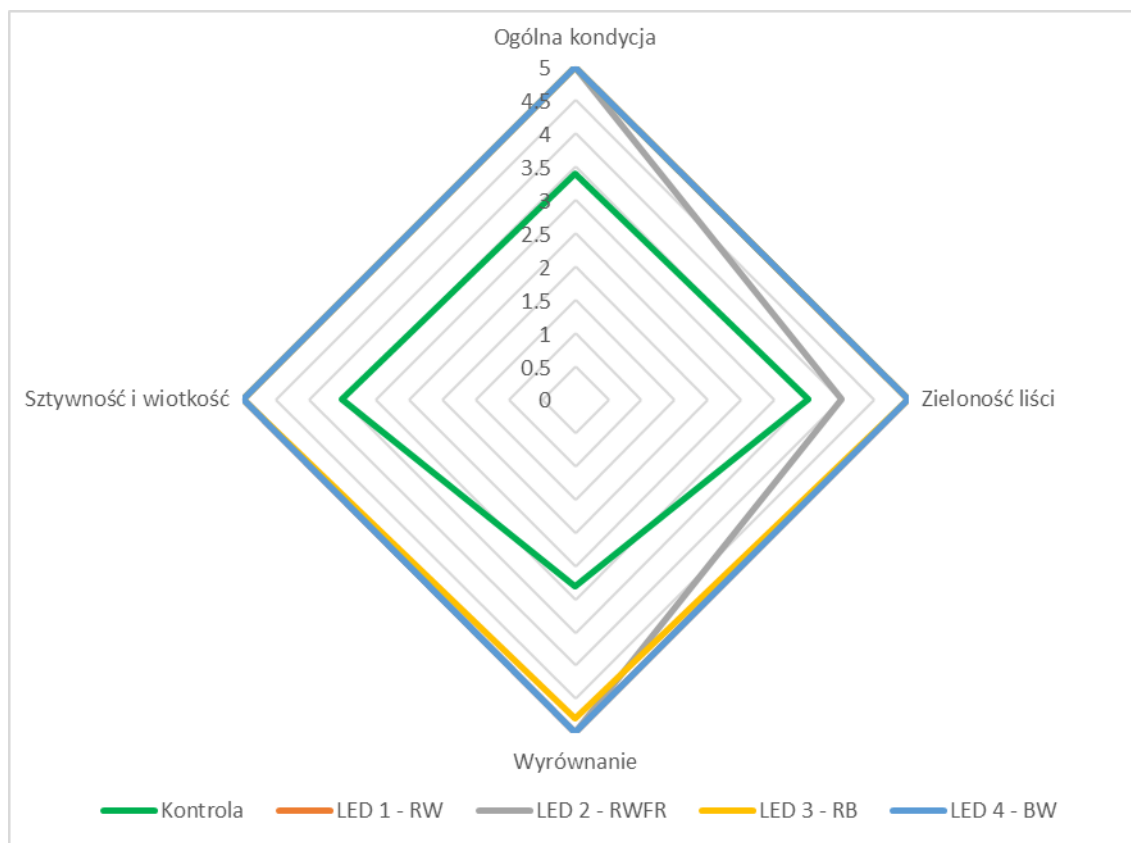
Ocenie poddano osiem cech roślin, z czego sześć było wartościami subiektywnymi ocenianymi w skali eksperckiej od 0 do 5, gdzie 0 oznaczało brak danej cechy, a 5 jej najwyższą wartość (Tabela 4). Dwie pozostałe cechy, tj. świeża masa i liczba liści, miały charakter wartości mierzalnych. Wszystkie pomiary były powtarzane pięciokrotnie w każdym wariantcie oświetlenia.

Tabela 4. Średnie wyniki oceny plonu i jakości sałaty

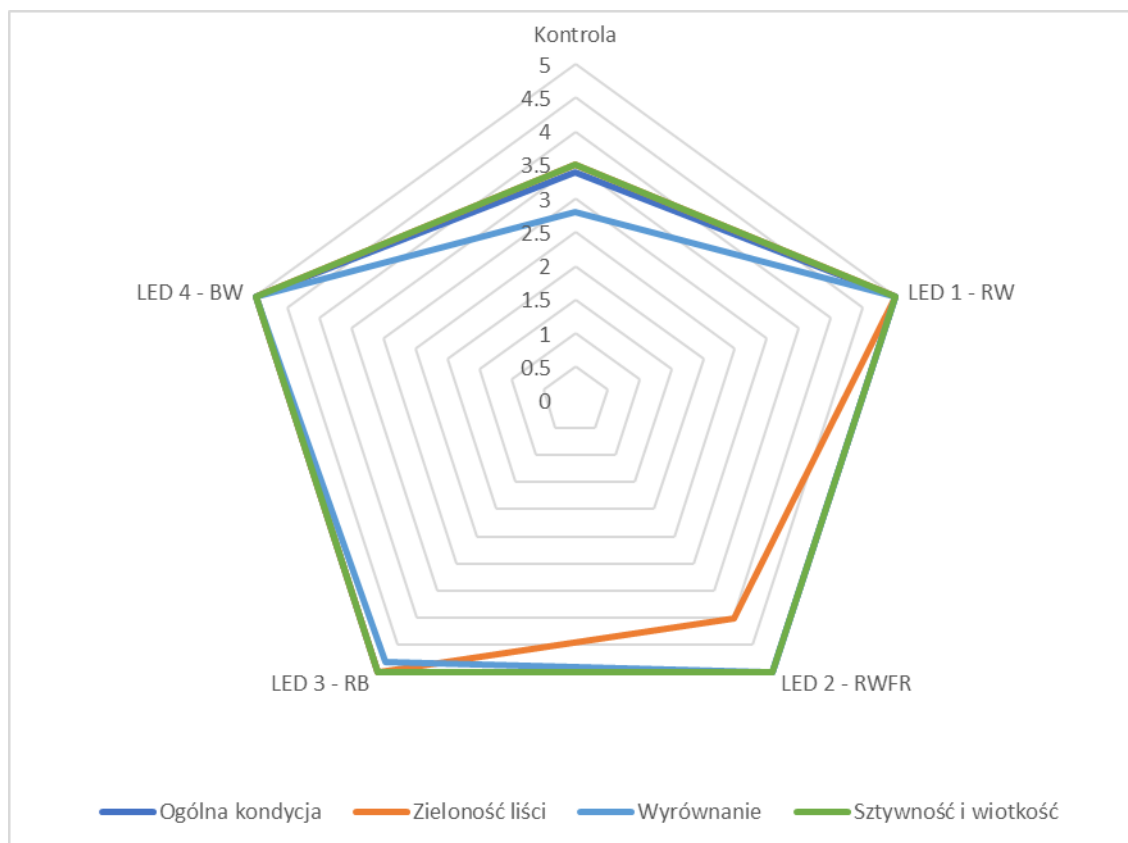


Oświetlenie	Ogólna kondycja	Zieloność liści	Chlorozy	Nekrozy	Wyrównanie	Sztywność i wiotkość	Świeża masa	Liczba liści
Kontrola1	3,8	4	0	0	3,6	4	157,78	24,2
Kontrola2	3	3	0	0	2	3	94,54	16,6
Kontrola	3,4	3,5	0	0	2,8	3,5	126,16	20,4
LED 1 - RW	5	5	0	0	5	5	204,5	38,4
LED 2 - RWFR	5	4	0	0	5	5	225,54	39,6
LED 3 - RB	5	5	0	0	4,8	5	138,7	30,8
LED 4 - BW	5	5	0	0	5	5	129,38	35,2

Z uwagi na brak zmienności cech „Chlorozy” oraz „Nekrozy” (wszystkie wartości równe 0), zostały one wyłączone z dalszej analizy statystycznej. Porównanie wpływu różnych wariantów oświetlenia na kondycję i wzrost sałaty wskazuje na istotne różnice pomiędzy kontrolą a oświetleniem LED. Oceniając ogólną kondycję oraz zieloność liści, możemy zaobserwować, iż wariant kontrolny uzyskał niższe oceny ogólnej kondycji (3,4) oraz zieloności liści (3,5) w porównaniu do wszystkich wariantów LED, które uzyskały wartość maksymalną (5) z wyjątkiem wariantu LED 2 - RWFR, gdzie zieloność liści oceniono na 4. Oznacza to, że zastosowanie diod LED poprawiło zarówno zdrowotność, jak i intensywność wybarwienia liści w stosunku do świetlówek fluorescencyjnych. Wpływ oświetlenia na wyrównanie roślin oraz sztywność/wiotkość był zauważalny. Parametry te były wyraźnie niższe w kontroli (2,8 dla wyrównania i 3,5 dla sztywności/wiotkości) niż w wariantach LED. Oświetlenie LED przyczyniło się do lepszego wyrównania roślin i większej sztywności liści, co jest korzystnym efektem dla jakości handlowej sałaty. Wariant LED 3 - RB uzyskał minimalnie niższą ocenę wyrównania (4,8), co może sugerować, że ten zakres spektrum nie sprzyjał uzyskaniu pełnej jednorodności roślin (Rysunek 16, Rysunek 17).



Rysunek 16. Ocena (skala od 0 do 5) jakości plonu sałaty w podziale na zastosowane oświetlenie

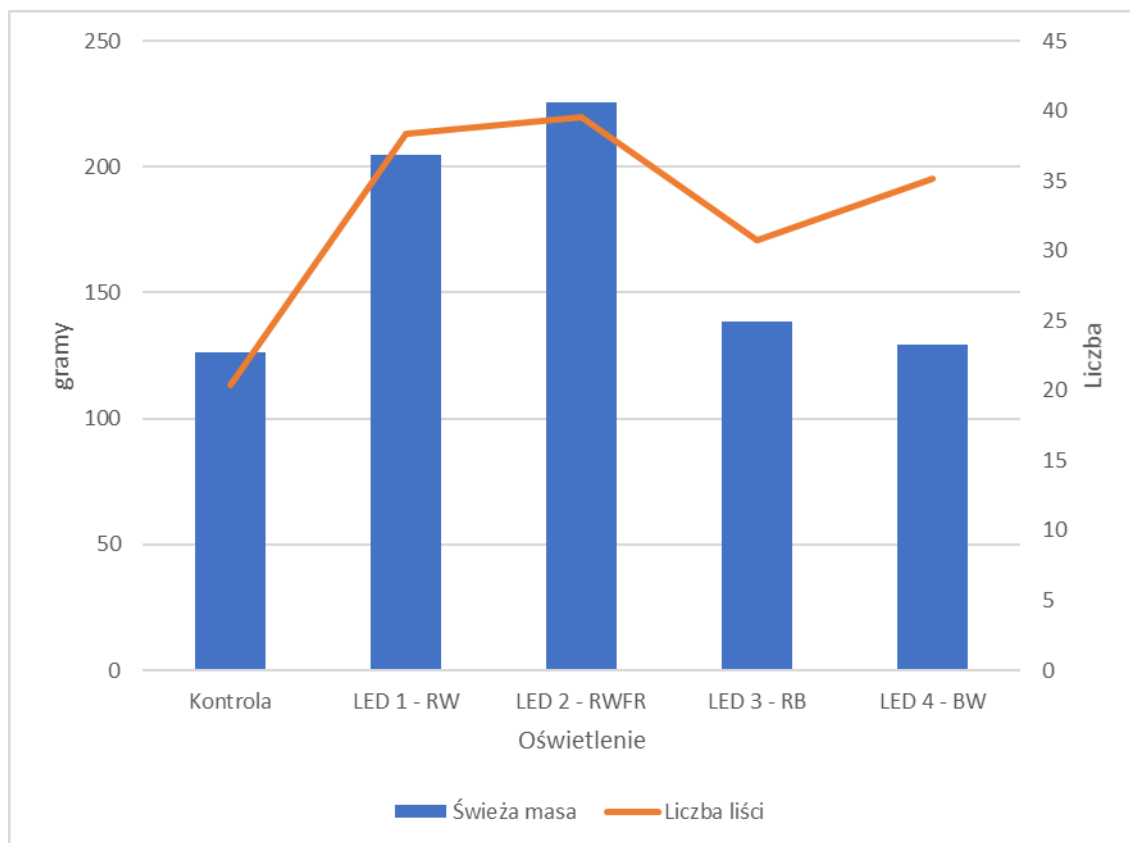


Rysunek 17. Ocena (skala od 0 do 5) jakości plonu sałaty w podziale na zastosowane oświetlenie

Pomiary ilościowe świeżej masy oraz liczby liści na roślinie potwierdziły obserwacje wizualne. Najniższą świeżą masę uzyskano w kontroli (126,16 g), natomiast najwyższą w wariantach LED 2 - RWFR (225,54 g) oraz LED 1 - RW (204,5 g). Oświetlenie LED, szczególnie warianty RWFR i RW, znacząco wpłynęły na wzrost biomasy roślin. Podobną zależność zaobserwowano dla liczby liści – kontrola wykazała średnią wartość 20,4 liścia, podczas gdy w warunkach oświetlenia LED wartość ta wynosiła od 30,8 (LED 3 - RB) do 39,6 (LED 2 - RWFR) (Rysunek 18). Oświetlenie LED wpłynęło więc nie tylko na zwiększenie masy roślin, ale także na ich lepsze rozkrzewienie.

Podsumowując, zastosowanie oświetlenia LED w uprawie akwaponicznej sałaty wyraźnie poprawiło jej kondycję, wyrównanie oraz parametry wzrostu w porównaniu do tradycyjnych świetlówek fluorescencyjnych. Najlepsze efekty uzyskano w wariantcie LED 2 - RWFR, gdzie zaobserwowano najwyższe wartości świeżej masy oraz liczby liści. Wariant LED 1 - RW również wykazywał wysokie wartości tych parametrów.

Oświetlenie LED nie tylko sprzyjało intensywniejszemu wybarwieniu liści i poprawie struktury roślin, ale także prowadziło do większego przyrostu biomasy, co może mieć istotne znaczenie dla optymalizacji produkcji sałaty w systemach akwaponicznych.



Rysunek 18. Średnie wartości plonu sałaty w podziale na zastosowane oświetlenie

Analiza wskaźnika ilorazowego dla ocenianych i mierzonych cech sałaty w zależności od rodzaju oświetlenia LED

Aby ułatwić porównanie wpływu różnych wariantów oświetlenia LED na kondycję i wzrost sałaty, obliczono wskaźnik ilorazowy dla każdej cechy. Wskaźnik ten przedstawia stosunek wartości danej cechy uzyskanej w warunkach oświetlenia LED do wartości uzyskanej w kontroli (świełówki fluorescencyjne). Wartość równa 1 oznacza brak różnicy w stosunku do kontroli, wartości powyżej 1 wskazują na wzrost danej cechy, natomiast wartości poniżej 1 (które w tym przypadku nie wystąpiły) oznaczałyby jej obniżenie.

Porównując wyznaczone ilorazy wartości uzyskanej dla oświetlenia LED względem kontroli zauważamy (Rysunek 19, Rysunek 20), że ogólna kondycja dla wszystkich wariantów LED wskaźnik wyniósł 1,47, co oznacza poprawę tej cechy o 47% w stosunku do kontroli. Zieloność liści wykazywała natomiast większą zmienność – w większości wariantów LED wartość ta wynosiła 1,43, co wskazuje na wzrost o 43%, jednak w wariantach LED 2 - RWFR wskaźnik był niższy (1,14), co może oznaczać nieco mniejszą intensywność wybarwienia liści w porównaniu do innych wariantów LED.

Wskaźnik wyrównania roślin był najwyższy i wynosił od 1,71 do 1,79, co oznacza, że oświetlenie LED znacząco poprawiło jednorodność roślin w porównaniu do kontroli. Oznacza



to, że w warunkach oświetlenia LED rośliny były bardziej jednolite pod względem wielkości i rozwoju.

Sztywność i wiotkość w każdym wariantcie LED była wyższa o 43% względem kontroli (wskaźnik 1,43). Świadczy to o lepszej strukturze liści w warunkach LED, co może wpływać na jakość handlową sałaty.

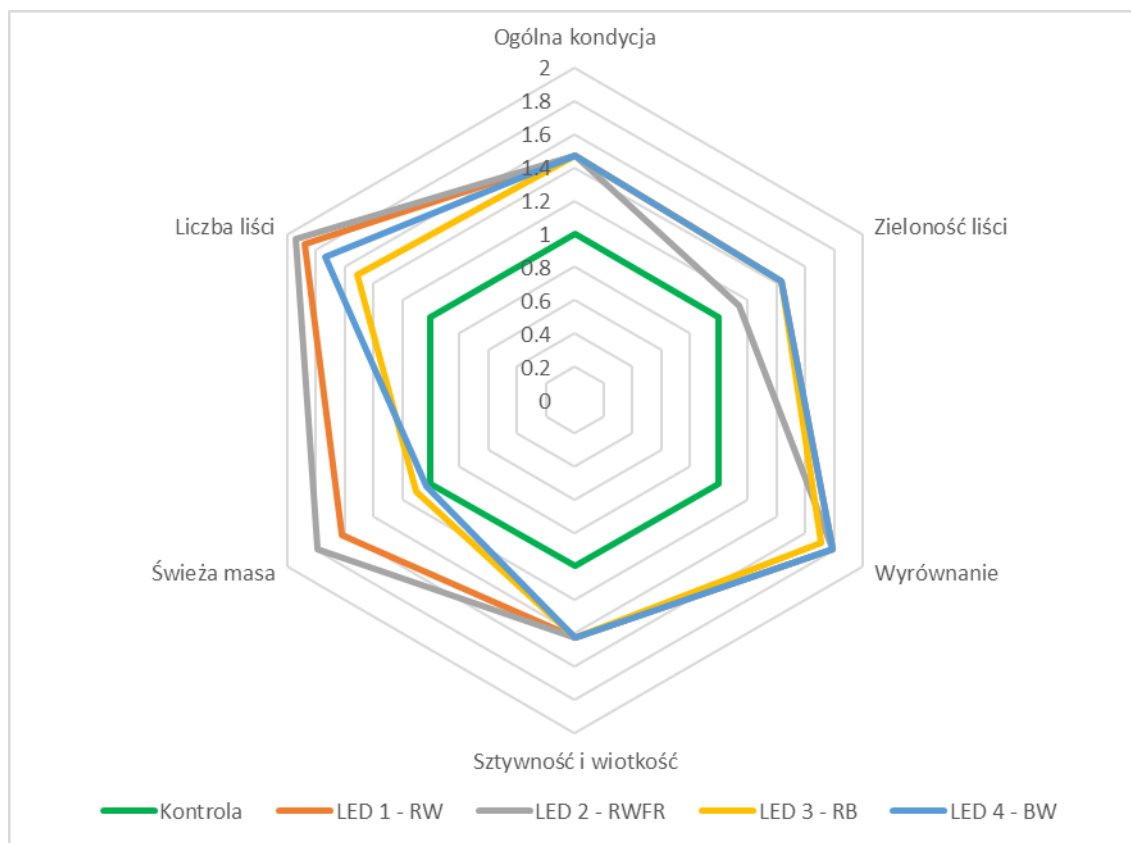
Największe różnice pomiędzy wariantami LED, a kontrolą zaobserwowano w parametrach wzrostowych. Świeża masa roślin w warunkach LED była wyższa od kontroli, jednak różnice pomiędzy wariantami były znaczne. Największy przyrost biomasy odnotowano w wariantcie LED 2 - RWFR (wskaźnik 1,79, co oznacza wzrost o 79%) oraz LED 1 - RW (wskaźnik 1,62, wzrost o 62%). Warianty LED 3 - RB oraz LED 4 - BW wykazywały natomiast niższe wartości wskaźnika (1,1 oraz 1,03), co sugeruje, że te konfiguracje spektralne były mniej efektywne w zwiększaniu biomasy sałaty.

Liczba liści we wszystkich wariantach LED była istotnie wyższa niż w kontroli. Największy wzrost zaobserwowano w wariantcie LED 2 - RWFR (wskaźnik 1,94, wzrost o 94%) oraz LED 1 - RW (wskaźnik 1,88, wzrost o 88%). Warianty LED 4 - BW i LED 3 - RB wykazały nieco mniejsze wartości (1,73 i 1,51), jednak wciąż wyraźnie przewyższające kontrolę.

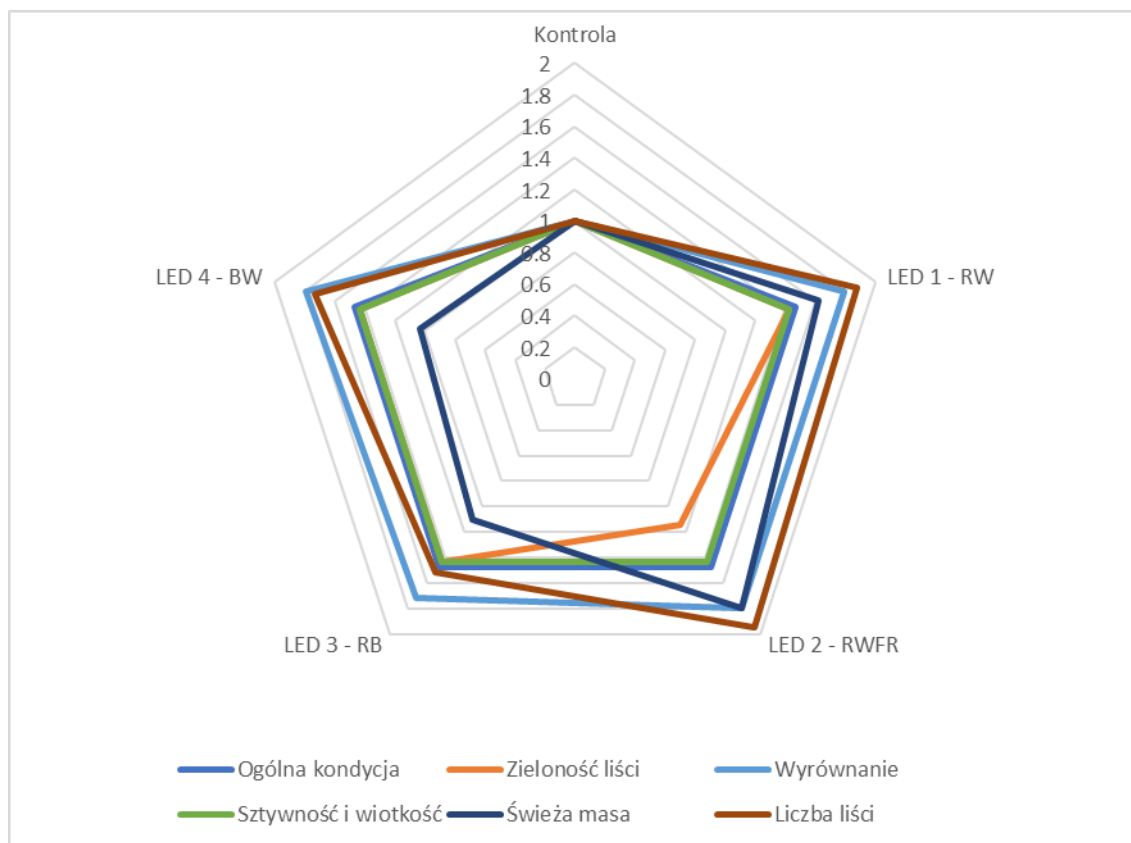
Podsumowując, analiza wskaźnika ilorazowego potwierdza pozytywny wpływ oświetlenia LED na wzrost i jakość sałaty w porównaniu do tradycyjnych świetlówek fluorescencyjnych.

Wszystkie warianty LED poprawiły ogólną kondycję, wyrównanie oraz sztywność roślin, co może wpływać na ich wyższą wartość handlową. Zieloność liści była znacząco lepsza w większości wariantów LED, choć LED 2 - RWFR wykazał w tym aspekcie nieco niższą wartość wskaźnika. Największe przyrosty biomasy i liczby liści uzyskano w wariantach LED 2 - RWFR i LED 1 - RW, co sugeruje ich największą efektywność dla produkcji sałaty w systemach akwaponicznych. Warianty LED 3 - RB i LED 4 - BW, mimo że poprawiły oceniane cechy w stosunku do kontroli, były mniej efektywne w zwiększaniu świeżej masy roślin.

Wyniki te mogą być istotne dla praktyki rolniczej, wskazując na możliwość optymalizacji składu spektrum światła LED w celu uzyskania najlepszych efektów wzrostowych i jakościowych sałaty uprawianej w systemach akwaponicznych.



Rysunek 19. Wskaźniki ilorazu wartości plonu i jakości sałaty doświetlanych do kontroli w podziale na zastosowane oświetlenie



Rysunek 20. Wskaźniki ilorazu wartości plonu i jakości sałaty doświetlanych do kontroli



5.1.2. Analiza wpływu rodzaju oświetlenia na cechy sensoryczne sałaty

Na podstawie badania panelu konsumenckiego otrzymano wyniki, gdzie średnie wartości przedstawia Tabela 5 i Rysunek 21. Najwyższą ogólną pożądalność odnotowano dla wariantów LED 1 - RW (4,44) oraz LED 2 - RWFR (4,33), co wskazuje na ich największą atrakcyjność sensoryczną wśród ocenianych wariantów. Dla porównania, kontrola uzyskała wynik 3,0, co oznacza istotną poprawę w wariantach LED.

Podobny trend zaobserwowano także w przypadku ogólnej oceny, gdzie najwyższy wynik uzyskał wariant LED 2 - RWFR (4,50), a następnie LED 1 – RW (4,44). Warianty te były wyraźnie lepiej oceniane niż kontrola (3,14), co wskazuje na pozytywny wpływ określonych spektrów światła na walory sensoryczne sałaty.

Kruchość liści była najwyższa w wariancie LED 2 - RWFR (4,56), co sugeruje, że to oświetlenie sprzyjało bardziej chrupiącej strukturze liści. Wysoką kruchość odnotowano również dla LED 1 - RW (4,22), natomiast kontrola uzyskała niższy wynik (3,61).

Twardość liści również była najwyższa w wariancie LED 2 - RWFR (3,89), co oznacza, że liście były bardziej zwarte i miały lepszą strukturę mechaniczną. Porównując z kontrolą (2,72), oświetlenie LED miało wyraźny wpływ na ten parametr.

Smak słodki był najwyraźniej zaznaczony w wariancie LED 1 - RW (4,0), co może wskazywać na intensyfikację syntezy cukrów pod tym spektrum światła. Wysoką wartość uzyskał również LED 3 - RB (3,94), podczas gdy kontrola osiągnęła jedynie 2,39.

Smak trawiasty był bardziej intensywny w wariancie LED 2 - RWFR (2,33) i zbliżony do wartości kontrolnej (2,28), co oznacza niewielką różnicę pomiędzy próbami.

Smak gorzki miał najniższą intensywność w wariancie LED 3 - RB (0,56) oraz LED 1 - RW (1,11), co może być korzystne dla akceptacji konsumenckiej. Wartość w kontroli wynosiła 1,22.

Smak stęchły, kwaśny i piekący były nisko oceniane we wszystkich wariantach, co wskazuje na brak negatywnego wpływu oświetlenia LED na te cechy.

Podsumowując, najlepiej ocenianym wariantem pod względem cech sensorycznych był LED 2 - RWFR, który uzyskał najwyższe wartości dla ogólnej oceny, kruchości oraz twardości liści.

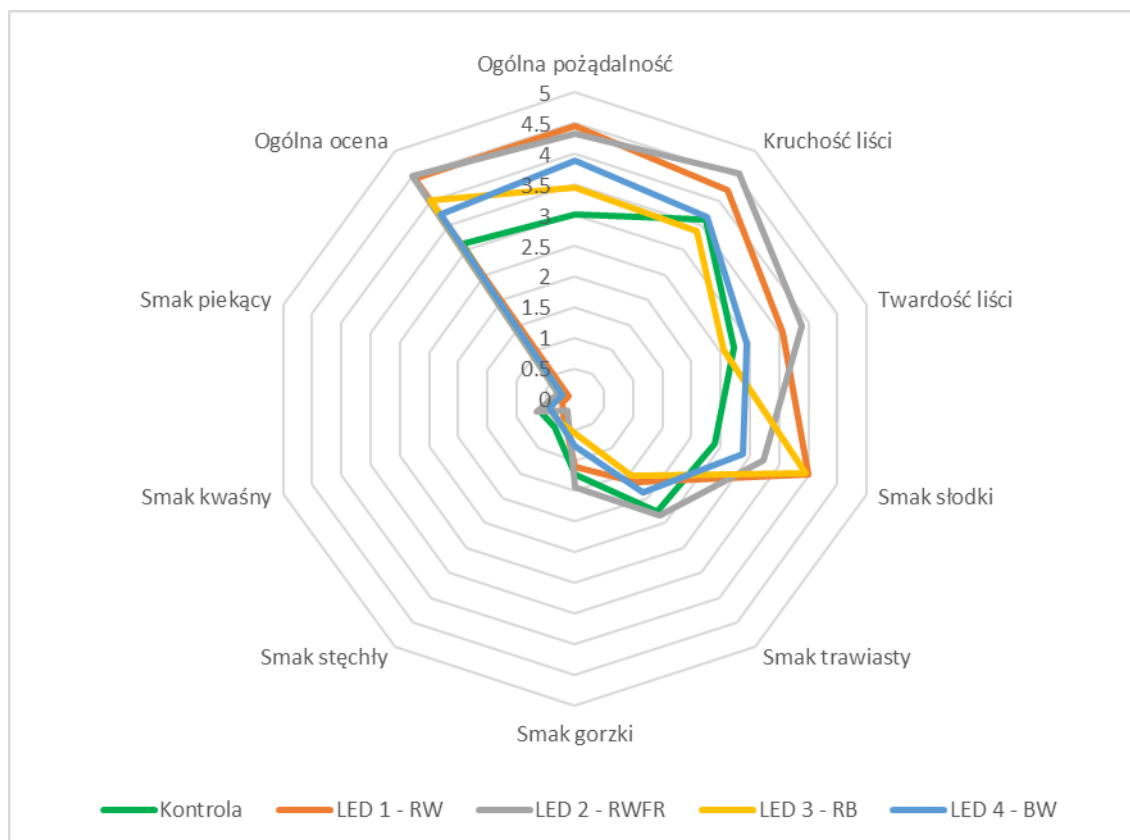
LED 1 - RW wykazał najlepszy wpływ na smak słodki, co może mieć istotne znaczenie dla preferencji konsumenckich. LED 3 - RB wyróżniał się niskim natężeniem smaku gorzkiego, co może zwiększać akceptację produktu. Wariant LED 4 - BW osiągnął umiarkowane wyniki, nie dominując w żadnym z kluczowych parametrów.



Możemy stwierdzić, iż oświetlenie LED miało istotny wpływ na poprawę cech sensorycznych sałaty w porównaniu do kontroli, przy czym największe korzyści zaobserwowano w wariantach LED 2 - RWFR i LED 1 - RW.

Tabela 5. Średnie wyniki oceny konsumenckiej sałaty

Oświetlenie	Ogólna pożądalność	Kruch ość liści	Tward ość liści	Smak słodki	Smak trawia sty	Smak gorzki	Smak stęchły	Smak kwaśny	Smak piekący	Ogólna ocena
Kontrola1	3,17	3,89	2,89	2,33	2,11	1,11	0,56	0,67	0,33	3,11
Kontrola2	2,83	3,33	2,56	2,44	2,44	1,33	0,56	0,56	0,22	3,17
Kontrola (średnia wartość Kontroli 1 i Kontroli 2)	3,00	3,61	2,72	2,39	2,28	1,22	0,56	0,61	0,28	3,14
LED 1 - RW	4,44	4,22	3,56	4,00	1,67	1,11	0,33	0,22	0,11	4,44
LED 2 - RWFR	4,33	4,56	3,89	3,22	2,33	1,44	0,22	0,67	0,28	4,50
LED 3 - RB	3,44	3,39	2,56	3,94	1,56	0,56	0,44	0,44	0,22	4,00
LED 4 - BW	3,89	3,67	2,94	2,89	1,89	0,78	0,44	0,44	0,22	3,72



Rysunek 21. Średnie wartości oceny konsumenckiej cech sensorycznych sałaty w skali od 0 do 5.

Względna analiza wpływu oświetlenia LED na cechy sensoryczne sałaty

Aby określić wpływ różnych wariantów oświetlenia LED na cechy sensoryczne sałaty, dokonano porównania wartości średnich dla poszczególnych wariantów z kontrolą, stosując wskaźnik ilorazowy. Wartości powyżej 1 oznaczają poprawę danej cechy w porównaniu do kontroli, natomiast wartości poniżej 1 wskazują na jej osłabienie. Wartości procentowe przedstawiają względną zmianę danej cechy w stosunku do kontroli (Rysunek 22, Rysunek 23).

Największy wzrost ogólnej pożądalności odnotowano dla LED 1 - RW (+48,1%) oraz LED 2 - RWFR (+44,4%), co potwierdza ich silny, pozytywny wpływ na atrakcyjność sensoryczną sałaty. Ocena ogólna była najwyższa dla LED 2 - RWFR (+43,4%) oraz LED 1 - RW (+41,6%), co wskazuje na wyraźną poprawę odbioru produktu przez panel konsumencki. Warianty LED 3 - RB (+27,4%) i LED 4 - BW (+18,6%) miały mniejszy wpływ, jednak również poprawiały ogólną ocenę w stosunku do kontroli.

Tekstura liści (kruchość i twardość) przedstawiała się następująco. Kruchość liści wzrosła najbardziej dla LED 2 - RWFR (+26,2%), co oznacza, że liście były bardziej chrupkie w porównaniu do kontroli. LED 1 - RW poprawił kruchość o 16,9%, co również stanowi istotną



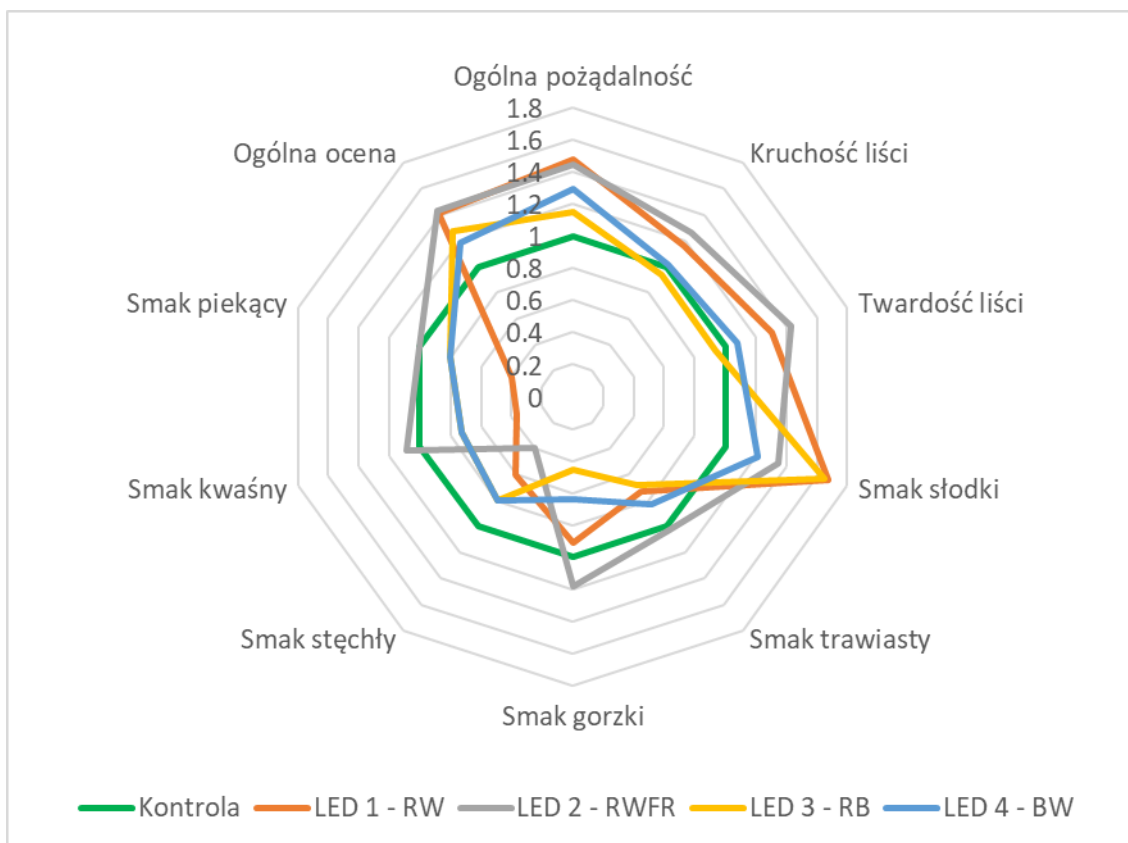
różnicę. LED 3 - RB zmniejszył kruchość o 6,1%, co może wskazywać na bardziej miękkie liście. Największy wzrost twardości liści uzyskano dla LED 2 - RWFR (+42,8%), co sugeruje, że struktura liści była bardziej zwarta. LED 1 - RW zwiększył twardość liści o 30,6%, natomiast LED 3 - RB nie wpłynął na ten parametr w sposób istotny (-6,1%).

Profil smakowy to zespół cech na które wpływ miało zastosowane oświetlenie. Smak słodki był najbardziej intensyfikowany przez LED 1 - RW (+67,5%) oraz LED 3 - RB (+65,1%), co sugeruje większą zawartość cukrów w liściach. LED 2 - RWFR zwiększył słodycz o 34,9%, a LED 4 - BW o 20,9%. Smak trawiasty uległ niewielkiej zmianie dla LED 2 - RWFR (+2,4%), natomiast LED 1 - RW (-26,8%) i LED 3 - RB (-31,7%) znacząco obniżyły tę cechę, co może być korzystne dla percepcji konsumentów. Smak gorzki został najbardziej zredukowany przez LED 3 - RB (-54,5%) oraz LED 4 - BW (-36,3%), co wskazuje na niższą percepcję tej niepożądaney cechy. Smak stęchły został najbardziej zredukowany przez LED 2 - RWFR (-60,1%), LED 1 - RW (-40,1%) oraz LED 4 - BW (-20,1%), co sugeruje lepszą świeżość produktu. Smak kwaśny był najniższy dla LED 1 - RW (-63,7%), natomiast LED 2 - RWFR wykazywał wzrost (+9,1%). Smak piekący pozostał na podobnym poziomie w stosunku do kontroli, z największym obniżeniem dla LED 1 - RW (-60%).

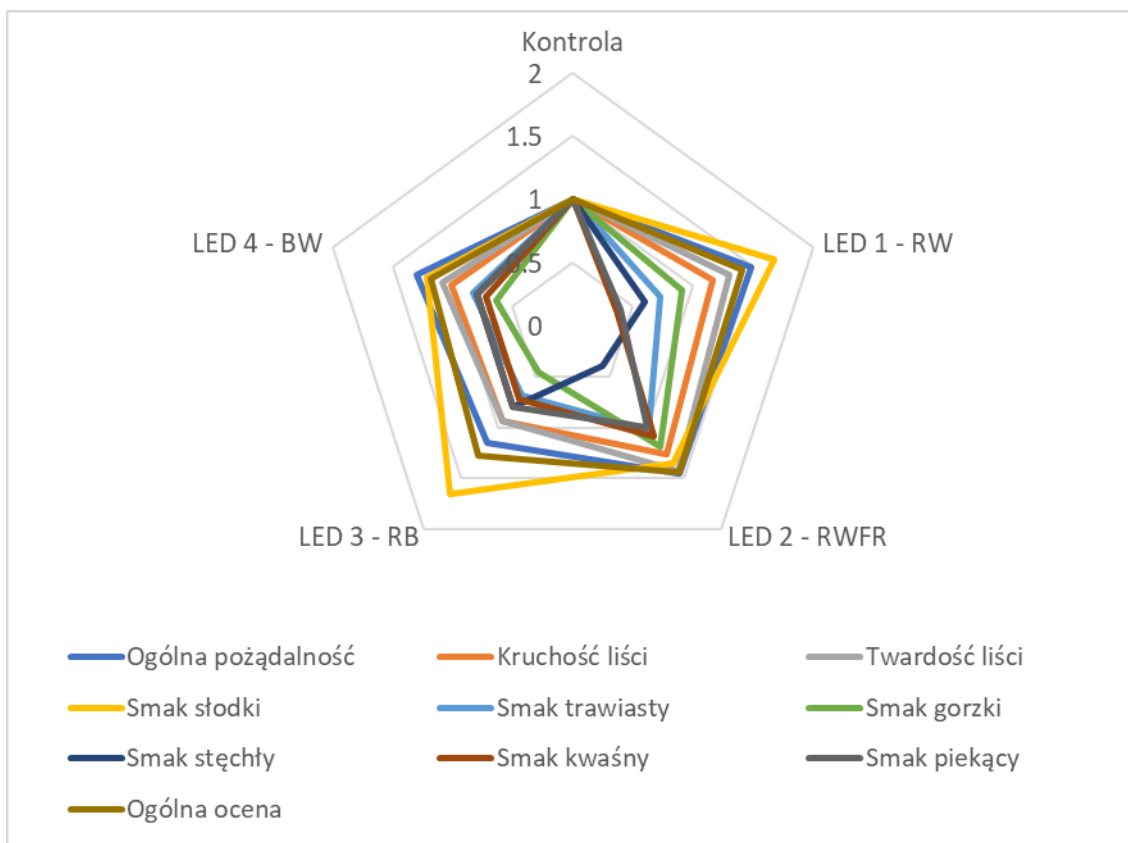
Podsumowując można stwierdzić, iż:

LED 2 - RWFR okazał się najkorzystniejszym wariantem pod względem poprawy struktury liści (kruchości i twardości), a także ogólnej oceny sensorycznej (+43,4%). LED 1 - RW znacząco zwiększał intensywność smaku słodkiego (+67,5%) oraz poprawiał ogólną pożywalność (+48,1%). LED 3 - RB najlepiej redukował smak gorzki (-54,5%), co może poprawiać akceptację konsumentką. LED 4 - BW wykazywał umiarkowane zmiany, nie dominując w żadnym z kluczowych aspektów.

Oświetlenie LED miało istotny wpływ na poprawę walorów sensorycznych sałaty, a dobór odpowiedniego spektrum światła może być kluczowy w kształtowaniu jakości końcowego produktu.



Rysunek 22. Ilorazy wartości oceny konsumennej cech sensorycznych sałaty z podziałem na rodzaj oświetlenia.



Rysunek 23. Ilorazy wartości oceny konsumennej cech sensorycznych sałaty.



5.1.3. Analiza chemiczna zawartości makro i mikro elementów oraz substancji chemicznych w roślinach sałaty

Rośliny sałaty, po zbiorze oraz przeprowadzeniu oceny plonu, jego jakości i preferencji konsumenckich, zostały przekazane do akredytowanego laboratorium celem oznaczenia zawartości wybranych związków chemicznych i pierwiastków. Analizowano wpływ zastosowanych wariantów oświetlenia LED, porównując wyniki z wartościami uzyskanymi dla próby kontrolnej, którą wyznaczono jako wartości średnie dwóch kontroli, gdzie rośliny były doświetlane światłem białym zimnym o temperaturze barwowej 6500 K oraz światłem białym ciepłym o temperaturze barwowej 3000 K.

Skład makro i mikroelementów w roślinach sałaty

Miedź (Cu)

Najwyższe stężenie miedzi odnotowano w kontroli (0,255 mg/kg s.m.), a najniższe przy LED 2 - RWFR (0,16 mg/kg), co oznacza redukcję aż o 37,3%. Wszystkie warianty LED powodowały spadki zawartości Cu – najmniejszy w LED 1 i 3 (-17,6%). Miedź jest składnikiem enzymów fotosyntetycznych i antyoksydacyjnych, dlatego jej obniżenie może wpływać na stres oksydacyjny i jakość fizjologiczną roślin. Wyrażna redukcja może wskazywać, że czerwone spektrum (RW i RWFR) ogranicza jej przyswajanie.

Mangan (Mn)

Najwyższy poziom manganu zanotowano w LED 4 - BW (0,48 mg/kg), co oznacza wzrost o 12,9% względem kontroli. Najniższe wartości wystąpiły w LED 3 - RB (0,32 mg/kg; spadek o 24,7%). Warianty LED 1 i 2 również obniżyły zawartość Mn. Ze względu na udział manganu w fotosystemie II, jego spadki mogą ograniczać wydajność fotosyntezy. Wzrost pod wpływem BW może wskazywać na korzystny wpływ pełnego widma na redystrybucję tego pierwiastka.

Fosfor (P)

Największą zawartość fosforu odnotowano dla LED 4 - BW (247 mg/kg), co stanowi wzrost o 13,3% względem kontroli. Najmniej P zawierały rośliny w LED 2 (204 mg/kg; spadek o 6,4%). Wszystkie inne warianty LED zwiększały zawartość fosforu. Fosfor jest kluczowy dla metabolizmu energetycznego, a jego wzrost w LED 4 może wskazywać na korzystne warunki do syntezy ATP i fosfolipidów.

Potas (K)

Wartość potasu była najwyższa w kontroli (3210,5 mg/kg), a najniższa przy LED 2 (2930 mg/kg), co oznacza spadek o 9%. Warianty LED 1 i 3 wykazywały niewielkie obniżenie (-0,7%



i -1,4%). LED 4 zredukował poziom K o 4,2%. Ponieważ potas odgrywa rolę w regulacji gospodarki wodnej i aktywności enzymatycznej, zmniejszone wartości mogą oznaczać słabszą regulację osmotyczną u roślin doświetlanych światłem o dominującym czerwonym i dalekiej czerwieni spektrum.

Magnez (Mg)

Najwyższą zawartość Mg stwierdzono przy LED 4 (103 mg/kg), co oznacza wzrost o 8% względem kontroli. Najniższy poziom wystąpił w LED 3 (88,8 mg/kg; spadek o 6,9%). Magnez jako centralny atom cząsteczki chlorofilu jest istotnym wskaźnikiem aktywności fotosyntetycznej. Wzrost pod wpływem światła BW może świadczyć o korzystnym wpływie tego spektrum na syntezę chlorofilu.

Wapń (Ca)

Najwyższy poziom Ca również zaobserwowano dla LED 4 (379 mg/kg), co stanowi wzrost o 6,6%. LED 1 i 3 wykazały spadki rzędu 4–5%, a LED 2 tylko o 0,5%. Wapń jest składnikiem strukturalnym ścian komórkowych i jego wzrost w BW może wskazywać na bardziej stabilne tkanki liściowe, co przekłada się na jakość przechowalniczą.

Bor (B)

Bor występował w największym stężeniu w LED 4 (0,95 mg/kg), co oznacza wzrost o 13,1% względem kontroli. Najniższy poziom był w LED 1 (0,79 mg/kg; spadek o 6%), a w LED 2 i 3 wartości były zbliżone do kontroli. Bor odgrywa rolę w rozwoju tkanek merystematycznych, więc wzrost jego zawartości może korzystnie wpływać na jakość rośliny i rozwój liści.

Żelazo (Fe)

Zawartość żelaza wzrosła we wszystkich wariantach LED, przy czym najwyższa wartość wystąpiła dla LED 4 (2,41 mg/kg), co oznacza wzrost o 52,5%. Najmniejsze zwiększenie miało miejsce w LED 1 (19%). LED 3 i 2 również wykazywały znaczne wzrosty. Żelazo uczestniczy w transporcie elektronów i oddychaniu komórkowym – jego wyraźny wzrost może wskazywać na zwiększoną aktywność metaboliczną pod wpływem światła LED, szczególnie przy pełnym widmie.

Sód (Na)

Najwyższy poziom sodu wystąpił dla LED 4 (27,1 mg/kg), co oznacza wzrost o 3%. Najniższy poziom – LED 2 (24,6 mg/kg; spadek o 6,6%). Warianty LED nie wpływały istotnie na poziom sodu, a niewielkie wahania mogą wynikać z mechanizmów regulacji wodnej i pasywnego transportu.

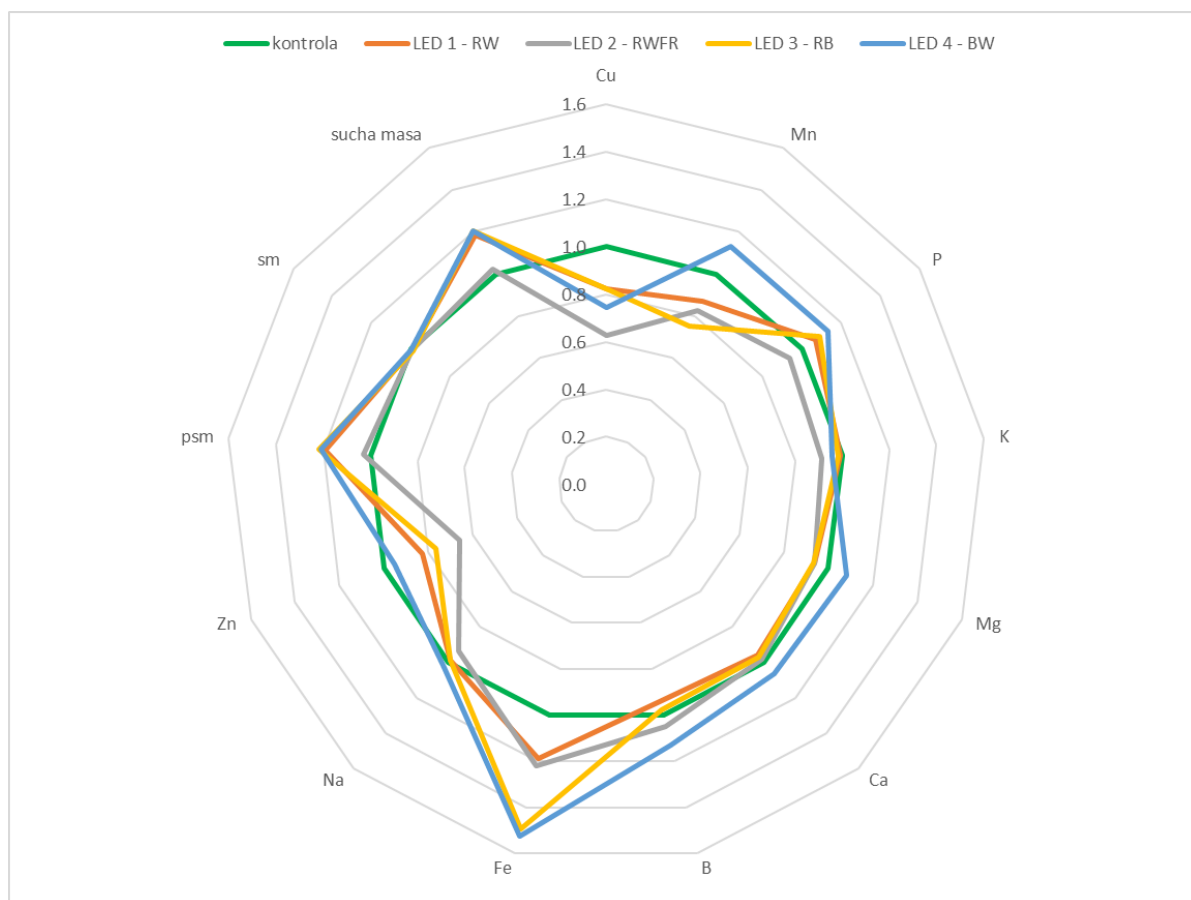
Cynk (Zn)



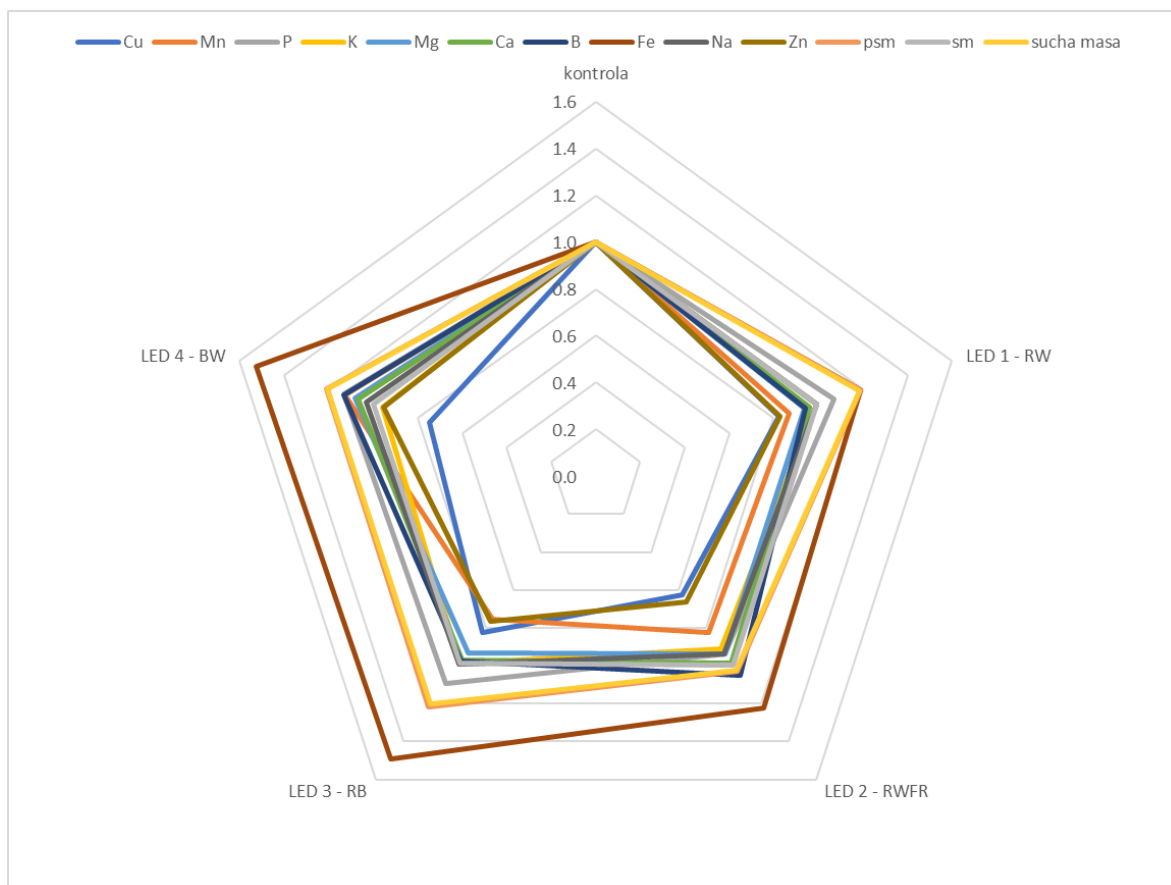
Cynk występował w największym stężeniu w kontroli (1,135 mg/kg), a najmniej w LED 2 (0,75 mg/kg; spadek o 34,3%). Pozostałe warianty LED również powodowały spadki – największy w LED 1 (-17,2%). Cynk jest kofaktorem enzymatycznym – jego redukcja może niekorzystnie wpływać na odporność i metabolizm roślin.

Sucha masa (sm)

Najwyższa zawartość suchej masy była również w LED 4 (3,93 g; +20,6% względem kontroli), a najniższa w LED 2 (3,34 g; +2,4%). LED 1 i 3 wykazały wzrosty odpowiednio o 18,3% i 20,2%. Świadczy to o korzystnym wpływie światła LED, szczególnie BW, na zagęszczenie biomasy i wartość handlową liści.



Rysunek 24. Wartości ilorazów zawartości mikro i makro pierwiastków w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1) dla roślin sałaty



Rysunek 25. Wartości ilorazów zawartości mikro i makro pierwiastków w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1) dla roślin sałaty

Azotany (NO_3^-)

Zawartość azotanów była najwyższa dla LED 2 (4071 mg/kg; +1,5%) i LED 4 (3804 mg/kg; - 5,2%). Największy spadek miał miejsce w LED 3 (3751 mg/kg; -6,5%). Zmiany te są stosunkowo niewielkie, ale wskazują na pewną stabilność akumulacji NO_3^- , niezależnie od źródła światła. Należy jednak zauważyć, że wartości przekraczają dopuszczalne limity dla sałaty w niektórych rynkach, co może mieć znaczenie dla bezpieczeństwa konsumenta.

Azotyny (NO_2^-)

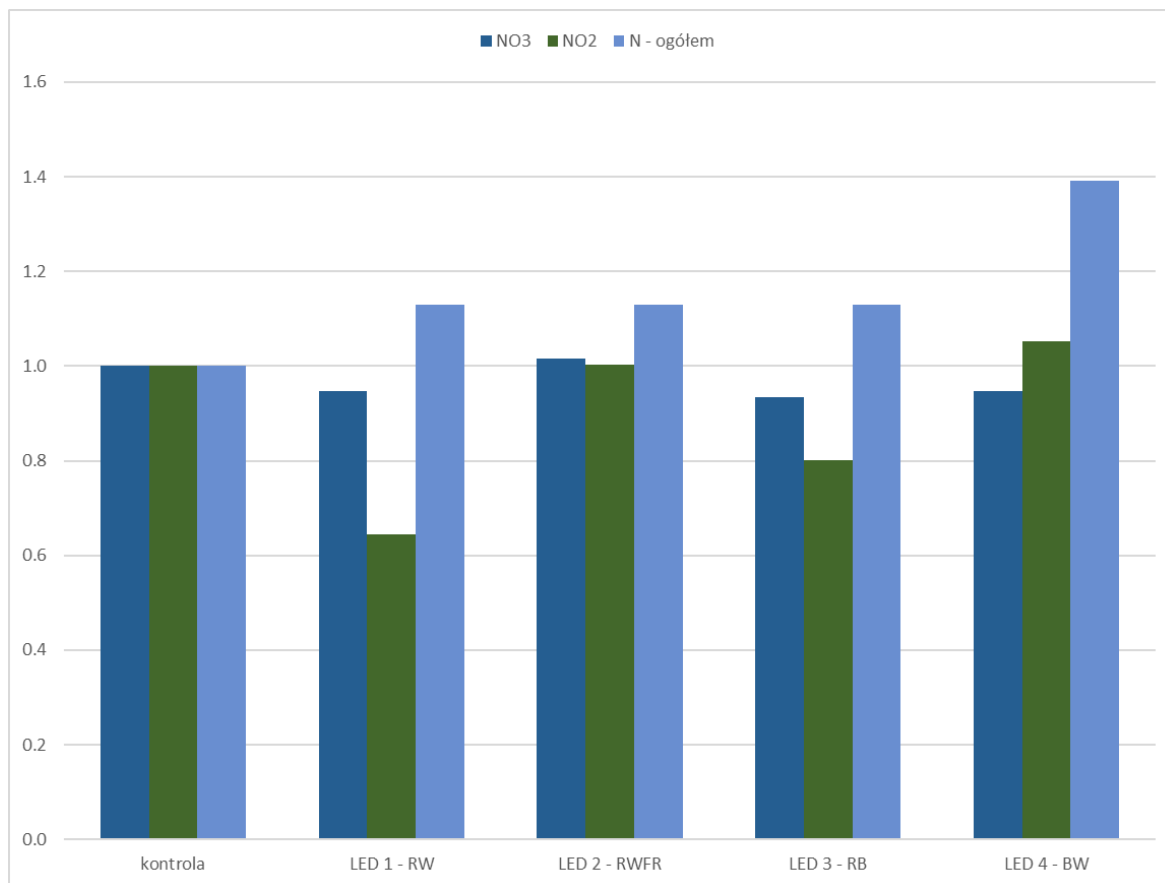
Najniższe stężenie azotynów stwierdzono w LED 1 (7,95 mg/kg), co stanowi spadek aż o 35,6%. Największy wzrost wystąpił w LED 4 (+5,3%). LED 2 i 3 wykazywały wartości zbliżone do kontroli. Ze względu na toksyczność azotynów, ich redukcja w LED 1 należy uznać za pozytywną cechę technologii.

Azot ogólny (NKj)

Najwyższa zawartość azotu ogółem została stwierdzona w LED 4 (0,16%; wzrost o 39,1%). Wszystkie warianty LED zwiększały ten parametr, co sugeruje poprawę przyswajania azotu



mineralnego. Może to świadczyć o wyższej aktywności metabolicznej i potencjale wzrostowym, zwłaszcza w LED 4.



Rysunek 26. Wartości ilorazów zawartości azotanów, azotynów i azotu ogólnego w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1) dla roślin sałaty

Podsumowując, wariant LED 4 - BW (światło biało-niebieskie) najbardziej wyróżniał się korzystnym wpływem na zawartość składników mineralnych, suchą masę oraz azot ogólny. Uzyskano tu wyraźny wzrost zawartości Fe, Mg, Ca, B i N, przy jednoczesnym utrzymaniu lub obniżeniu poziomu niepożądanych azotynów. Warianty LED 1 i 2 obniżały zawartość wielu mikroelementów (Cu, Zn, Mn), co może wpływać negatywnie na wartość odżywczą. LED 3 - RB zwiększał zawartość Fe, ale powodował spadek Mn i Zn. Podsumowując, LED 4 - BW wydaje się najkorzystniejszym wariantem dla jakości i wartości odżywczej sałaty, podnosząc zarówno parametry fizykochemiczne, jak i bezpieczeństwo żywności.

Skład związków chemicznych w roślinach sałaty:

Poniżej przedstawiono porównanie zawartości wybranych związków chemicznych w sałacie uprawianej pod różnymi wariantami oświetlenia LED względem kontroli, z uwzględnieniem wartości minimalnych i maksymalnych oraz interpretacją biologiczną.



Kwas askorbinowy (witamina C)

Zawartość kwasu askorbinowego była najwyższa w wariancie LED 1 – RW i wynosiła 3,05 mg, co stanowiło wzrost o 77,3% względem kontroli (1,72 mg). Najniższy poziom odnotowano w LED 3 – RB (2,51 mg), jednak nawet ten poziom był o 45,9% wyższy niż kontrola. Wszystkie warianty LED pozytywnie wpływały na akumulację witaminy C, co może świadczyć o lepszym statusie antyoksydacyjnym roślin przy świetle LED. Największy efekt zaobserwowano przy świetle czerwono-niebieskim (RW), co sugeruje, że takie spektrum może stymulować syntezę tej witaminy.

Polifenole ogółem

Najwyższą zawartość polifenoli odnotowano w LED 4 – BW (23,4 mg), co oznacza wzrost o 13,6% względem kontroli. Wariant LED 3 – RB również wykazał wzrost o 12,1%. Tylko w LED 2 – RWFR wartość była minimalnie niższa niż w kontroli (spadek o 0,5%). Oświetlenie zawierające światło niebieskie (BW, RB) najwyraźniej sprzyjało biosyntezie związków fenolowych, które pełnią funkcje ochronne i antyoksydacyjne.

Chlorofil a

Najniższa zawartość chlorofilu a została stwierdzona w LED 2 – RWFR (10,2 mg), co oznacza spadek o 26,4% w porównaniu z kontrolą. Z kolei najwyższy poziom chlorofilu a osiągnięto w LED 4 – BW (16,2 mg), co stanowi wzrost o 17%. Warianty zawierające światło niebieskie wykazują najwyraźniej korzystny wpływ na zawartość tego pigmentu fotosyntetycznego, natomiast dodatek podczerwieni (FR) miał efekt hamujący.

Chlorofil b

Największy wzrost zawartości chlorofilu b zaobserwowano w LED 4 – BW (6,42 mg), co stanowi 21% więcej niż w kontroli. Z kolei najniższa zawartość (2,94 mg) wystąpiła w LED 3 – RB, co oznacza spadek o 44,6%. Różnice są tu szczególnie wyraźne, co może sugerować selektywny wpływ długości fal światła na proporcje chlorofilu. Tylko pełne spektrum BW zwiększało zawartość obu typów chlorofilu.

Karoteny ogółem

Najwyższe stężenie karotenów uzyskano w LED 3 – RB (4,58 mg), co stanowi 19,7% wzrost względem kontroli. Najniższą wartość uzyskano w LED 2 – RWFR (2,79 mg), czyli o 27,1% mniej niż w kontroli. Światło niebiesko-czerwone najwyraźniej indukowało syntezę tych pigmentów, podobnie jak BW, natomiast dodatek FR działał hamująco.

Sacharoza



Zawartość sacharozy w LED 1 – RW była zdecydowanie najwyższa (45,5 mg), co oznacza aż 639,8% wzrost względem kontroli. Najniższy poziom uzyskano przy LED 2 – RWFR (1,47 mg), co oznacza spadek o 76,1%. Tak duże różnice wskazują, że obecność światła czerwonego silnie sprzyja magazynowaniu sacharozy, natomiast dodatek podczerwieni zaburza ten proces.

Glukoza

Najwięcej glukozy zgromadziła sałata pod LED 1 – RW (564 mg), co oznacza 161,1% więcej niż w kontroli. Najniższa wartość wystąpiła w LED 2 – RWFR (327 mg), co nadal stanowiło wzrost o 51,4%. Warianty RW i BW zwiększały poziom glukozy w znacznie większym stopniu niż kontrola, sugerując poprawę efektywności fotosyntezy i transportu cukrów prostych.

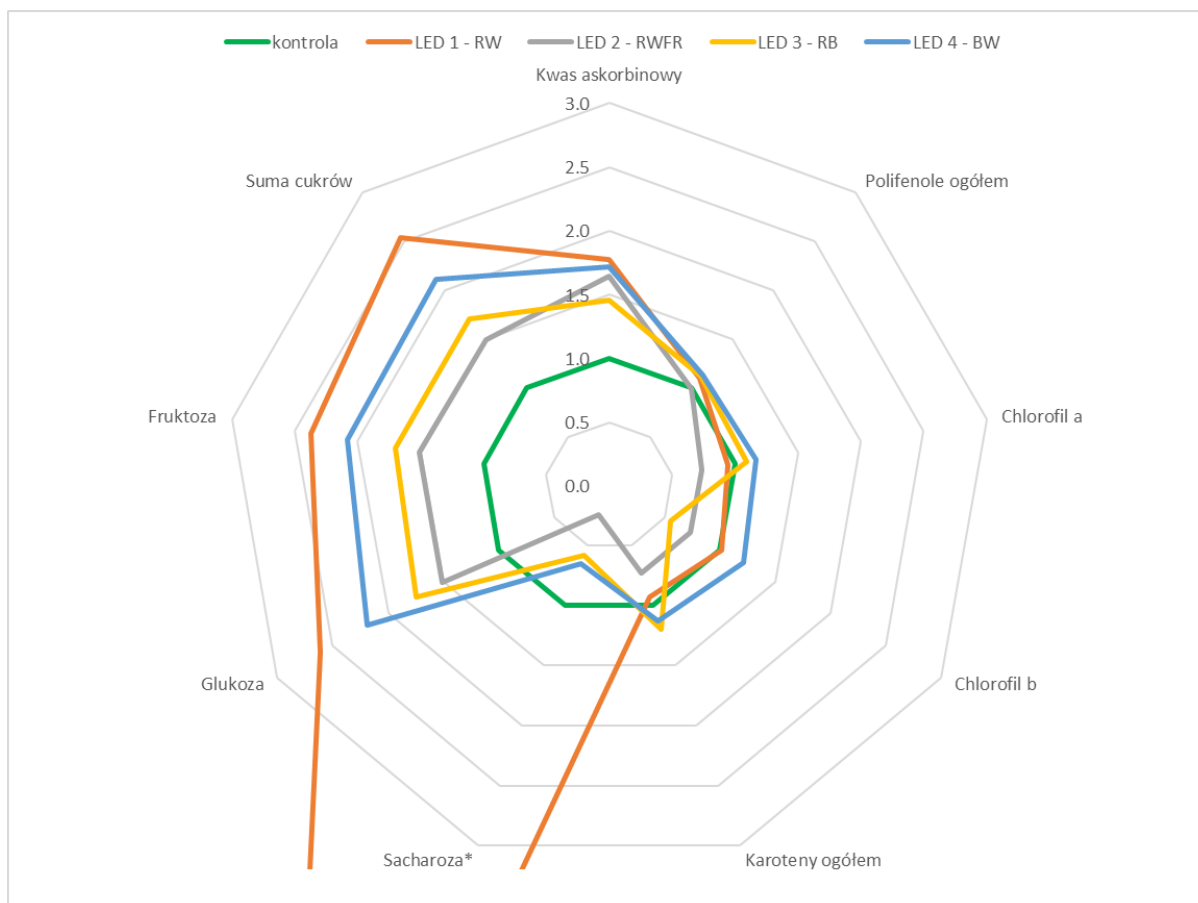
Fruktoza

Największe stężenie fruktozy również wystąpiło w LED 1 – RW (622 mg), co oznacza wzrost o 137,4%. Najniższą zawartość zaobserwowano przy RWFR (396 mg), mimo że to nadal 51,1% więcej niż kontrola. Zachowanie podobne jak w przypadku glukozy potwierdza korzystny wpływ spektrum RW na metabolizm cukrów.

Suma cukrów

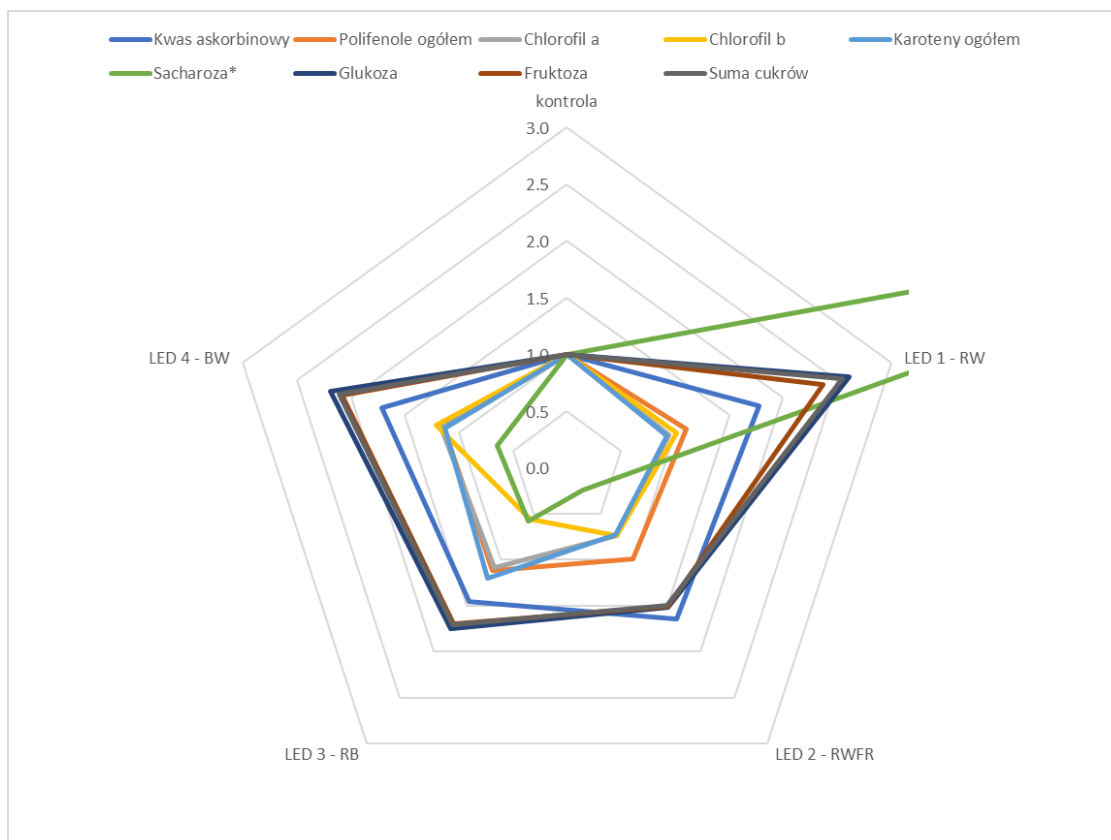
Łączna zawartość cukrów była najwyższa w LED 1 – RW (1232 mg), co stanowi wzrost o 154,5% względem kontroli. Najniższa suma cukrów wystąpiła w LED 2 – RWFR (725 mg), co i tak przekraczało poziom kontrolny o 49,8%. Światło czerwono-niebieskie (RW) najbardziej sprzyjało akumulacji węglowodanów, co może świadczyć o zwiększonej aktywności fotosyntetycznej i metabolizmie asymilatów.

Podsumowując oświetlenie LED wywierało wyraźny wpływ na zawartość związków chemicznych w sałacie, przy czym najkorzystniejsze efekty odnotowano w wariacie LED 1 – RW (czerwono-niebieskie światło), szczególnie dla cukrów i witaminy C. Z kolei LED 4 – BW (pełne spektrum z niebieskim) był najbardziej efektywny w zwiększaniu zawartości chlorofilu i polifenoli. Dodatek dalekiej czerwieni (LED 2 – RWFR) miał raczej negatywny lub neutralny wpływ na większość parametrów. Wyniki te mogą wskazywać, że właściwy dobór spektrum światła w uprawach kontrolowanych pozwala celowo zwiększać wartość odżywczą warzyw liściowych.



Rysunek 27. Wartości ilorazów zawartości substancji chemicznych w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1) dla roślin sałaty

* wartości sacharozy dla grupy LED 1 – RW wynosi 7,398. Dla zwiększenia czytelności pozostałych cech zdecydowano na przeskalowanie osi do wartości 3.



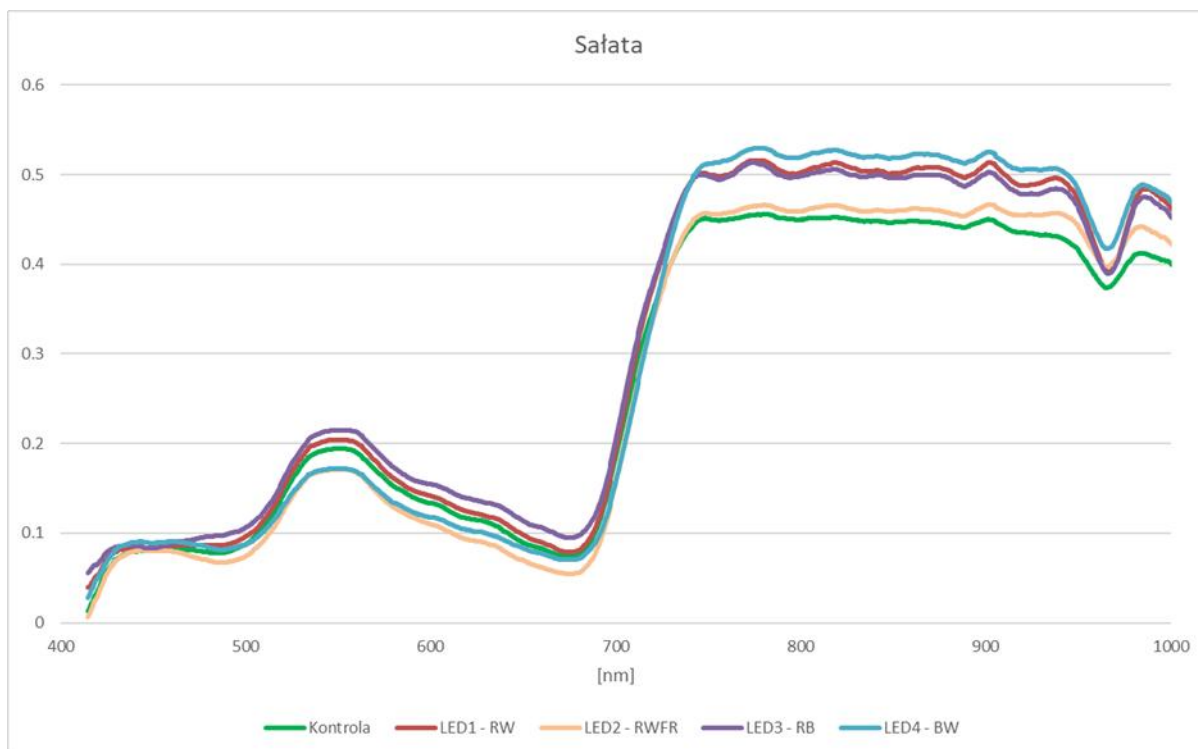
Rysunek 28. Wartości ilorazów zawartości substancji chemicznych w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola = 1) dla roślin sałaty

* wartości sacharozy dla grupy LED 1 – RW wynosi 7,398. Dla zwiększenia czytelności pozostałych cech zdecydowano na przeskalowanie osi do wartości 3.

5.1.4. Analiza obrazów spektralnych sałaty

Na podstawie analizy porównawczej uśrednionych danych spektralnych stwierdzono wyraźne różnice pomiędzy poszczególnymi powtórzeniami eksperymentu. W niektórych seriach badawczych różnice pomiędzy poletkami doświadczalnymi były minimalne i trudne do uchwycenia, podczas gdy w innych miały one wyraźnie większe znaczenie. Poniżej przedstawiono eksperyment, który został kompletnie przebadany od analiz chemicznych po badania konsumenckie.

Analiza uśrednionych widm odbiciowych wykazała, że liście roślin oświetlonych światłem typu LED3 RB wykazują najwyższy poziom refleksyjności w zakresie 550–650 nm, co może wskazywać na niższy poziom absorpcji światła przez chlorofil i nadanie liściom jaśniejszej. Z kolei liście eksponowane na światło LED2 RWFR charakteryzowały się najniższą refleksyjnością w zakresie widzialnym, co sugeruje intensywną absorpcję światła przez chlorofil. W zakresie spektrum powyżej 700 nm, które ogólnie mówi o kondycji roślin, wyraźnie od kontroli wyższe są LED4 – BW, LED1 – RW i LED3 – RB.



Rysunek 29. Analiza uśrednionych obrazów spektralnych z podziałem na grupy badawcze

Na podstawie uśrednionych spektrów dla każdej grupy, możemy stwierdzić że różnice w spektrach w zakresie widzialnym są znacznie bardziej zauważalne, świadczy to o różnicach w rozwoju roślin. Tabela indeksów mówiących o ogólnej kondycji i stresie rośliny, pozwala zauważyć wpływ różnicujący pomiędzy typem oświetlenia.

Jak widać dla różnych typów naświetlania spektra zachowywały się zupełnie różnie dla zakresu widzialnego i dla zakresu bliskiej podczerwieni. Zmiany te mogą być związane z zmianą zawartości chlorofilu w liściach, zmianą struktury komórkowej liści, czy zmianą zawartości wody w liściu².

Dla roślin sałaty, na podstawie analizy widm odbiciowych, wyznaczono wskaźniki wegetacyjne (Rysunek 30) odzwierciedlające stan fizjologiczny roślin. Największe odchylenia wartości wskaźników względem kontroli zaobserwowano w grupie doświetlanej LED2 – RWFR i LED4 – BW. Może to świadczyć o wystąpieniu czynników istotnie dodatnio wpływających na kondycję roślin.

² <https://metergroup.com/education-guides/ndvi-and-pri-the-researchers-complete-guide/>



Point number	NDVI	PRI	WSI	Red-Edge	CIgreen	MCARI
5 Kontrola	0.70	0.02	0.83	0.32	1.34	0.12
LED 1 RW	0.73	0.02	0.76	0.36	1.49	0.12
LED 2 RWRF	0.78	0.03	0.85	0.39	1.73	0.11
LED 3 RB	0.67	0.01	0.77	0.33	1.35	0.11
LED 4 BW	0.76	0.03	0.79	0.44	2.04	0.09

Rysunek 30. Wskaźniki wegetatywne dla roślin sałaty z podziałem na grupy badawcze

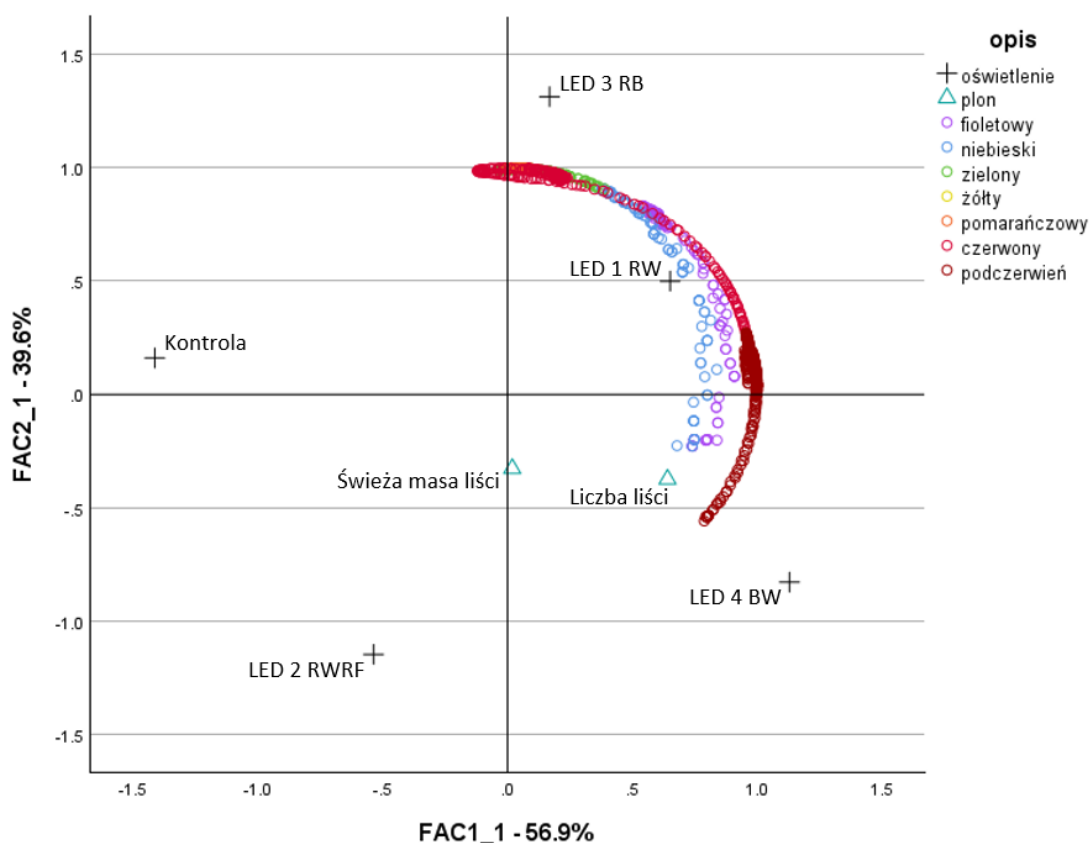
5.1.5. Wpływ widma światła LED na cechy plonotwórcze sałaty – interpretacja wyników PCA na podstawie pomiarów spektralnych liści

Światło odgrywa kluczową rolę w regulacji procesów wzrostu i rozwoju roślin. W uprawach kontrolowanych, takich jak produkcja sałaty w warunkach szklarniowych lub wertykalnych, wykorzystanie diod elektroluminescencyjnych (LED) pozwala na precyzyjne sterowanie widmem światła w celu maksymalizacji wydajności i jakości plonu. Zróżnicowane długości fal światła wpływają na rośliny poprzez aktywację specyficznych fotoreceptorów i modulację procesów fizjologicznych, takich jak fotosynteza, elongacja komórek czy różnicowanie organów.

W niniejszej analizie zbadano wpływ czterech kombinacji oświetlenia LED na cechy plonotwórcze sałaty, tj. świeżą masę liści i liczbę liści, z wykorzystaniem analizy składowych głównych (PCA). Do analizy włączono również pomiary spektralne w zakresie 400–1100 nm (1400 zmiennych o wartościach od 400nm co 0,5 jednostki do 1100 nm), przeprowadzone na poziomie liści. PCA umożliwiła wizualizację i interpretację złożonych zależności między parametrami spektralnymi, a odpowiedzią fizjologiczną roślin. Analizy wskazały, iż pierwsze dwie składowe główne wyjaśniają łącznie 96,5% zmienności danych, przy czym PC1 (FAC1) odpowiada za 56,9%, a PC2 (FAC2) za 39,6%. Tak wysoki poziom wyjaśnionej wariancji świadczy o dużej wartości interpretacyjnej analizy i pozwala na wiarygodne odwzorowanie relacji w układzie dwuwymiarowym. Rozmieszczenie cech plonotwórczych wskazuje na ich odmienną zależność względem widma i kombinacji świetlnych. Świeża masa liści (0,019; -0,327) zlokalizowana jest blisko osi PC1, natomiast liczba liści (0,64; -0,374) wykazuje silną korelację dodatnią z PC1 i nieznaczną ujemną z PC2. Wskazuje to, że parametry te są bardziej powiązane z czynnikami spektralnymi opisanymi przez PC1, przy czym liczba liści silniej



reaguje na zmienność związaną z tą składową. Najsilniejszy wpływ na liczbę liści wykazuje wariant LED1-RW (0,65; 0,5), który znajduje się w bezpośrednim sąsiedztwie tej cechy. W pobliżu znajduje się także LED3-RB (0,168; 1,313), który jednak przesunięty jest bardziej w kierunku dodatnich wartości PC2, co może świadczyć o jego złożonym oddziaływaniu. Świeża masa liści znajduje się najbliżej LED2-RWFR (-0,536; -1,146), co sugeruje, że to właśnie ta kombinacja sprzyjała zwiększeniu masy liściowej. LED4-BW (1,128; -0,828), pomimo znacznego przesunięcia w kierunku dodatnich wartości PC1, znajduje się w oddaleniu od obu cech plonotwórczych, a kontrola (-1,411; 0,161) została wyraźnie odsunięta od wszystkich kombinacji LED, co potwierdza jej relatywnie słabszy wpływ na rozwój sałaty. Analiza zmiennych spektralnych ukazuje silną korelację pomiędzy światłem pomarańczowym (średnio 0,064; 0,997), żółtym (średnio 0,012; 0,998) i zielonym (średnio 0,073; 0,982) z PC2, co oznacza, że długości fal w tym zakresie w większym stopniu różnicują układ wzdłuż drugiej składowej. Z kolei fioletowy (średnio 0,698; 0,505), niebieski (średnio 0,592; 0,575) i czerwony (średnio 0,262; 0,88) silnie korelują z obydwoma składowymi. Największy udział w PC1 przypisany został pasmu podczerwieni (średnio 0,976; 0,103), co wskazuje na jej istotny wpływ na kierunek zmienności odpowiadający liczbie liści.



Rysunek 31. Relacje grup doświadczalnych oraz cech plonotwórczych na podstawie pomiarów widma spektralnego na liściach sałaty



Wyniki analizy PCA wskazują na istotne różnice w odpowiedzi fizjologicznej sałaty na zastosowane kombinacje widma światła. Najsilniejsze skojarzenie pomiędzy liczbą liści a konfiguracją RW (LED1) sugeruje korzystny wpływ światła czerwonego w połączeniu z białym na stymulację merystemów wierzchołkowych, co przekłada się na wyższe tempo formowania liści. Obecność światła białego, zawierającego wszystkie długości fal, mogła dodatkowo wspierać równowagę hormonalną oraz sprzyjać ogólnej stabilizacji rozwoju. Konfiguracja RB (LED3), bogata w światło niebieskie, również przyczyniła się do zwiększenia liczby liści, co jest zgodne z rolą światła niebieskiego w aktywacji kryptochromów i fototropin, wpływających na podziały komórkowe i architekturę rośliny. Jednak wyraźne przesunięcie tego wariantu w stronę dodatnich wartości PC2 może wskazywać na złożony wpływ, w tym potencjalny efekt morfologiczny niezwiązany bezpośrednio z biomasyfikacją. Z kolei największy wpływ na świeżą masę liści zaobserwowano dla konfiguracji RWFR (LED2), zawierającej światło czerwone, białe oraz daleką czerwień. Obecność światła dalekiej czerwieni może aktywować fitochromy w stanie PFR, stymulując elongację komórek i zwiększenie objętości tkanki liściowej. Taki efekt jest korzystny w kontekście produkcji masy liści, choć niekoniecznie przekłada się na zwiększenie liczby liści. Konfiguracja BW (LED4), zawierająca białe i niebieskie światło, pomimo obecności fotomorfogenicznie aktywnych długości fal, wykazała najslabszy wpływ na rozwój cech plonotwórczych. Może to wynikać z braku synergii między pasmem czerwonym a niebieskim, które w konfiguracjach RB i RW wykazały istotny wpływ na rozwój. Światło niebieskie w nadmiarze, bez odpowiedniego uzupełnienia, może także powodować reakcje stresowe, ograniczając przyrost masy. Pozycja kontroli, znacznie oddalona od wszystkich cech plonotwórczych i wariantów LED, potwierdza, że brak doświetlania w warunkach ograniczonego światła naturalnego ogranicza potencjał produkcyjny sałaty. Brak zróżnicowanego spektrum skutkował ograniczonym przyrostem masy i mniejszą liczbą wykształconych liści.

Podsumowując, analiza PCA pomiarów spektralnych liści oraz cech plonotwórczych sałaty wskazuje na silny wpływ spektrum światła na rozwój roślin. Konfiguracja RW (LED1) okazała się najefektywniejsza w zwiększaniu liczby liści, co sugeruje korzystne działanie światła czerwonego wspieranego przez komponent biały. Z kolei konfiguracja RWFR (LED2) skutecznie zwiększała świeżą masę liści, co można przypisać synergii światła czerwonego i dalekiej czerwieni. Doświetlanie światłem niebieskim (RB, BW) miało ograniczony wpływ na cechy plonotwórcze, przy czym RB wykazywało wyższy potencjał niż BW, co potwierdza znaczenie obecności światła czerwonego dla prawidłowego rozwoju liści. Brak doświetlania (kontrola) skutkował najniższą efektywnością wzrostu. Wyniki te potwierdzają, że efektywne zarządzanie spektrum światła LED może znacząco wpływać na morfologię i produktywność



sałaty. W zależności od celu produkcyjnego – zwiększenia masy handlowej lub liczby liści – możliwe jest optymalizowanie konfiguracji świetlnej w nowoczesnych systemach uprawowych.

5.2. Ocena wpływu rodzaju oświetlenia LED na wzrost i kondycję rukoli

5.2.1. Ocena cech plonotwórczych i jakości

Doświadczenie przeprowadzono w warunkach kontrolowanych, w hali uprawowej z wykorzystaniem systemu akwaponicznego, w którym rukola (*Eruca sativa*) była uprawiana wyłącznie pod oświetleniem sztucznym. Celem badań była ocena wpływu różnych typów oświetlenia LED na wybrane cechy morfologiczne i jakościowe roślin, w porównaniu do warunków kontrolnych, gdzie zastosowano tradycyjne świetlówki o barwie zimnej (6500 K).

W doświadczeniu zastosowano cztery warianty oświetlenia LED:

- LED 1 – RW (światło czerwono-białe),
- LED 2 – RWFR (światło czerwono-białe z udziałem dalekiej czerwieni),
- LED 3 – RB (światło czerwono-niebieskie),
- LED 4 – BW (światło niebiesko-białe).

Analizie poddano następujące cechy roślin: ogólna kondycja, zieloność liści, występowanie chlorozy i nekrozy, wyrównanie roślin, sztywność/wiotkość roślin, świeża masa liści oraz liczba liści. Oceny jakościowe przeprowadzono w skali od 0 do 5, gdzie 0 oznacza brak danej cechy, a 5 – najwyższy poziom jej wystąpienia. Cecha „nekroza” we wszystkich wariantach nie została zaobserwowana, dlatego uzyskała wartość 0 we wszystkich powtórzeniach. Z uwagi na brak zmienności, nie była ona brana pod uwagę w analizie porównawczej. Świeża masa liści wyrażona została w gramach, a liczba liści jako wartość średnia z 10 powtórzeń.

Wyniki i analiza porównawcza

Wyniki oceny cech morfologicznych wykazały wyraźny wpływ rodzaju oświetlenia LED na większość analizowanych parametrów (Rysunek 32, Rysunek 33). W odniesieniu do kontroli (Rysunek 34), wszystkie warianty LED skutkowały poprawą ogólnej kondycji i zieloności liści, przy jednoczesnym ograniczeniu objawów chlorozy.

Najwyższą ogólną kondycję roślin (4,7) odnotowano w wariantcie LED 4 – BW, natomiast najmniejsze nasilenie chlorozy (0,2) również w tym wariantcie, co sugeruje korzystny wpływ światła niebiesko-białego na zdrowotność i pigmentację liści. Wskaźniki porównawcze względem kontroli wykazały wzrost wartości tej cechy aż o 31%.

W odniesieniu do masy świeżej liści, największy przyrost biomasy uzyskano w wariantcie LED 3 – RB – średnio 14,906 g na roślinę (Rysunek 35), co stanowiło ponad 208% (Rysunek 36) wartości kontrolnej. Wysoką masę liści odnotowano również dla LED 2 – RWFR (12,642 g,



czyli 176% w stosunku do kontroli). Świadczy to o dużym potencjale światła czerwono-niebieskiego oraz światła z udziałem dalekiej czerwieni do stymulacji wzrostu biomasy liściowej rukoli.

W zakresie cech strukturalnych i wyrównania roślin, największą sztywność oraz najwyższy stopień wyrównania wykazały rośliny oświetlane światłem LED 4 – BW, co może sugerować korzystny wpływ niebieskiego spektrum na cechy architektoniczne roślin.

Średnia liczba liści również była wyższa w każdej kombinacji LED niż w kontroli, z najwyższą wartością w wariancie LED 2 – RWFR (7,7), co stanowiło wzrost o 28%.

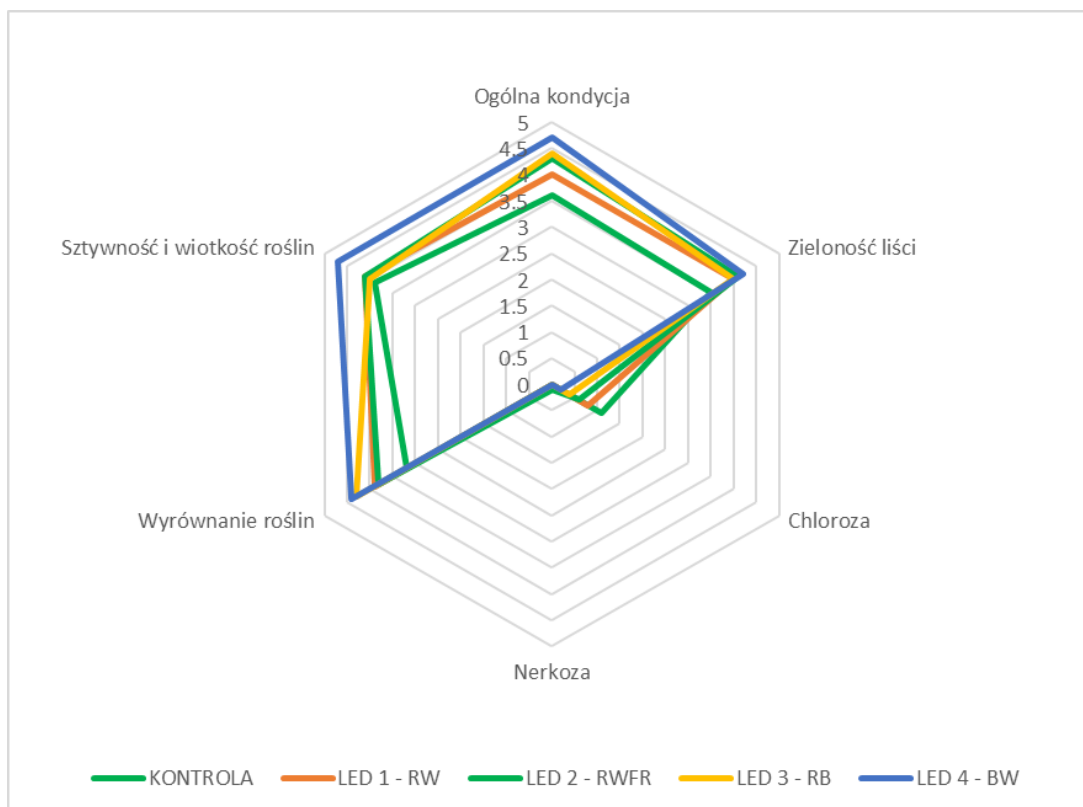
Podsumowując: Zastosowanie oświetlenia LED istotnie poprawiło większość cech jakościowych i ilościowych rukoli uprawianej w warunkach akwaponicznych, w porównaniu do tradycyjnego oświetlenia świetlówkowego.

Największy przyrost świeżej masy liści oraz korzystny wpływ na ograniczenie chlorozy i poprawę kondycji roślin zaobserwowano przy zastosowaniu światła LED 3 – RB, co wskazuje na wysoką efektywność czerwono-niebieskiego spektrum w intensyfikacji produkcji liściowej.

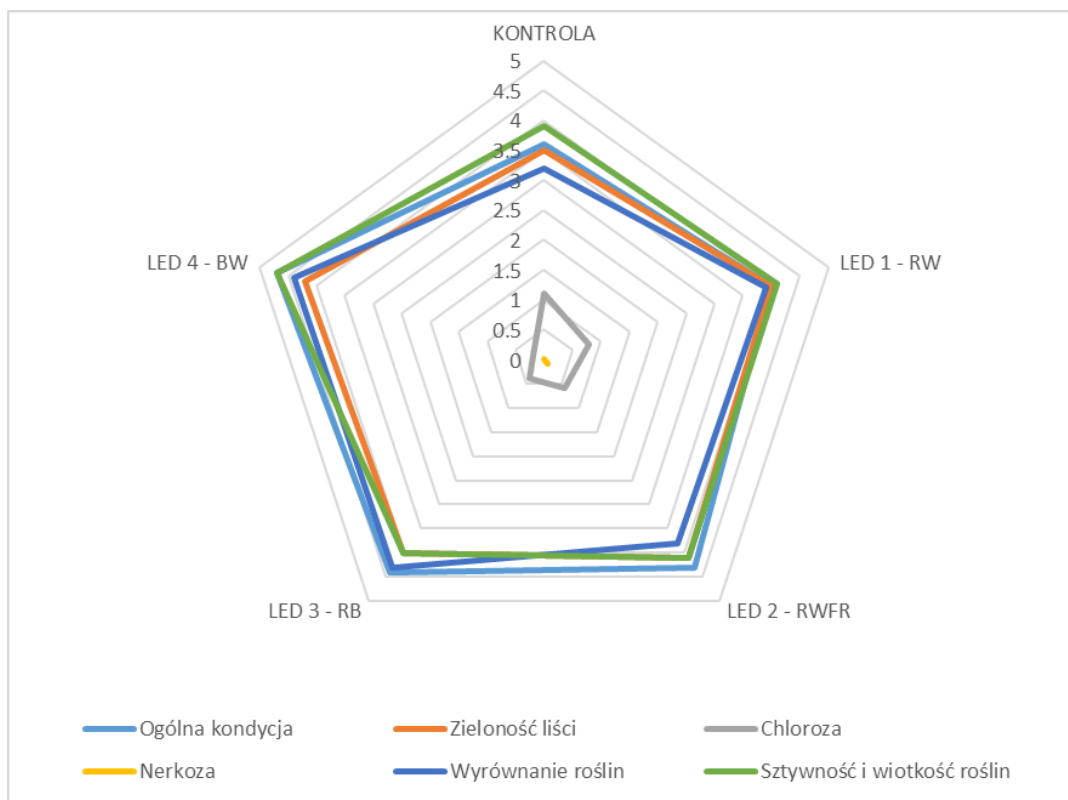
Najlepsze wyrównanie i sztywność roślin oraz najwyższą ogólną ocenę uzyskano w warunkach oświetlenia LED 4 – BW, co może być istotne w kontekście jakości handlowej surowca.

Udział światła dalekiej czerwieni (LED 2 – RWFR) również wykazał korzystny wpływ na wzrost i liczbę liści, co czyni go interesującą alternatywą dla klasycznych spektrów LED w uprawach wertykalnych.

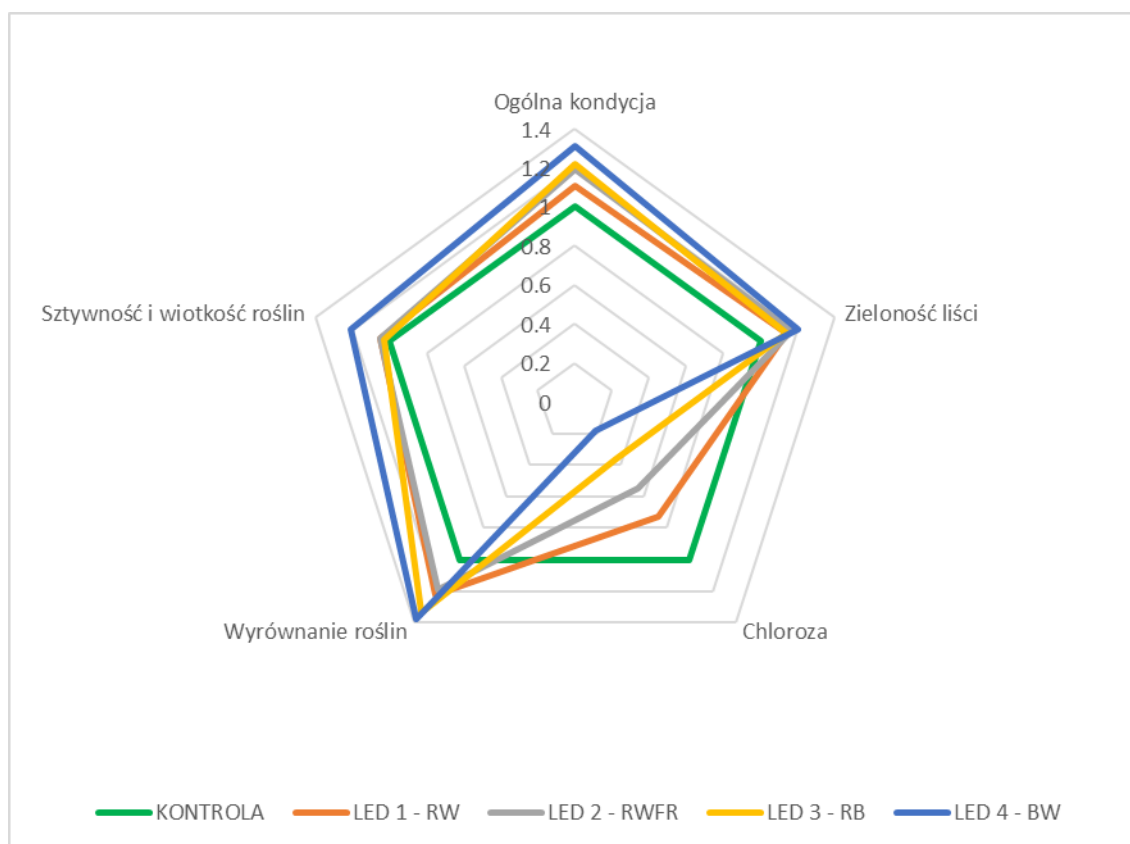
Wyniki te sugerują, że właściwie dobrane spektrum światła LED może znacząco zwiększyć efektywność produkcji roślinnej w systemach bezglebowych, oferując jednocześnie poprawę parametrów jakościowych roślin.



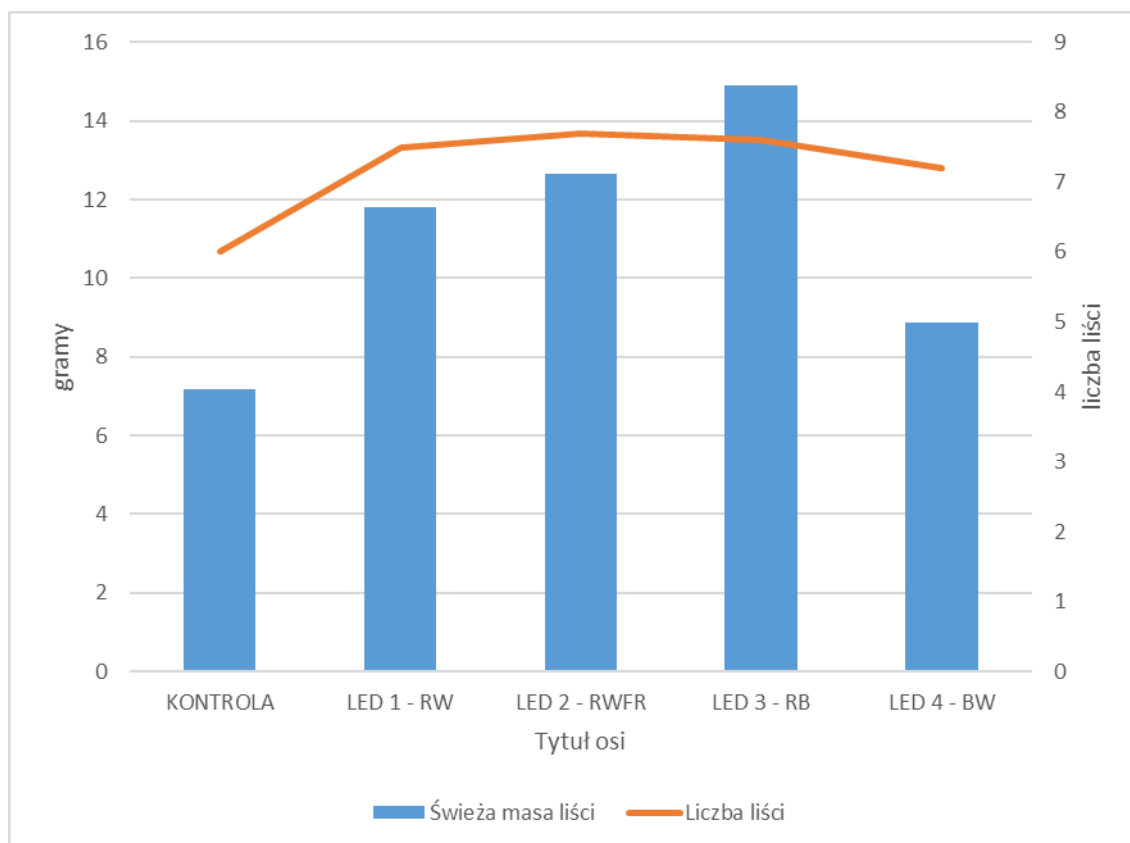
Rysunek 32. Ocena (skala od 0 do 5) jakości plonu rukoli w podziale na zastosowane oświetlenie



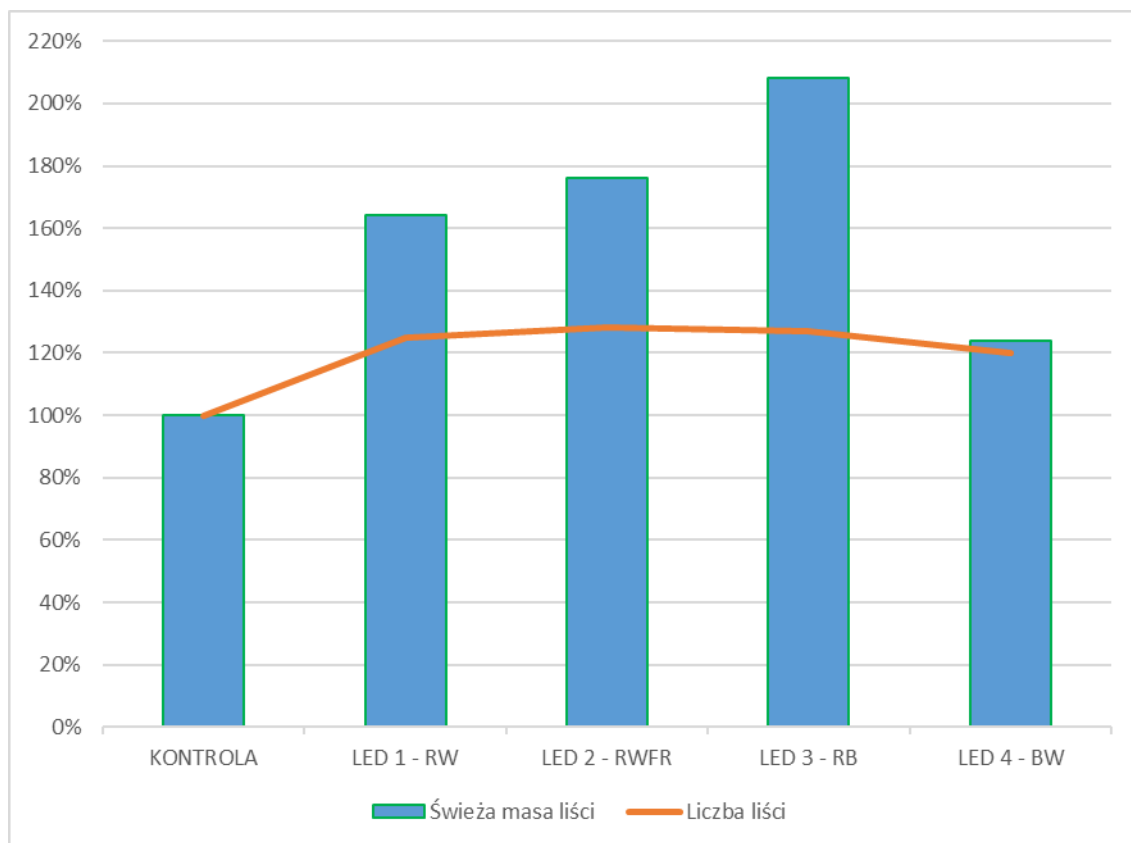
Rysunek 33. Ocena (skala od 0 do 5) jakości plonu rukoli w podziale na zastosowane oświetlenie



Rysunek 34. Wskaźniki ilorazu wartości jakości plonu rukoli doświetlanych do kontroli w podziale na zastosowane oświetlenie



Rysunek 35. Średnie wartości plonu rukoli w podziale na zastosowane oświetlenie



Rysunek 36. Wskaźniki ilorazu wartości plonu i jakości rukoli doświetlanych do kontroli

5.2.2. Ocena sensoryczna rukoli – wpływ rodzaju oświetlenia LED

W ramach kompleksowej oceny jakości rukoli uprawianej w systemach akwaponicznych, przeprowadzono badanie konsumenckie z udziałem panelu degustatorów. Celem analizy była ocena cech sensorycznych roślin w zależności od rodzaju zastosowanego oświetlenia LED, w porównaniu z kontrolą (światłówka zimna, 6500 K). Oceniano dziesięć atrybutów: kruchość i twardość liści, smak słodki, trawiasty, gorzki, „stęchły”, kwaśny oraz piekący, a także ogólną ocenę i pożądalność produktu. Skala ocen wynosiła od 0 (brak cechy) do 5 (bardzo silna obecność cechy). **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.** prezentuje uśrednione w wyniki oceny konsumenckiej przeprowadzonej dla rukoli.

Tabela 6. Średnie wyniki oceny konsumenckiej rukoli

	Kruch ość liści	Tward ość liści	smak słodki	smak trawia sty	smak gorzki	smak "stęch ły"	smak kwaśn y	smak piekąc y	Ogóln a ocena	Ogóln a pożąd alność
Kontrola	2,63	2,75	2,38	1,63	1,88	0,63	1,50	2,75	3,25	3,13
LED 1 - RW	3,38	3,25	2,50	1,25	1,38	0,25	1,25	3,13	3,75	3,88



LED 2 - RWFR	2,88	3,00	1,38	1,25	2,25	0,25	0,50	3,25	3,63	3,63
LED 3 - RB	3,00	3,25	2,00	2,13	1,88	0,13	1,25	2,88	3,25	3,13
LED 4 - BW	2,63	3,13	1,63	2,38	1,63	0,75	1,00	3,00	3,00	2,50

Wyniki i interpretacja

Tekstura liści - Największą kruchość liści odnotowano w wariancie LED 1 – RW, którego ocena (3,375) (Rysunek 37) była o 28,6% (Rysunek 38, Rysunek 39) wyższa niż w kontroli. Również LED 3 – RB (iloraz 1,143) i LED 2 – RWFR (iloraz 1,095) poprawiały tę cechę. Wariant LED 4 – BW nie wpłynął na zmianę kruchości względem kontroli. Twardość liści była wyższa we wszystkich wariantach LED, szczególnie w LED 1 – RW i LED 3 – RB (iloraz 1,182), co może sugerować zwiększoną trwałość i jędrność liści w wyniku zastosowania tych spektrów.

Cechy smakowe - Smak słodki został najlepiej oceniony w próbie kontrolnej (2,375), a jego intensywność uległa jedynie nieznacznemu zwiększeniu przy oświetleniu LED 1 – RW (iloraz 1,053). W pozostałych wariantach zaobserwowano spadek intensywności słodczy, szczególnie w przypadku LED 2 – RWFR (iloraz 0,579).

Smak trawiasty osiągnął najwyższą wartość przy oświetleniu LED 4 – BW (iloraz 1,462), co może wskazywać na potencjalne pogorszenie cech sensorycznych, szczególnie dla konsumentów preferujących łagodniejszy profil smakowy. Warianty LED 1 – RW i LED 2 – RWFR wykazały niższe wartości tej cechy w stosunku do kontroli (iloraz 0,769).

Smak gorzki, charakterystyczny dla rukoli, był najlepiej wyczuwalny przy LED 2 – RWFR (iloraz 1,2), natomiast został zredukowany przy LED 1 – RW (0,733) i LED 4 – BW (0,867), co może być korzystne z punktu widzenia akceptacji konsumentek.

Smak „stęchły”, jako cecha negatywna, uzyskał najniższe oceny w wariantach LED 3 – RB (0,125) i LED 1 – RW (0,25), co wskazuje na poprawę jakości sensorycznej względem kontroli (0,625). Wyjątkiem był LED 4 – BW, gdzie smak ten był wyraźniejszy (ocena 0,75, iloraz 1,2), co może ograniczać atrakcyjność produktu.

Smaki drażniące i końcowe oceny - Warianty LED 1 – RW, LED 2 – RWFR i LED 4 – BW podwyższały ocenę smaku piekącego (ilorazy odpowiednio: 1,136; 1,182; 1,091), co może być pozytywnie odbierane przez konsumentów preferujących intensywniejsze doznania smakowe. Jedynie LED 3 – RB nie różnił się istotnie od kontroli.

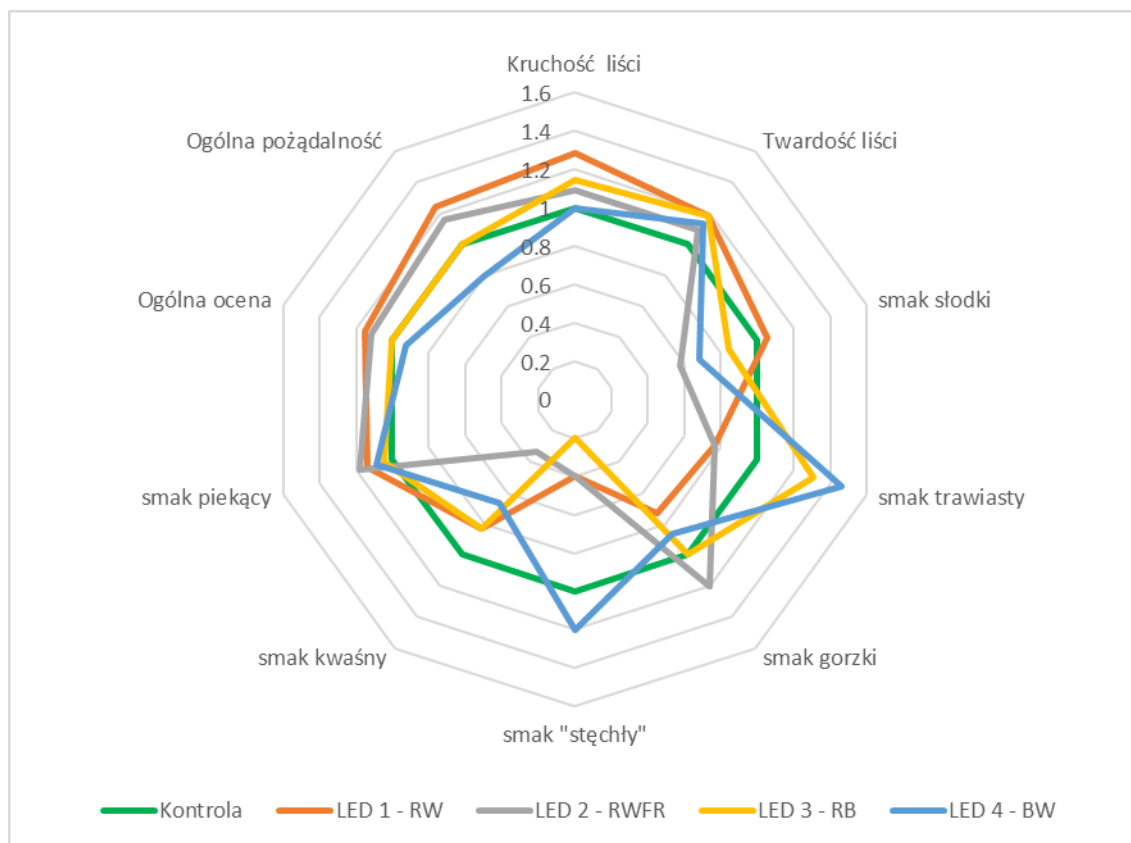
Ogólna ocena oraz ogólna pożądalność produktu były najwyższe w wariancie LED 1 – RW, osiągając odpowiednio 3,75 i 3,875 punktu (ilorazy 1,154 i 1,24). Potwierdza to pozytywny



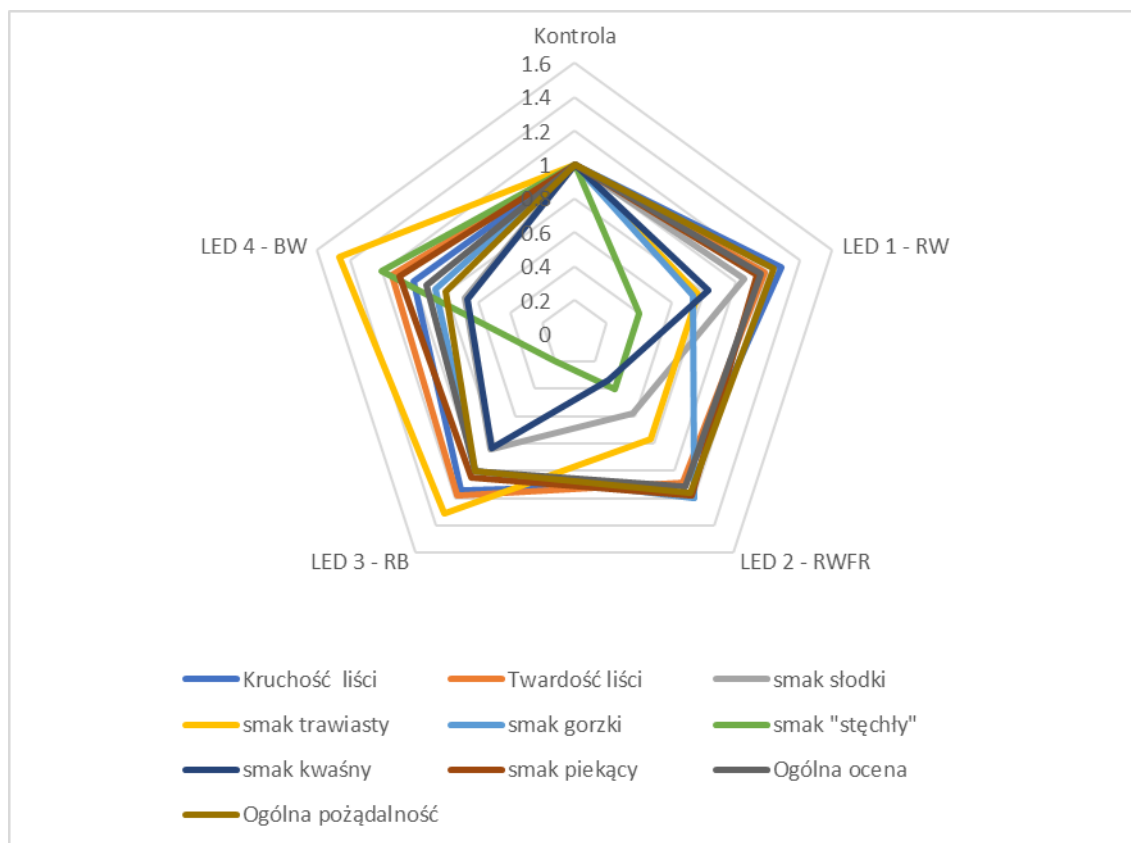
wpływ tego rodzaju oświetlenia na akceptację konsumencką. Dobre wyniki uzyskały również LED 2 – RWFR (ilorazy 1,115 i 1,16) oraz LED 3 – RB (iloraz 1,0 w obu przypadkach). Najniższe noty końcowe uzyskał LED 4 – BW, co może być konsekwencją zwiększenia intensywności smaku trawiastego i „stęchłego”.



Rysunek 37. Średnie wartości oceny konsumenckiej cech sensorycznych rukoli w skali od 0 do 5.



Rysunek 38. Ilorazy wartości oceny konsumennej cech sensorycznych rukoli z podziałem na rodzaj oświetlenia.



Rysunek 39. Ilorazy wartości oceny konsumennej cech sensorycznych rukoli.



Podsumowując, analiza wyników sensorycznych wskazuje, że oświetlenie LED 1 – RW (czerwono-białe) miało najkorzystniejszy wpływ na ogólną jakość konsumencką rukoli, poprawiając teksturę liści i ograniczając występowanie niepożądanych cech smakowych. Wariant LED 2 – RWFR również wypadł korzystnie, szczególnie w zakresie tekstury i smaku piekącego, choć wiązał się z wyraźnym obniżeniem słodczy. Z kolei LED 4 – BW pomimo dobrej twardości, obniżył ogólną ocenę produktu przez pogorszenie profilu smakowego. Wyniki te mogą stanowić istotną wskazówkę dla dalszej optymalizacji warunków świetlnych w uprawach pod osłonami, ukierunkowanej na preferencje konsumenckie.

5.2.3. Analiza chemiczna zawartości makro i mikro elementów oraz substancji chemicznych w roślinach rukoli

Rośliny rukoli, po zbiorze oraz przeprowadzeniu oceny plonu, jego jakości i preferencji konsumenckich, zostały przekazane do akredytowanego laboratorium celem oznaczenia zawartości wybranych związków chemicznych i pierwiastków. Analizowano wpływ zastosowanych wariantów oświetlenia LED, porównując wyniki z wartościami uzyskanymi dla próby kontrolnej, w której rośliny były doświetlane światłem białym o temperaturze barwowej 6500 K.

Kwas L-askorbinowy

W przypadku zawartości kwasu L-askorbinowego najwyższy poziom odnotowano w próbce kontrolnej (77,6 mg/100g), a najniższy przy oświetleniu LED 1 - RW (62,2 mg/100g), co oznacza spadek o niemal 20%. Wszystkie badane poziomy LED powodowały obniżenie stężenia tej witaminy w porównaniu do kontroli, przy czym najmniejszy spadek zaobserwowano dla LED 3 - RB (jedynie o 6,7%). Wyniki te sugerują, że oświetlenie LED może wpływać negatywnie na biosyntezę lub stabilność witaminy C, jednak niektóre spektra światła – szczególnie z udziałem światła niebieskiego i czerwonego (RB) – mogą częściowo ograniczać ten niekorzystny efekt.

Polifenole ogółem

Zawartość polifenoli ogółem była najniższa przy LED 1 - RW (66,5 mg/100g), a najwyższa przy LED 4 - BW (83,8 mg/100g), co oznacza wzrost o ponad 21% względem kontroli. Co istotne, każdy z poziomów LED, poza LED 1, zwiększał ilość tych związków, szczególnie LED 2 - RWFR (+15,4%) i LED 3 - RB (+11,5%). Wskazuje to na pozytywny wpływ światła dalekiej czerwieni (FR) oraz niebieskiego (B) na aktywację szlaków syntezy fenoli, co może przekładać się na wyższą wartość przeciwutleniającą plonu.

Chlorofil a



Najwyższy poziom chlorofilu a wystąpił przy LED 2 - RWFR (41,3 mg/100g), co oznacza wzrost o 13,2% w porównaniu do kontroli. Z kolei najniższą zawartość stwierdzono przy LED 1 - RW (31 mg/100g). Oświetlenie z dodatkiem światła dalekiej czerwieni (RWFR) wydaje się pobudzać syntezę chlorofilu a, co może mieć związek z korzystnym wpływem tego spektrum na rozwój aparatu fotosyntetycznego. Warianty LED 1 i 3 obniżyły zawartość chlorofilu a względem kontroli, co może wpływać na efektywność fotosyntezy.

Chlorofil b

Zawartość chlorofilu b była najmniejsza w warunkach LED 3 - RB (14 mg/100g), a najwyższa przy LED 4 - BW (16,7 mg/100g), co daje wzrost o 1,8% względem kontroli. Z wyjątkiem LED 2 - RWFR (bez zmian), wszystkie inne poziomy LED wykazywały niewielkie zmiany, przy czym istotny spadek wystąpił jedynie dla LED 3 - RB (-14,6%). Może to sugerować, że światło niebiesko-czerwone w tej proporcji ogranicza akumulację chlorofilu b, potencjalnie wpływając na równowagę barwników fotosyntetycznych.

Karoteny ogółem

Karoteny ogółem zwiększyły się pod wpływem każdego rodzaju oświetlenia LED względem kontroli. Największy wzrost – aż o 12,1% – zanotowano przy LED 4 - BW, natomiast najmniejszy (5,7%) przy LED 1 - RW. To jednoznacznie wskazuje, że barwy LED, zwłaszcza niebieskie, sprzyjają biosyntezie karotenoidów, które pełnią ważną funkcję ochronną w roślinie. Wysoka zawartość karotenów może również poprawiać wartość odżywczą i jakość sensoryczną plonów.

Sacharoza

W żadnym z analizowanych wariantów – zarówno w kontroli, jak i pod wpływem światła LED – nie wykryto sacharozy. Może to wskazywać na jej szybki rozkład w badanym materiale lub na fakt, że nie stanowiła istotnego składnika profilu cukrów prostych w badanym stadium rozwojowym roślin.

Glukoza

Najwyższy poziom glukozy osiągnięto przy LED 3 - RB (505 mg/100g), co oznacza wzrost aż o 96,5% w porównaniu do kontroli. LED 2 - RWFR również wykazywał wyraźny wzrost (+19,5%), natomiast LED 1 i 4 – obniżenie zawartości glukozy względem kontroli. To sugeruje, że połączenie światła czerwonego i niebieskiego szczególnie sprzyja akumulacji tego cukru, prawdopodobnie poprzez wpływ na metabolizm węglowodanów i aktywność fotosyntetyczną.

Fruktoza

Podobny wzorzec obserwujemy dla fruktozy – najwyższy poziom przy LED 3 - RB (149 mg/100g, wzrost o 117,5%), a najniższy przy LED 4 - BW (spadek o 6,6%). Światło RB



znacząco stymulowało syntezę fruktozy, a także wpływało na jej akumulację w tkankach, co może mieć istotne znaczenie dla smaku i jakości plonu. LED 2 - RWFR również zwiększył ten parametr (+56,2%).

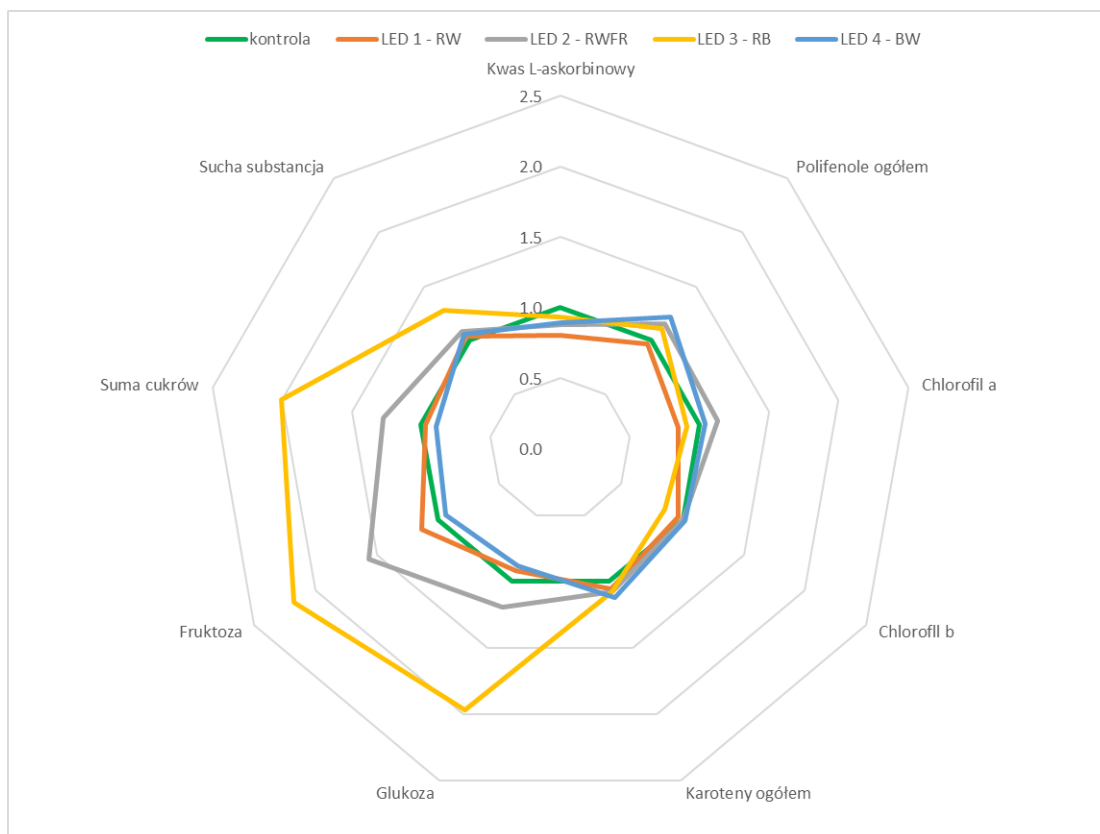
Suma cukrów

Największa różnica między kontrolą a poziomami LED występuje właśnie w sumie cukrów – LED 3 - RB podwoił tę wartość względem kontroli (+100,6%). LED 2 - RWFR także zwiększył ten parametr (+27%), natomiast LED 1 i LED 4 powodowały niewielki spadek. Wyraźnie wskazuje to, że niektóre spektra światła mogą wpływać na ogólny bilans węglowodanowy rośliny, z potencjalnym znaczeniem dla plonowania i wartości handlowej.

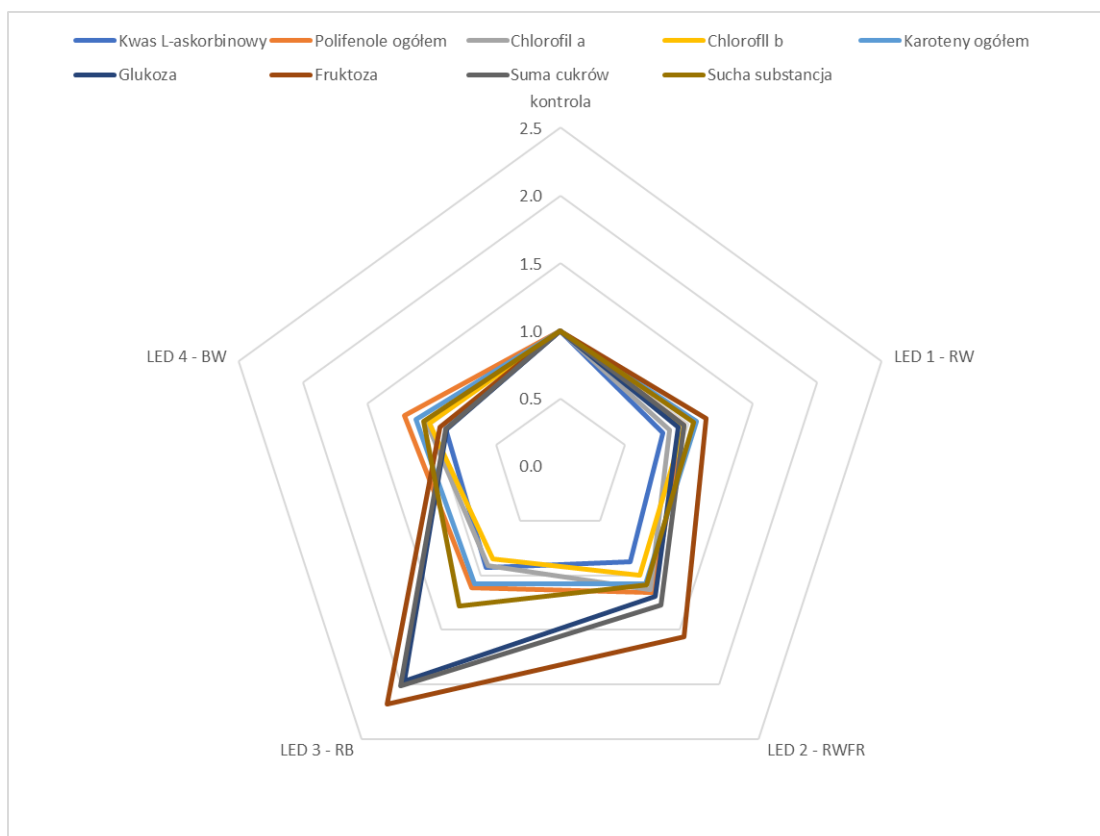
Sucha substancja

Największą zawartość suchej masy odnotowano w przypadku LED 3 - RB (10,2%), co oznacza wzrost o 27,8% względem kontroli. Wszystkie poziomy LED prowadziły do zwiększenia tego parametru, co może świadczyć o korzystnym wpływie oświetlenia na koncentrację składników odżywczych oraz mniejszą zawartość wody. Wysoka zawartość suchej substancji to pożądana cecha w wielu kierunkach produkcji (np. susz, koncentraty, ekstrakty).

Na podstawie przeprowadzonej analizy można wskazać, że największy, pozytywny wpływ na jakość biochemiczną roślin miało oświetlenie LED 3 - RB, które wyraźnie zwiększało zawartość cukrów, suchej substancji oraz karotenów, przy jednoczesnym utrzymaniu stosunkowo wysokiego poziomu witaminy C. Oświetlenie LED 2 - RWFR wspierało produkcję chlorofilu a i fruktozy, natomiast LED 4 - BW okazało się najbardziej efektywne dla syntezy związków fenolowych i karotenów. LED 1 - RW nie przynosiło wyraźnych korzyści w porównaniu do kontroli. Uzyskane wyniki mogą być podstawą do dalszych badań nad dostosowaniem spektrum światła LED do optymalizacji składu chemicznego i wartości odżywczej produktów roślinnych.



Rysunek 40. Wartości ilorazów zawartości substancji chemicznych w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola = 1)



Rysunek 41. Wartości ilorazów zawartości substancji chemicznych w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola = 1)



Skład makro i mikroelementów:

porównanie zawartości pierwiastków i związków mineralnych w roślinach rukoli uprawianych pod wpływem różnych wariantów oświetlenia LED względem próby kontrolnej (światło białe 6500 K). Dla każdej cechy przedstawiono zakres zmienności, wartości skrajne oraz analizę różnic wyrażoną w procentach. Podkreślono istotne odchylenia względem kontroli oraz dokonano interpretacji możliwych przyczyn i skutków obserwowanych zmian.

Fosfor (P)

Zawartość fosforu była najwyższa w próbce kontrolnej (816 mg/kg s.m.), natomiast najniższa w wariancie LED 1 - RW (649 mg/kg), co oznacza spadek o 20,5%. W pozostałych wariantach LED wartości również były niższe względem kontroli, choć różnice te mieściły się w przedziale od -3,4% (LED 4 - BW) do -18,7% (LED 2 - RWFR). Wyniki te sugerują, że wszystkie spektra LED ograniczały akumulację fosforu w tkankach roślinnych, co może być związane z wpływem oświetlenia na aktywność enzymów i gospodarkę energetyczną komórek.

Potas (K)

Największą zawartość potasu stwierdzono przy LED 4 - BW (5709 mg/kg), a najmniejszą dla LED 1 - RW (4792 mg/kg), co oznacza spadek o 15,9% względem kontroli. Wariant LED 2 - RWFR wykazywał umiarkowany spadek (-10,8%), a LED 3 - RB – niewielki (-4,8%). Wyjątek stanowił LED 4, gdzie poziom potasu praktycznie nie odbiegał od kontroli. Może to świadczyć o stabilnym pobieraniu potasu w obecności światła o pełnym widmie (z komponentem niebieskim).

Magnez (Mg)

Najwyższe stężenie magnezu zaobserwowano w kontroli (425 mg/kg), natomiast najniższe przy LED 3 - RB (319 mg/kg), co stanowi spadek o 25%. Wszystkie warianty LED wpłynęły na zmniejszenie zawartości Mg: od -22,8% (LED 2 - RWFR) do -0,2% (LED 4 - BW). Ze względu na rolę magnezu jako centralnego atomu chlorofilu, tak wyraźne spadki mogą wskazywać na zaburzenia w syntezie chlorofilu lub transporcie jonów.

Wapń (Ca)

Najwyższe stężenie wapnia występowało w kontroli (2488 mg/kg), natomiast najniższe w przypadku LED 2 - RWFR (1455 mg/kg), co oznacza redukcję o 41,5%. Znaczące spadki odnotowano również dla LED 1 (-35,1%) i LED 3 (-26,7%). Wyjątek stanowił LED 4, gdzie spadek był umiarkowany (-28,4%). Wapń jest kluczowy dla struktury ścian komórkowych – jego niedobór może wpływać na jakość tkanek i trwałość przechowalniczą plonu.



Bor (B)

Wartość boru w kontroli wynosiła 10,5 mg/kg, natomiast najniższe stężenie zaobserwowano w wariantach LED 2 i LED 3 (2,38 mg/kg), co oznacza redukcję aż o 77,3%. LED 1 również znacząco obniżył poziom boru (-63,4%), natomiast LED 4 zredukował go o 76,7%. Tak duże spadki wskazują, że LED-y, niezależnie od spektrum, silnie ograniczały przyswajanie boru, co może wpływać na funkcjonowanie merystemów i rozwój nowych tkanek.

Miedź (Cu)

Zawartość miedzi była najwyższa w próbie kontrolnej (0,69 mg/kg), a najniższa w LED 2 (0,52 mg/kg), co odpowiada spadkowi o 24,6%. Najmniejszy spadek stwierdzono dla LED 3 (-13%). Ponieważ miedź uczestniczy w fotosyntezie i oddychaniu komórkowym, zaobserwowane obniżenia mogą wpływać na aktywność enzymatyczną i odporność roślin.

Żelazo (Fe)

Wariant kontrolny wykazywał zdecydowanie najwyższy poziom żelaza (25,2 mg/kg). Wszystkie warianty LED obniżyły jego zawartość – najbardziej LED 2 (-77,1%) i LED 1 (-72,5%). LED 4 - BW, choć również wykazał obniżenie, pozwolił na względnie wyższe stężenie żelaza (7,62 mg/kg). Tak silna redukcja może wskazywać na wpływ światła LED na transport Fe lub jego biodostępność w roślinie, z potencjalnymi konsekwencjami dla fotosyntezy i metabolizmu.

Mangan (Mn)

Najwyższy poziom manganu stwierdzono w kontroli (2,93 mg/kg), a najniższy przy LED 2 (1,47 mg/kg), co oznacza spadek o 49,8%. Podobne obniżenie wystąpiło w LED 1 (-49,5%) i LED 3 (-48,5%). Najbliższe wartości do kontroli wykazywał LED 4 (2,6 mg/kg; spadek o 11,3%). Mangan jest kofaktorem wielu enzymów – jego niedobór może wpływać na tempo wzrostu i odporność roślin.

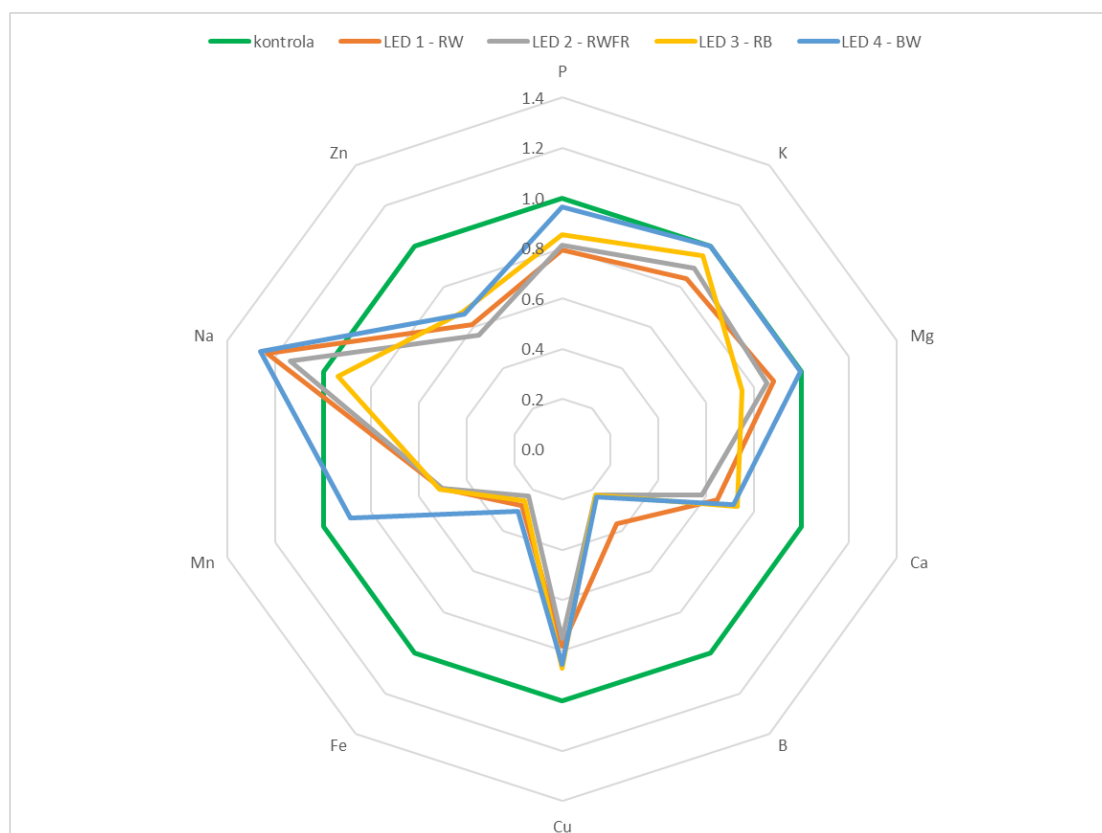
Sód (Na)

Największą zawartość sodu odnotowano przy LED 4 (49,3 mg/kg), co oznacza wzrost o 26,4% względem kontroli. Najniższy poziom wystąpił w LED 3 (36,6 mg/kg), czyli o 6,2% mniej niż w kontroli. Pozostałe warianty wykazywały umiarkowane wzrosty. Wzrost zawartości sodu może być konsekwencją zmienionej transpiracji i działania pomp jonowych pod wpływem światła LED.

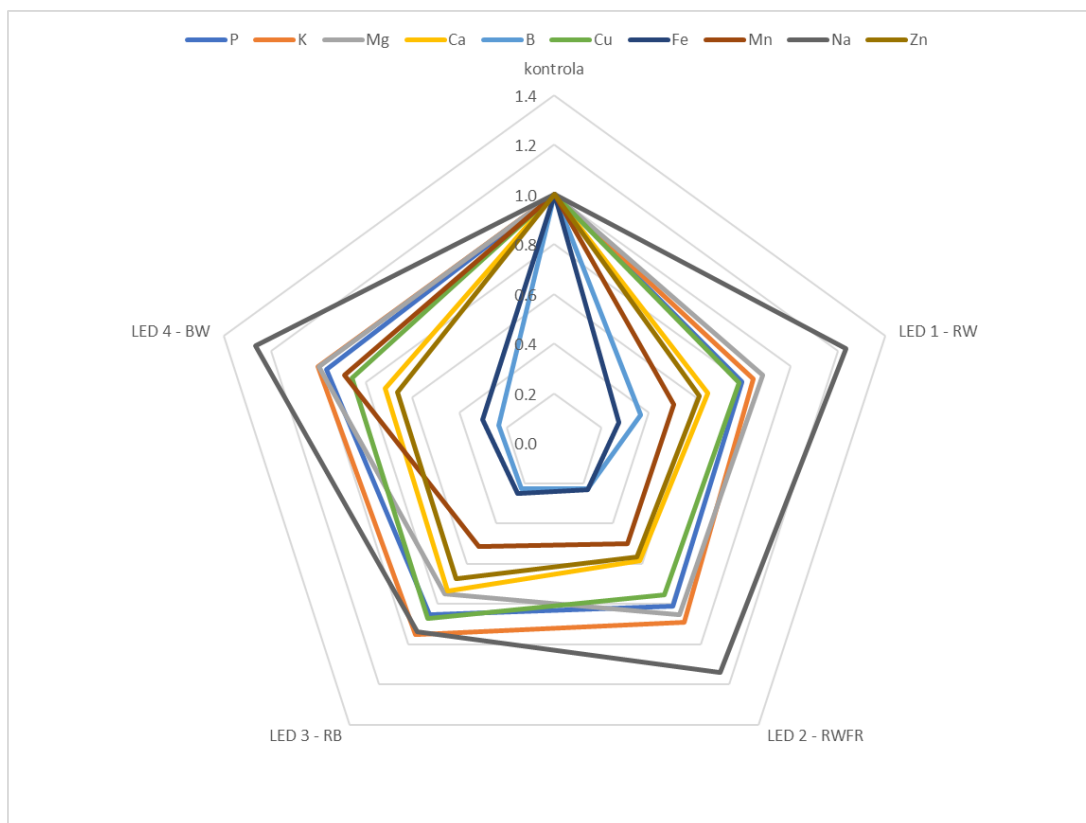
Cynk (Zn)



Cynk w próbie kontrolnej osiągał poziom 4,4 mg/kg. W każdym z wariantów LED odnotowano spadki – największy dla LED 2 (-43,6%), najmniejszy dla LED 3 (-32,5%). Obniżony poziom Zn może wpływać na funkcjonowanie enzymów i ekspresję genów związanych z obroną roślin.



Rysunek 42. Wartości ilorazów zawartości mikro i makro pierwiastków w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1)



Rysunek 43. Wartości ilorazów zawartości mikro i makro pierwiastków w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1)

Azotany (NO_3^-)

Zawartość azotanów była najwyższa w kontroli (4461 mg/kg), natomiast najniższa przy LED 3 (2676 mg/kg), co oznacza redukcję o 40%. LED 2 obniżył zawartość NO_3^- o 11,3%, natomiast LED 1 – o 5,7%. Największy spadek może świadczyć o efektywniejszym metabolizmie azotu w warunkach LED 3, co z punktu widzenia zdrowia konsumenta jest zjawiskiem korzystnym.

Azotyny (NO_2^-)

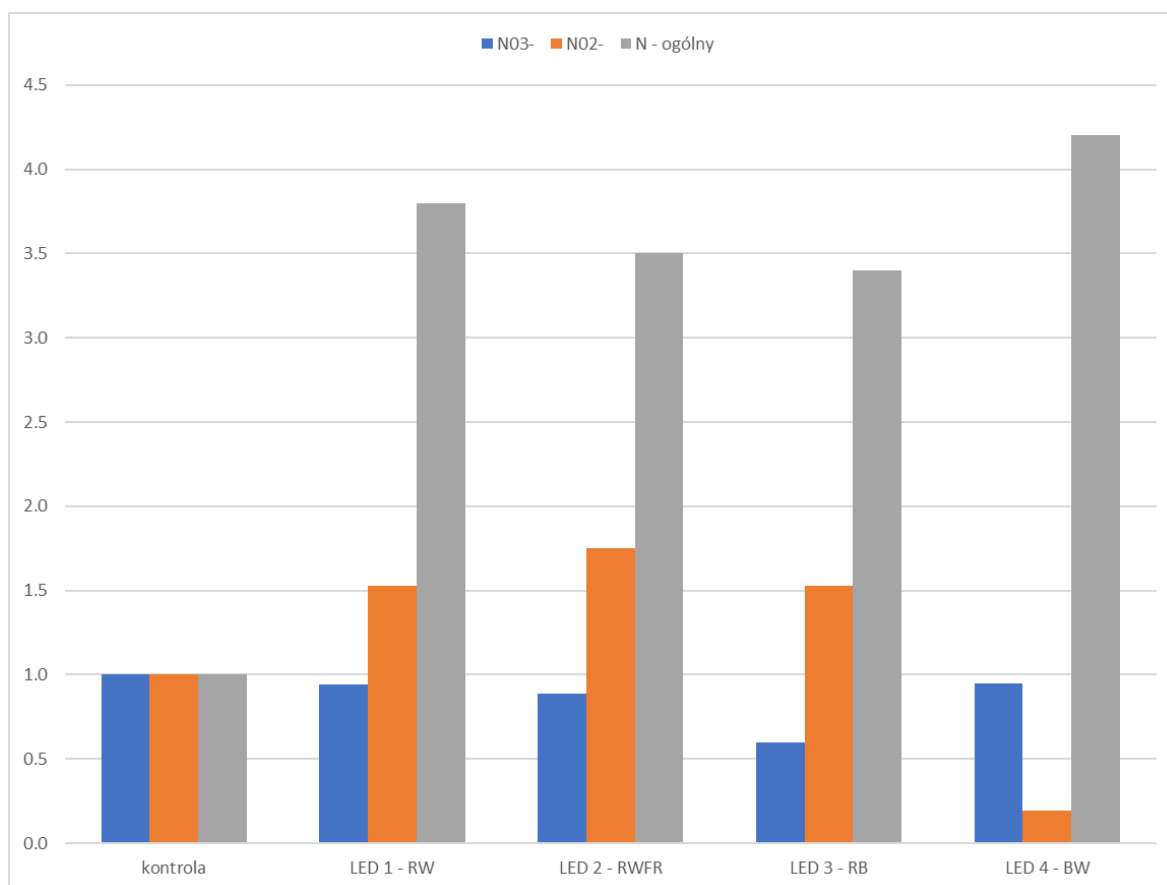
Największe stężenie azotynów odnotowano dla LED 2 (89,9 mg/kg), co oznacza wzrost aż o 74,9% względem kontroli (51,4 mg/kg). LED 3 i LED 1 również wykazały wzrosty – odpowiednio o 52,9% i 52,5%. Z kolei LED 4 istotnie obniżył zawartość NO_2^- aż o 80,7%. Obecność azotynów w żywności budzi kontrowersje ze względu na potencjalne ryzyko zdrowotne, dlatego wyniki te mają duże znaczenie dla bezpieczeństwa żywności.

Azot ogólny (NKj)

Azot oznaczony metodą Kjeldahla był najwyższy w LED 1 (0,38%) i najniższy w kontroli (0,1%). Wszystkie warianty LED wykazywały wzrost zawartości azotu – największy dla LED 1 (+280%) i LED 4 (+320%). Może to świadczyć o intensywniejszym pobieraniu i akumulacji związków



azotowych w warunkach doświetlania LED, co może korzystnie wpływać na wartość odżywczą, o ile nie skutkuje nadmiernym gromadzeniem form niepożądanych (np. azotanów lub azotynów).



Rysunek 44. Wartości ilorazów zawartości azotanów, azotynów i azotu ogólnego w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1)

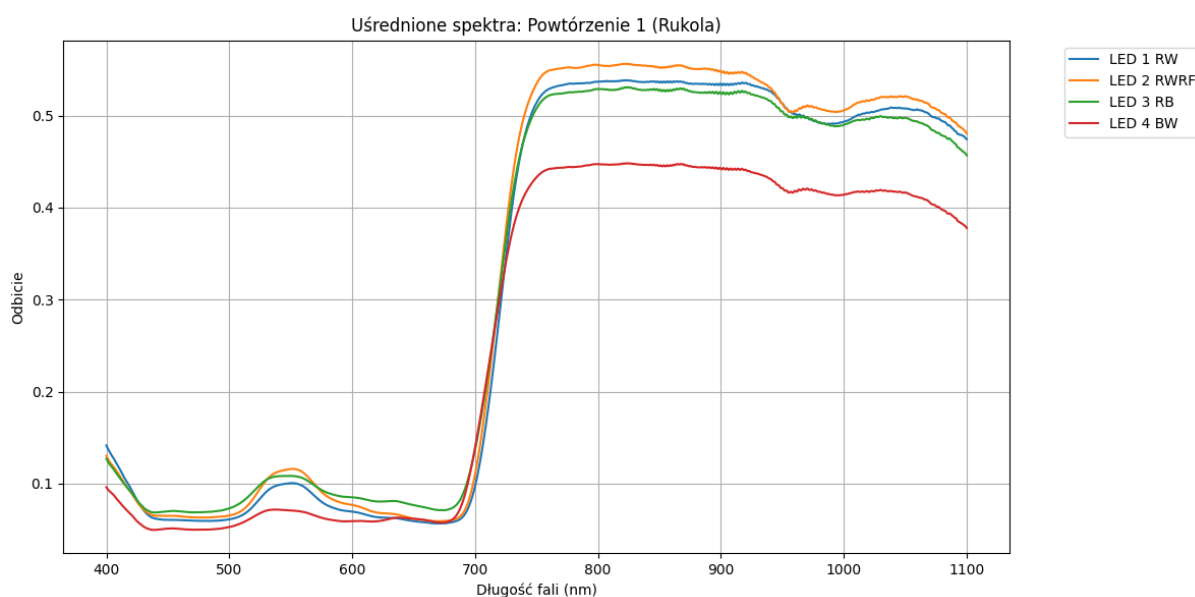
Zastosowanie różnych wariantów światła LED wywierało istotny wpływ na profil pierwiastków w roślinach rukoli. W większości przypadków obserwowano obniżenie zawartości składników mineralnych względem kontroli, szczególnie w zakresie żelaza, boru, manganu i fosforu. Wyjątkiem był sód oraz azot ogólny, które wzrastały pod wpływem LED. Wariant LED 4 - BW wykazywał najbardziej zrównoważony profil składników, z najmniejszymi stratami i niektórymi korzyściami (np. niższe NO₂⁻). Wyniki te wskazują, że odpowiedni dobór spektrum LED może stanowić narzędzie do celowego kształtowania składu chemicznego plonu, jednak wymaga to kompromisu między akumulacją pożądanых pierwiastków a ograniczaniem związków potencjalnie szkodliwych.



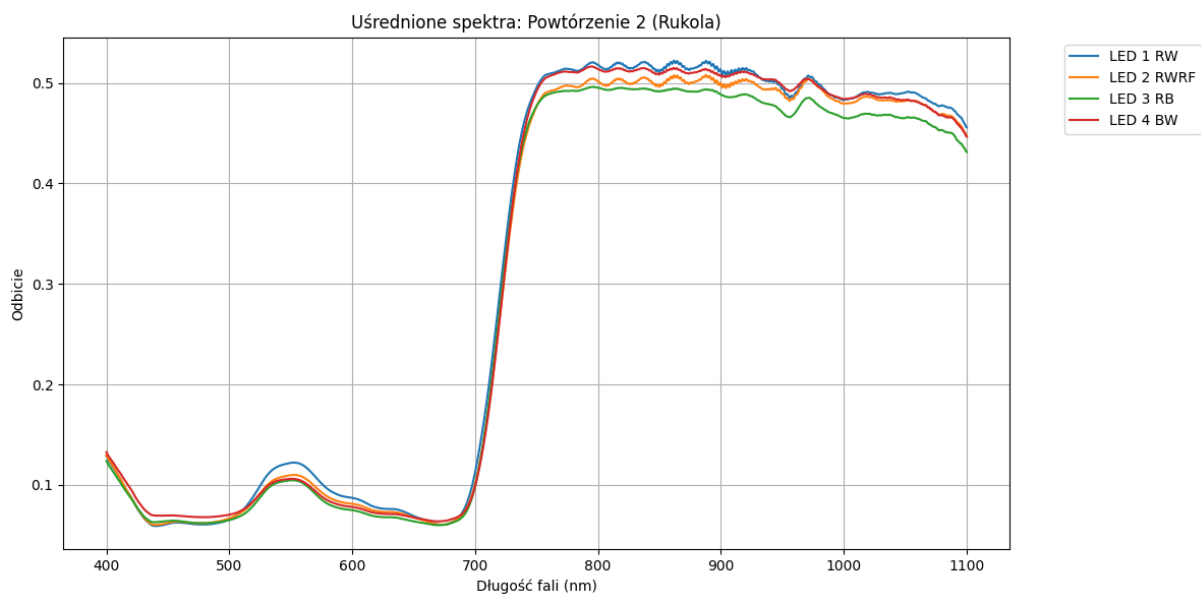
5.2.4. Analiza obrazów spektralnych rukoli

Na podstawie porównania uśrednionych danych spektralnych dla roślin rukoli jednoznacznie stwierdzono, że poszczególne powtórzenia/kampanie pomiarowe eksperymentu różniły się między sobą. W przypadku niektórych serii różnice pomiędzy poletkami doświadczalnymi były minimalne, natomiast w innych były one wyraźnie bardziej zauważalne. Największą zmiennością charakteryzowały się powtórzenia pierwsze (i trzecie – podobnie jak w przypadku obserwacji dotyczących sałaty – co może sugerować wystąpienie zakłóceń w warunkach prowadzenia doświadczenia.

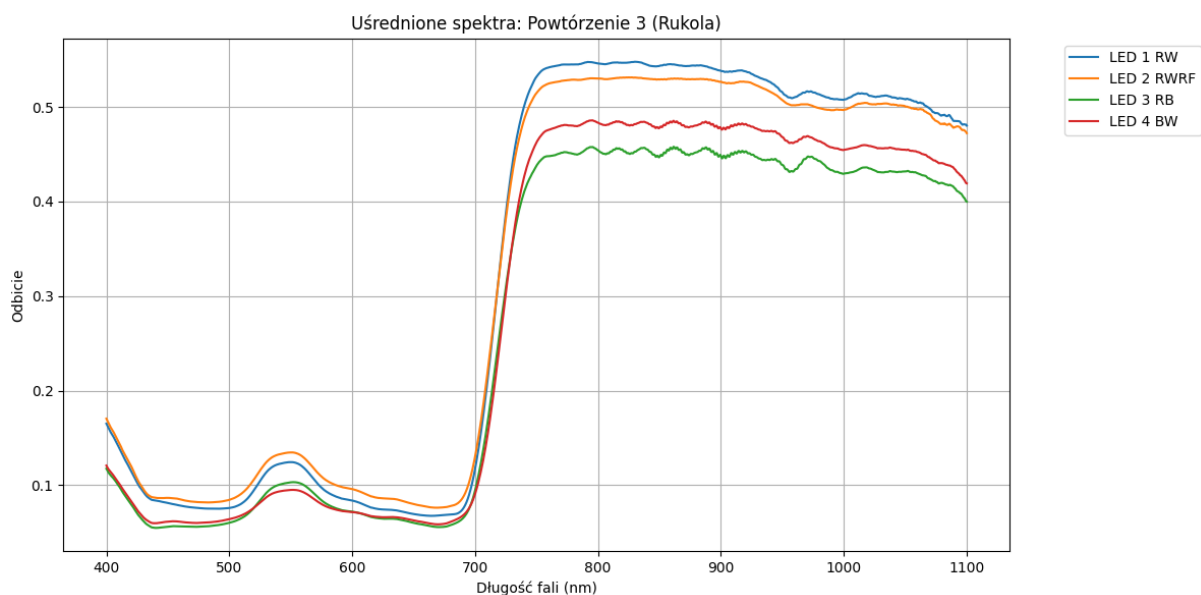
Analiza uśrednionych widm odbiciowych wskazuje, że liście oświetlane światłem typu RWFR oraz RW wykazują najwyższe wartości refleksyjności w zakresie 550–650 nm, co może świadczyć o ich jaśniejszym, żółtawym zabarwieniu wynikającym z niższej zawartości chlorofilu. Z kolei liście eksponowane na światło typu LED3 BW charakteryzują się najniższym poziomem refleksyjności w zakresie widzialnym, co wskazuje na silną absorpcję promieniowania przez chlorofil i może być interpretowane jako cecha liści o intensywnie zielonej barwie.



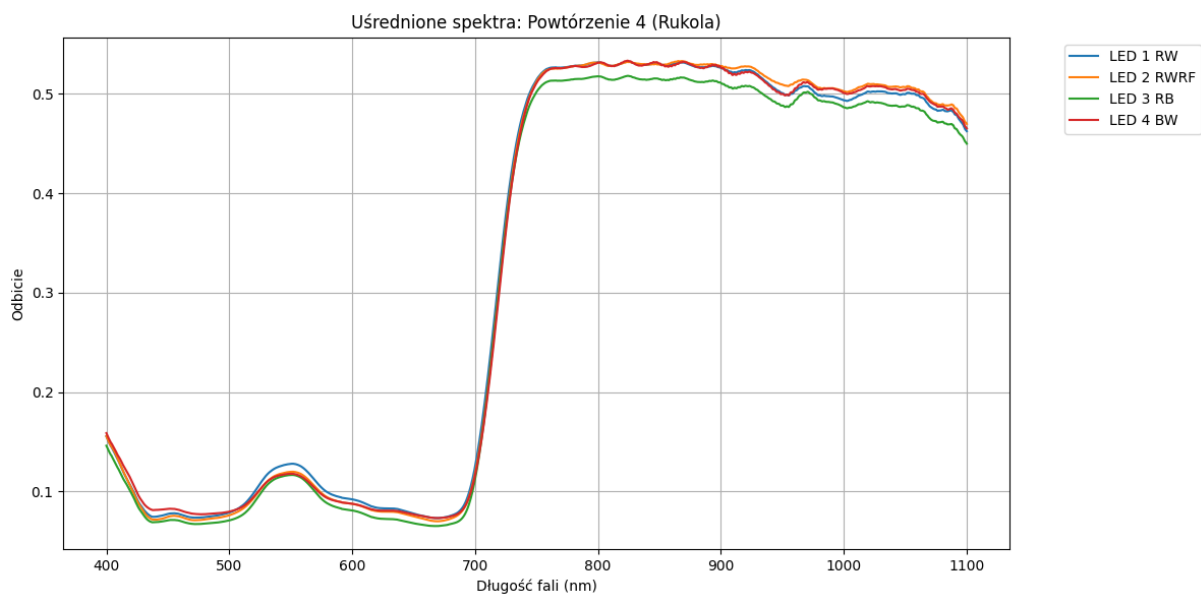
Rysunek 45. Analiza obrazów spektralnych w kampanii 1 dla rukoli



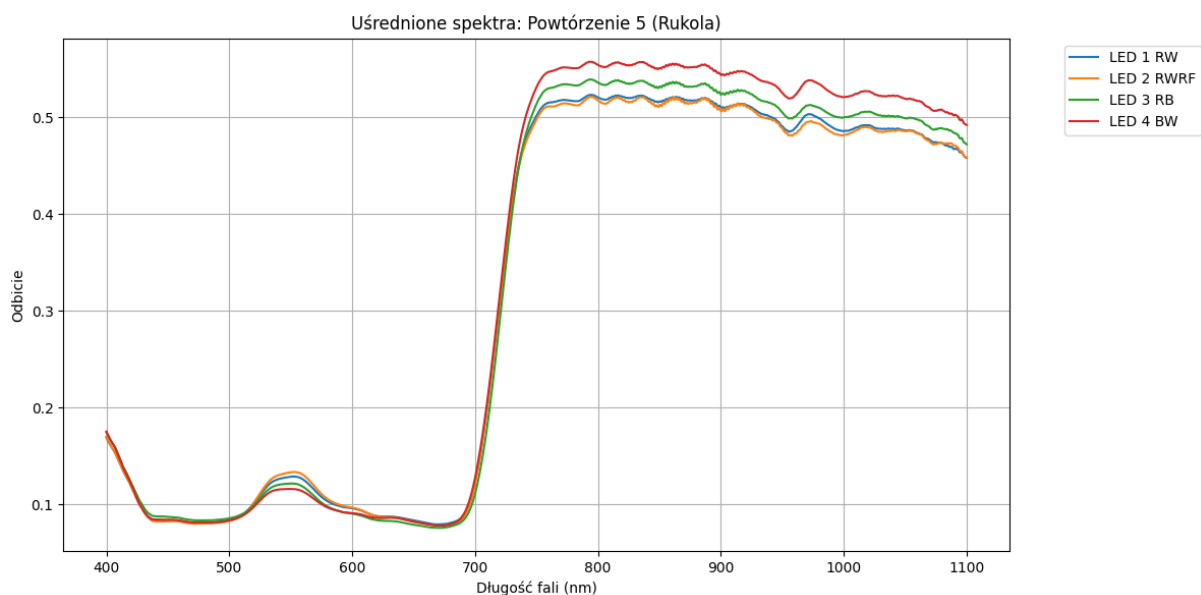
Rysunek 46. Analiza obrazów spektralnych w kampanii 2 dla rukoli



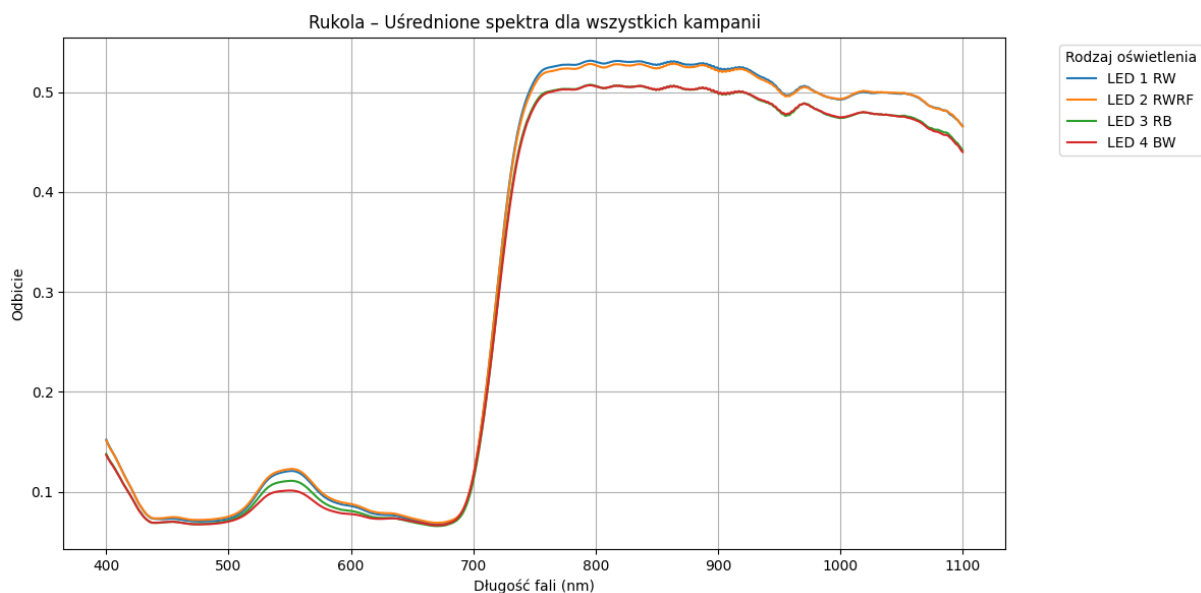
Rysunek 47. Analiza obrazów spektralnych w kampanii 3 dla rukoli



Rysunek 48. Analiza obrazów spektralnych w kampanii 4 dla rukoli



Rysunek 49. Analiza obrazów spektralnych w kampanii 5 dla rukoli



Rysunek 50. Analiza uśrednionych obrazów spektralnych dla rukoli

Dla roślin rukoli, na podstawie analizy widm odbiciowych, wyznaczono wskaźniki wegetacyjne (Rysunek 51, Rysunek 52) odzwierciedlające stan fizjologiczny roślin. Największe odchylenia wartości wskaźników zaobserwowano w powtórzeniach 1 i 5. Może to świadczyć o wystąpieniu czynników zakłócających, niezwiązanych bezpośrednio z zastosowanym rodzajem oświetlenia, takich jak chwilowe zmiany mikroklimatu lub stresy środowiskowe. Biorąc pod uwagę tylko kampania 1/powtórzenie 1 możemy jednak zauważyć mocne zróżnicowanie współczynników względem rodzaju oświetlenia.

Species	Point number	Campaign number	NDVI	PRI	WSI	Red-Edge Stress	Cigreen	MCARI
Rukola	LED 1 RW	Powtórzenie 1	0,808	0,035	0,933	0,593	4,113	0,071
Rukola	LED 2 RWRF	Powtórzenie 1	0,806	0,034	0,933	0,561	3,613	0,097
Rukola	LED 3 RB	Powtórzenie 1	0,760	0,036	0,951	0,492	3,684	0,115
Rukola	LED 4 BW	Powtórzenie 1	0,768	0,043	0,952	0,417	5,109	0,163
Rukola	LED 1 RW	Powtórzenie 2	0,788	0,008	0,986	0,543	3,065	0,101
Rukola	LED 2 RWRF	Powtórzenie 2	0,782	0,010	1,008	0,572	3,350	0,070
Rukola	LED 3 RB	Powtórzenie 2	0,782	0,027	0,993	0,572	3,567	0,066
Rukola	LED 4 BW	Powtórzenie 2	0,777	0,026	0,994	0,591	3,642	0,056
Rukola	LED 1 RW	Powtórzenie 3	0,778	0,048	0,960	0,541	3,275	0,088
Rukola	LED 2 RWRF	Powtórzenie 3	0,747	0,040	0,955	0,504	2,822	0,094
Rukola	LED 3 RB	Powtórzenie 3	0,778	0,017	0,997	0,554	3,249	0,069
Rukola	LED 4 BW	Powtórzenie 3	0,780	0,022	0,983	0,598	3,868	0,051
Rukola	LED 1 RW	Powtórzenie 4	0,755	0,029	0,965	0,517	3,020	0,090
Rukola	LED 2 RWRF	Powtórzenie 4	0,764	0,027	0,973	0,537	3,274	0,082
Rukola	LED 3 RB	Powtórzenie 4	0,773	0,036	0,982	0,539	3,301	0,082
Rukola	LED 4 BW	Powtórzenie 4	0,755	0,034	0,972	0,545	3,335	0,068
Rukola	LED 1 RW	Powtórzenie 5	0,734	0,022	0,986	0,522	2,903	0,069
Rukola	LED 2 RWRF	Powtórzenie 5	0,736	0,018	0,978	0,519	2,740	0,072
Rukola	LED 3 RB	Powtórzenie 5	0,751	0,032	0,979	0,569	3,227	0,055
Rukola	LED 4 BW	Powtórzenie 5	0,751	0,029	0,989	0,529	3,582	0,077



Rysunek 51. Wskaźniki wegetatywne dla roślin rukoli uszeregowane po kampaniach pomiarowych (powtórzeniach).

Species	Point number	Campaign number	NDVI	PRI	WSI	Red-Edge Stress	Cigreen	MCARI
Rukola	LED 1 RW	Powtórzenie 1	0,808	0,035	0,933	0,593	4,113	0,071
Rukola	LED 1 RW	Powtórzenie 2	0,788	0,008	0,986	0,543	3,065	0,101
Rukola	LED 1 RW	Powtórzenie 3	0,778	0,048	0,960	0,541	3,275	0,088
Rukola	LED 1 RW	Powtórzenie 4	0,755	0,029	0,965	0,517	3,020	0,090
Rukola	LED 1 RW	Powtórzenie 5	0,734	0,022	0,986	0,522	2,903	0,069
Rukola	LED 2 RWRF	Powtórzenie 1	0,806	0,034	0,933	0,561	3,613	0,097
Rukola	LED 2 RWRF	Powtórzenie 2	0,782	0,010	1,008	0,572	3,350	0,070
Rukola	LED 2 RWRF	Powtórzenie 3	0,747	0,040	0,955	0,504	2,822	0,094
Rukola	LED 2 RWRF	Powtórzenie 4	0,764	0,027	0,973	0,537	3,274	0,082
Rukola	LED 2 RWRF	Powtórzenie 5	0,736	0,018	0,978	0,519	2,740	0,072
Rukola	LED 3 RB	Powtórzenie 1	0,760	0,036	0,951	0,492	3,684	0,115
Rukola	LED 3 RB	Powtórzenie 2	0,782	0,027	0,993	0,572	3,567	0,066
Rukola	LED 3 RB	Powtórzenie 3	0,778	0,017	0,997	0,554	3,249	0,069
Rukola	LED 3 RB	Powtórzenie 4	0,773	0,036	0,982	0,539	3,301	0,082
Rukola	LED 3 RB	Powtórzenie 5	0,751	0,032	0,979	0,569	3,227	0,055
Rukola	LED 4 BW	Powtórzenie 1	0,768	0,043	0,952	0,417	5,109	0,163
Rukola	LED 4 BW	Powtórzenie 2	0,777	0,026	0,994	0,591	3,642	0,056
Rukola	LED 4 BW	Powtórzenie 3	0,780	0,022	0,983	0,598	3,868	0,051
Rukola	LED 4 BW	Powtórzenie 4	0,755	0,034	0,972	0,545	3,335	0,068
Rukola	LED 4 BW	Powtórzenie 5	0,751	0,029	0,989	0,529	3,582	0,077

Rysunek 52. Wskaźniki wegetatywne dla roślin rukoli uszeregowane po rodzajach widm światła LED.

5.2.5. Wpływ widma światła LED na cechy plonotwórcze rukoli w świetle analizy składowych głównych (PCA)

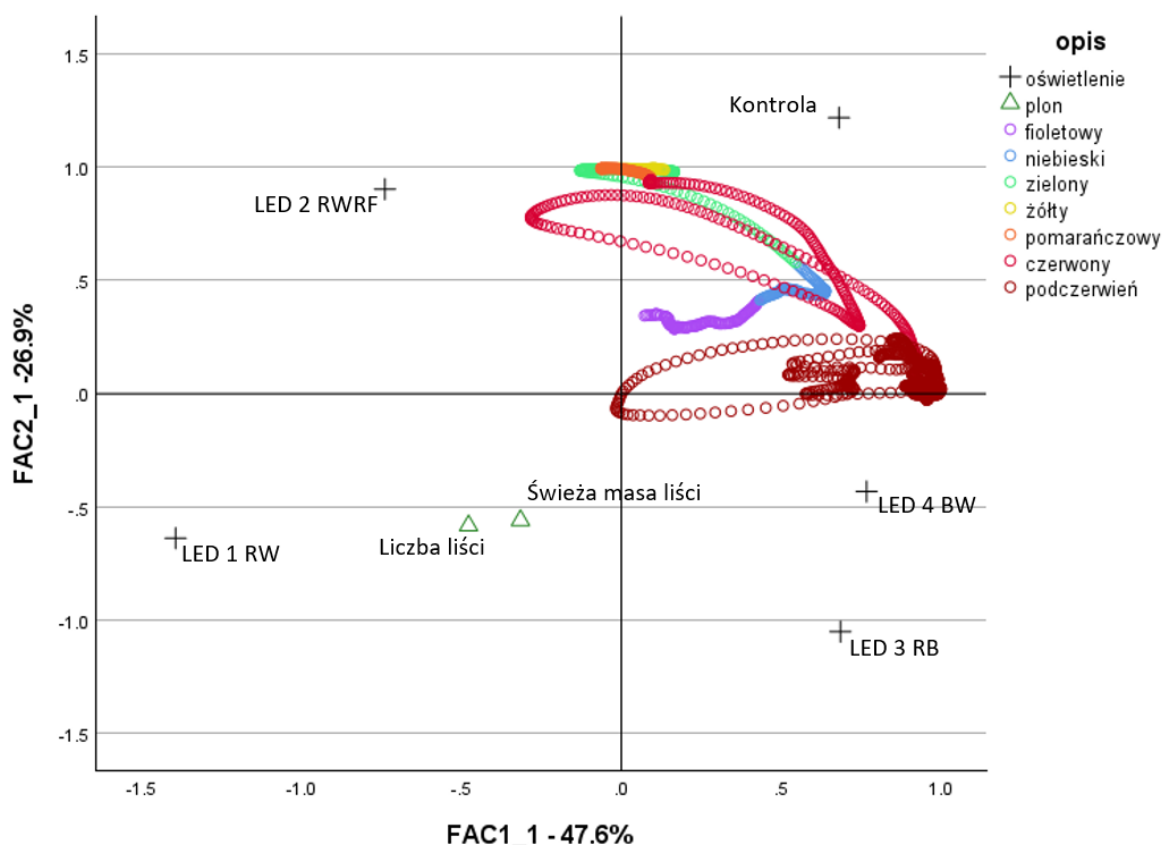
Światło jest jednym z kluczowych czynników kształtujących wzrost i rozwój roślin. W warunkach kontrolowanych, takich jak uprawy szklarniowe i wertykalne, coraz częściej stosuje się doświetlanie diodami LED, które pozwalają na precyzyjne sterowanie długością fali i natężeniem promieniowania. Poszczególne zakresy spektralne różnicowanie wpływają na procesy fizjologiczne roślin, co można wykorzystać w optymalizacji parametrów wzrostu i jakości plonu. Rukola jako roślina liściasta szybko reaguje na zmiany w środowisku świetlnym, co czyni ją dogodnym obiektem do badań nad odpowiedzią na różne kombinacje widm LED.

W niniejszym opracowaniu dokonano analizy wpływu czterech konfiguracji oświetlenia LED na cechy plonotwórcze rukoli, tj. świeżą masę liści oraz liczbę liści. Analiza składowych głównych (PCA) pozwoliła na identyfikację zależności między parametrami świetlnymi (zakresy od 400 do 1100 nm) a odpowiedzią roślin na zastosowane warunki świetlne.

W wyniku analizy, redukcji wymiarów otrzymano dwie pierwsze składowe główne PCA wyjaśniły łącznie 74,5% zmienności danych, przy czym PC1 stanowiła 47,6%, a PC2 – 26,9%. Rozkład zmiennych w przestrzeni dwuwymiarowej (Rysunek 53) wskazuje na wyraźne różnice



między poszczególnymi wariantami oświetlenia, zarówno pod względem położenia spektralnego, jak i cech plonotwórczych. Zarówno świeża masa liści (-0.31; -0.56), jak i liczba liści (-0.48; -0.58) wykazują silne przesunięcie w kierunku ujemnych wartości obu głównych składowych, co świadczy o ich powiązaniu z ukierunkowaniem przeciwnym do widm zielonego (średnio 0.08; 0.94), żółtego (średnio 0.08; 0.99) i pomarańczowego (średnio 0.01; 0.98), które dominują w dodatnich wartościach PC2. Przeciwnie, silna dodatnia projekcja w PC1 widoczna jest dla zakresu podczerwonego (średnio 0.85; 0.06) i niebieskiego (średnio 0.56; 0.46), co wskazuje, że te pasma mają bardziej bezpośredni wpływ na rozwój liści. Analiza położenia wariantów oświetleniowych pokazuje, że największą skutecznością w poprawie cech plonotwórczych charakteryzuje się LED1-RW (-1.39; -0.64), który jest zlokalizowany blisko zmiennych reprezentujących masę i liczbę liści. Wysoką skuteczność wykazuje również LED2-RWFR (-0.74; 0.90), choć jego pozycja bliższa jest spektralnym zmiennym barw ciepłych (pomarańczowy, żółty), co może sugerować mieszany wpływ. LED3-RB (0.68; -1.05) oraz LED4-BW (0.77; -0.43), mimo obecności fal niebieskich, są bardziej oddalone od wektora cech plonotwórczych, natomiast kontrola (0.68; 1.22) wykazuje największe oddalenie – szczególnie od świeżej masy i liczby liści – co wskazuje na jej najmniejszą efektywność.



Rysunek 53. Relacje grup doświadczalnych oraz cech plonotwórczych na podstawie pomiarów widma spektralnego na liściach rzepki



Zakresy spektralne światła różnicowanie wpływają na metabolizm i morfologię rukoli. Światło czerwone (ok. 660 nm), poprzez aktywację fitochromów, stymuluje elongację liści oraz ich ekspansję, co przekłada się na wzrost biomasy. Kombinacja RW, zawierająca czerwony i biały komponent (zawierający także pasma zielone i niebieskie), tworzy zrównoważone warunki świetlne, które sprzyjają fotosyntezie i rozwojowi organów liściowych. Bliskość LED1-RW do wektorów świeżej masy i liczby liści wskazuje na jego pozytywny wpływ na plon rukoli, co może być efektem synergii działania czerwonego światła z umiarkowanym udziałem innych długości fal.

LED2-RWFR, mimo zawartości pasma dalekiej czerwieni (far red), które może wywoływać efekt elongacji poprzez przekształcenia fitochromowe, również pozytywnie wpływa na rozwój liści. Może to wynikać z poprawy rozpraszania światła w łanie oraz stymulacji transportu asymilatów. Jednak jego większe oddalenie od zmiennych plonotwórczych niż LED1-RW sugeruje, że dodatek dalekiej czerwieni nie przynosi już tak wyraźnych korzyści, a może wręcz prowadzić do nadmiernego wydłużenia pędów kosztem struktury liści. Konfiguracja LED3-RB, zawierająca głównie światło czerwone i niebieskie, wykazuje mieszany wpływ. Niebieskie światło (ok. 450 nm) pobudza fototropiny i kryptochromy, co zwykle sprzyja formowaniu zwartych rozet i poprawia parametry fotosyntezy, ale przy zbyt dużym udziale może ograniczać rozrost liści. W analizie PCA wariant ten wykazuje odległość od zmiennych plonotwórczych, co może oznaczać nieoptymalne proporcje spektralne. LED4-BW, zawierający dominujący komponent niebieski z dodatkiem białego światła, charakteryzuje się przesunięciem w kierunku PC1, ale niewielką bliskością do zmiennych cech plonu. Może to sugerować, że choć światło niebieskie wpływa korzystnie na rozwój aparatów fotosyntetycznych, nie zapewnia ono warunków sprzyjających maksymalizacji biomasy liściowej. Niebieskie światło może bowiem zwiększać gęstość chloroplastów i zawartość chlorofilu, ale jednocześnie prowadzić do zahamowania elongacji komórek. Pozycja kontroli – wysoko przesunięta w dodatnie wartości obu składowych – wskazuje jednoznacznie na jej niską efektywność w kontekście świeżej masy i liczby liści. Jej bliskość do spektralnych pasm żółtego i zielonego światła sugeruje, że brak ukierunkowanego doświetlania LED prowadził do dominacji naturalnego, szerokopasmowego światła o niewielkiej intensywności w kluczowych długościach fal.

Dzięki tym analizom PCA możemy wskazać, iż konfiguracje oświetleniowe LED różnicowanie wpływają na cechy plonotwórcze rukoli. Najkorzystniejsze efekty uzyskano przy zastosowaniu LED1-RW (światło czerwono-białe), co znajduje odzwierciedlenie w wysokiej zgodności wektorów tej konfiguracji z cechami świeżej masy liści i liczby liści. Wynika to najprawdopodobniej z optymalnych proporcji spektralnych wspierających fotosyntezę oraz rozwój liści. Dodatek dalekiej czerwieni (LED2-RWFR) może działać stymulująco, jednak jego



skuteczność zależy od proporcji z pozostałymi pasmami i może prowadzić do niekorzystnych efektów elongacyjnych. Konfiguracje LED3-RB i LED4-BW, mimo obecności światła niebieskiego, nie wykazały przewagi nad RW, co sugeruje ograniczoną rolę fal krótkich w maksymalizacji biomasy rukoli. Brak doświetlania (kontrola) skutkowało istotnym obniżeniem parametrów plonu, co podkreśla znaczenie aktywnego zarządzania widmem światła w warunkach kontrolowanej produkcji. Wyniki potwierdzają, że odpowiedni dobór spektrum LED stanowi kluczowy czynnik w produkcji warzyw liściowych i powinien być dostosowany do specyficznych potrzeb morfologicznych danego gatunku.

5.3. Wpływ rodzaju oświetlenia LED na jakość rozsady sałaty w systemie hydroponicznym

W badaniu przeprowadzonym w hali uprawowej, w warunkach całkowitego doświetlania światłem sztucznym, analizowano wpływ rodzaju oświetlenia na jakość rozsady sałaty. Oświetlenie kontrolne stanowiła świetlówka liniowa o barwie zimnej (6500 K), a porównywano je z czterema wariantami lamp LED o zróżnicowanym składzie widma (RW, RWFR, RB, BW).

5.3.1. Analiza jakości i kondycji siewek rozsady sałaty

Oceny wykonano przy użyciu skali 0–5, typowej dla oceny cech jakościowych rozsady przez ekspertów. Wartość 0 oznaczała brak cechy, a 5 – jej maksymalne, pożądane nasilenie. Cechy chlorozy i nekrozy w żadnym z wariantów nie zostały zaobserwowane – uzyskały wartość 0, co świadczy o dobrej zdrowotności roślin i braku uszkodzeń fizjologicznych; w dalszej analizie zostały wyłączone jako cechy niewykazujące zmienności. Dodatkowo analizowano świeżą masę liści (g) oraz liczbę liści, traktowane jako cechy mierzalne. Wszystkie oceny i pomiary wykonano w 10 powtórzeniach.

Wyniki i interpretacja

Ocena ogólna i barwa liści - w porównaniu do kontroli, najlepsze ogólne oceny jakości rozsady uzyskały rośliny oświetlane lampami LED 3 – RB (ocena 4,4, iloraz 1,07) oraz LED 1 – RW (4,3, iloraz 1,05). Jedynie w przypadku LED 2 – RWFR odnotowano niewielki spadek ogólnej kondycji (ocena 3,9, iloraz 0,95), co może wskazywać na mniejszą przydatność tego widma dla etapu produkcji rozsady.

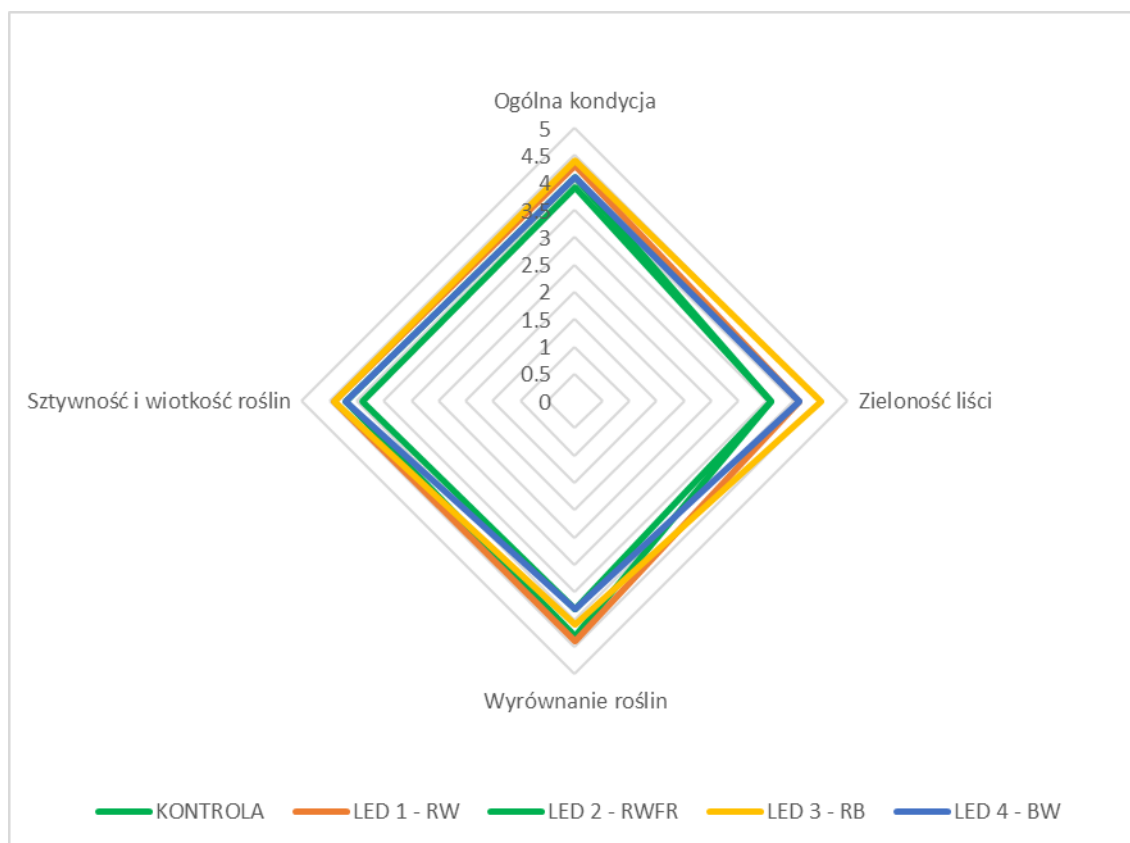
Najwyższą zieloność liści, świadczącą o aktywności fotosyntetycznej i dobrym wybarwieniu chlorofilowym, uzyskano w wariantcie LED 3 – RB (ocena 4,5, iloraz 1,25). Również LED 1 – RW i LED 4 – BW poprawiały tę cechę względem kontroli (ilorazy po 1,14), co potwierdza korzystny wpływ dodatkowego światła czerwonego i niebieskiego w widmie.

Wyrównanie roślin, będące pożądaną cechą w produkcji szkółkarskiej, było najwyższe w wariantcie LED 1 – RW (ocena 4,4, iloraz 1,02), nieco wyższe niż w kontroli. Warianty LED 2 –

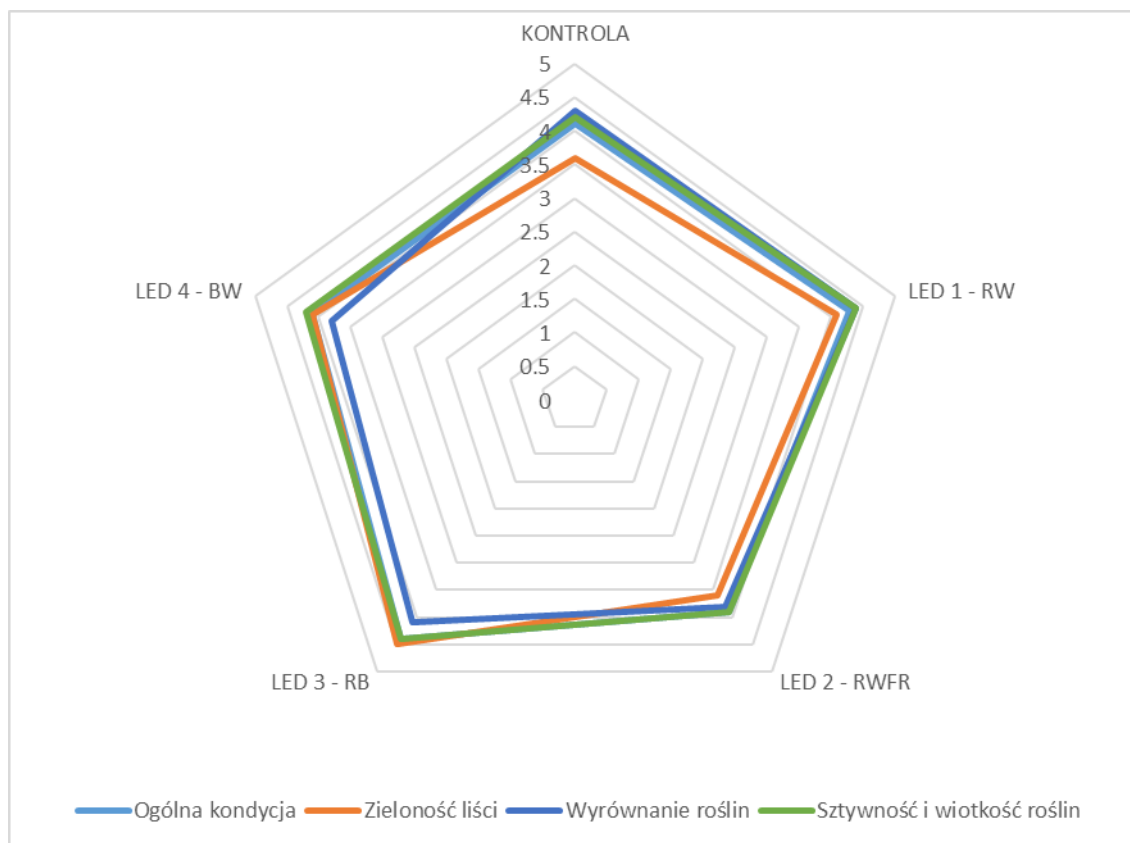


RWFR i LED 4 – BW uzyskały niższe oceny (iloraz 0,88), co może oznaczać bardziej zróżnicowany rozwój roślin.

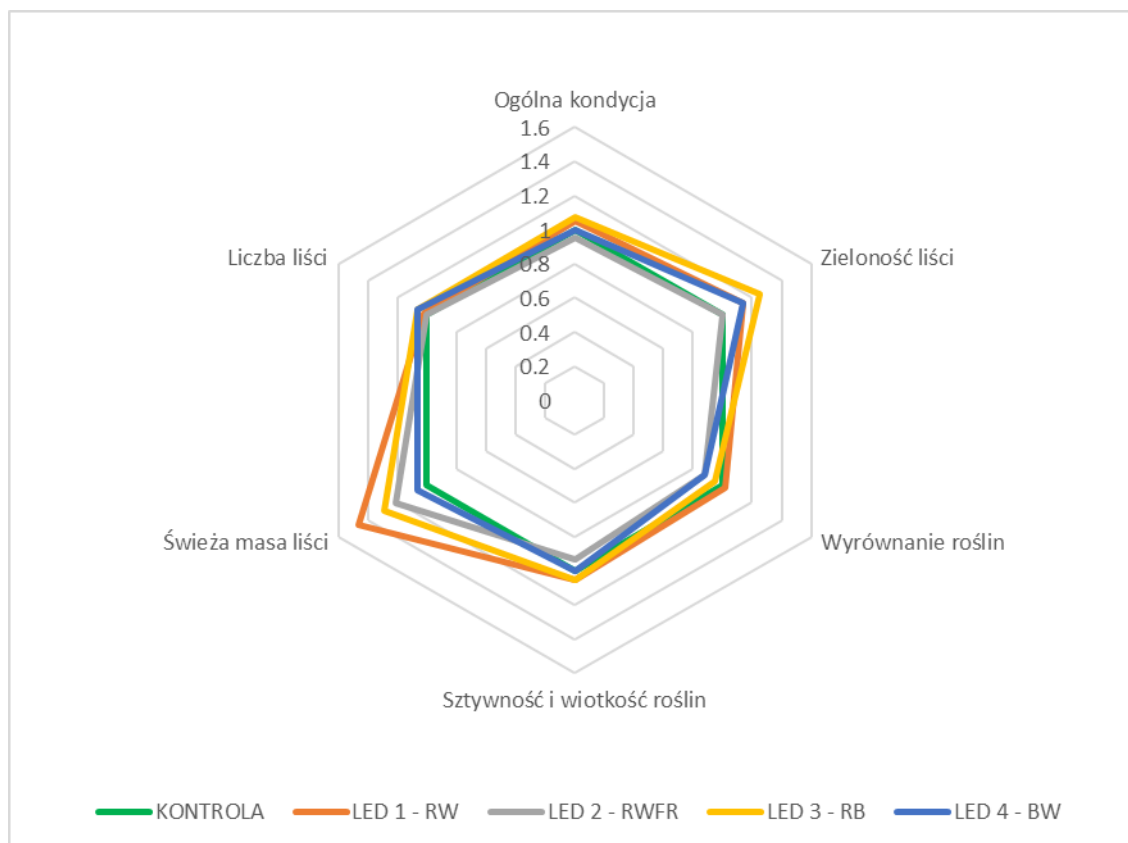
Cechy związane z sztywnością i wiotkością, a więc pokrojem i nośnością siewek, poprawiły się we wszystkich wariantach LED – najwyraźniej w przypadku LED 1 – RW i LED 3 – RB (iloraz 1,05). Oświetlenie RWFR miało najmniej pozytywny wpływ (iloraz 0,93), co może świadczyć o mniej zwartej budowie rozsady.



Rysunek 54. Ocena (skala od 0 do 5) jakości siewek sałaty w podziale na zastosowane oświetlenie



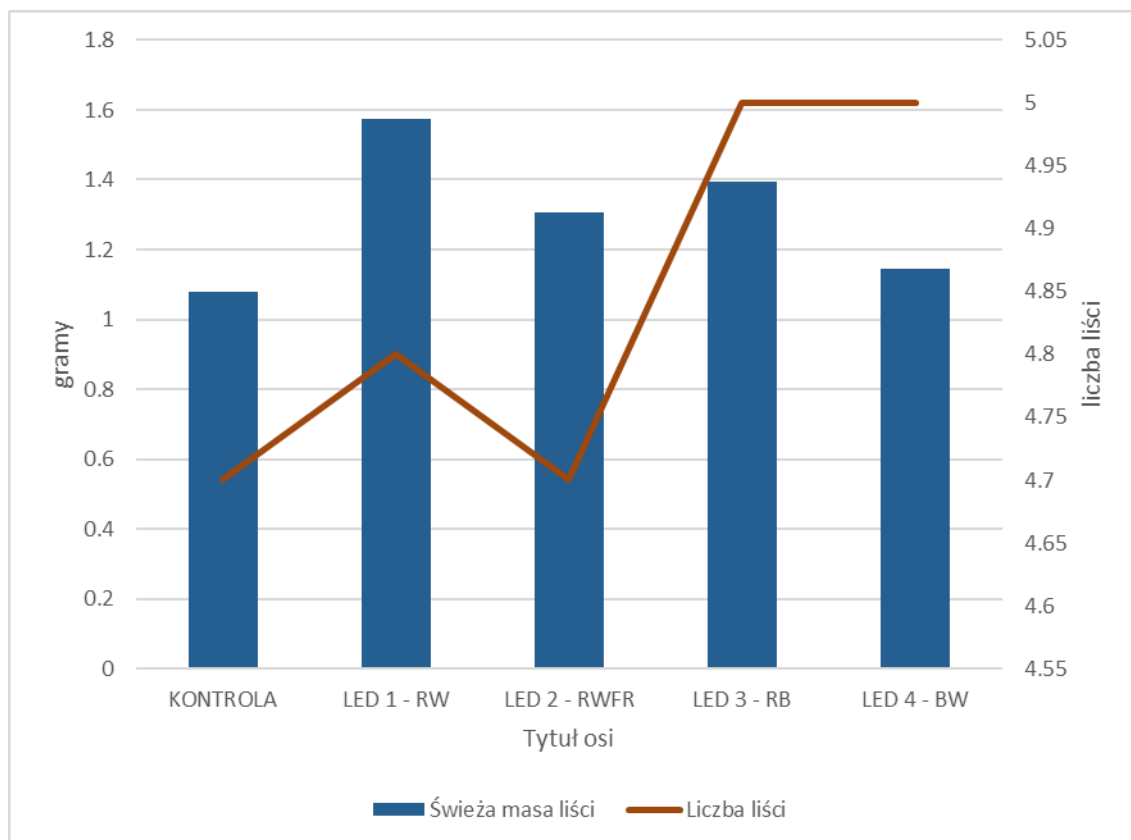
Rysunek 55. Ocena (skala od 0 do 5) jakości siewek sałaty w podziale na zastosowane oświetlenie



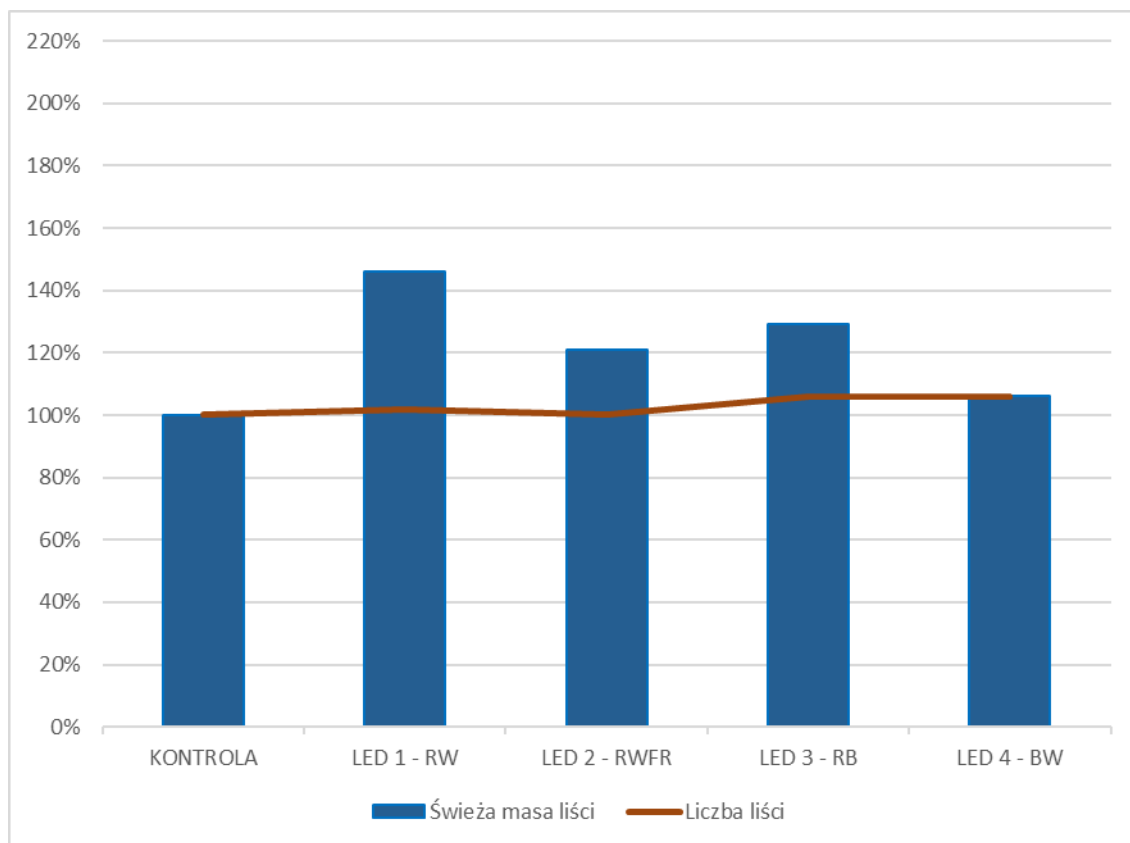
Rysunek 56. Wskaźniki ilorazu wartości jakości siewek sałaty doświetlanych do kontroli w podziale na zastosowane oświetlenie

Świeża masa liści była znacznie wyższa we wszystkich wariantach LED niż w kontroli. Największy wzrost odnotowano w przypadku LED 1 – RW (1,573 g, iloraz 1,46), a także LED 3 – RB (1,393 g, iloraz 1,29). Oznacza to istotne zwiększenie produktywności biomasy na etapie rozsady, co ma kluczowe znaczenie w dalszym cyklu produkcyjnym.

Liczba liści również była wyższa przy zastosowaniu LED 3 i LED 4 (średnio 5 liści, iloraz 1,06). Pozostałe warianty uzyskały wyniki zbliżone do kontroli.



Rysunek 57. Średnie wartości świeżej masy i liczby liści siewek sałaty doświetlanych do kontroli



Rysunek 58. Wskaźniki ilorazu wartości świeżej masy i liczby liści siewek sałaty doświetlanych do kontroli

Podsumowując, zastosowanie oświetlenia LED miało korzystny wpływ na jakość rozsady sałaty w systemie akwaponicznym. Szczególnie wyróżniły się warianty:

LED 1 – RW: znaczący wzrost masy liści (o 46%), poprawa sztywności, wyrównania i ogólnej kondycji, LED 3 – RB: najlepsze wybarwienie liści, wzrost liczby liści i ogólnej oceny.

Wariant LED 2 – RWFR okazał się najmniej korzystny, z nieznacznym pogorszeniem ogólnej kondycji i wyrównania. LED 4 – BW poprawiał barwę i strukturę liści, ale w mniejszym stopniu zwiększał świeżą masę.

Otrzymane wyniki potwierdzają, że odpowiednio dobrane spektrum LED może znacznie poprawiać jakość rozsady, wpływając zarówno na cechy wizualne, jak i mierzalne parametry wzrostu. W szczególności korzystne wydają się układy z przewagą światła czerwonego i niebieskiego, które optymalizują rozwój liści i strukturę siewek w warunkach zamkniętej produkcji szkółkarskiej.

5.3.2. Analiza chemiczna barwników i suchej masy dla siewek rozsady sałaty

Analiza porównawcza zawartości chlorofilu, karotenów oraz suchej masy wykonanych w akredytowanym laboratorium dla siewek rozsady sałaty pod wpływem różnych wariantów



światła LED, w odniesieniu do kontroli (Rysunek 59, Rysunek 60) z zastosowaniem wartości maksymalnych, minimalnych oraz względne różnice procentowe. Zinterpretowano je w kontekście fizjologii roślin oraz możliwego wpływu spektrum światła na jakość materiału nasadzeniowego.

Chlorofil a

Najwyższą zawartość chlorofilu a (32,0 jednostek) uzyskano przy zastosowaniu LED4 – BW, co oznacza wzrost o 23,1% względem kontroli (26,0). Warianty LED1 – RW i LED2 – RWFR miały wartości zbliżone do kontroli (odpowiednio +1,9% i -0,4%), a LED3 – RB wykazał nieznaczny spadek (-0,8%). Oświetlenie o szerokim spektrum (BW) znacznie stymulowało biosyntezę chlorofilu a, co może wskazywać na lepszą zdolność fotosyntetyczną roślin. Wzrost tej zawartości oznacza intensyfikację procesów przekształcania energii świetlnej w energię chemiczną, co jest korzystne dla dalszego wzrostu sałaty po wysadzeniu.

Chlorofil b

Najniższy poziom chlorofilu b (6,34 jednostek) odnotowano również przy LED4 – BW, co stanowi redukcję o 37,8% względem kontroli (10,2). Najbardziej zbliżone wartości do kontroli wystąpiły w LED2 – RWFR (-3,6%) i LED1 – RW (-5,0%). LED3 – RB wykazał spadek o 7,7%. Znaczne obniżenie zawartości chlorofilu b w wariancie BW może świadczyć o przesunięciu proporcji chlorofilowych na korzyść chlorofilu a. Może to wynikać z innego przebiegu adaptacji fotosyntetycznego aparatu świetlnego do spektrum światła bogatego w niebieskie i zielone długości fal. Choć chlorofil b wspiera pochłanianie światła uzupełniającego, jego spadek przy wysokim poziomie chlorofilu a może sugerować wyższą wydajność energetyczną roślin.

Karoteny ogółem

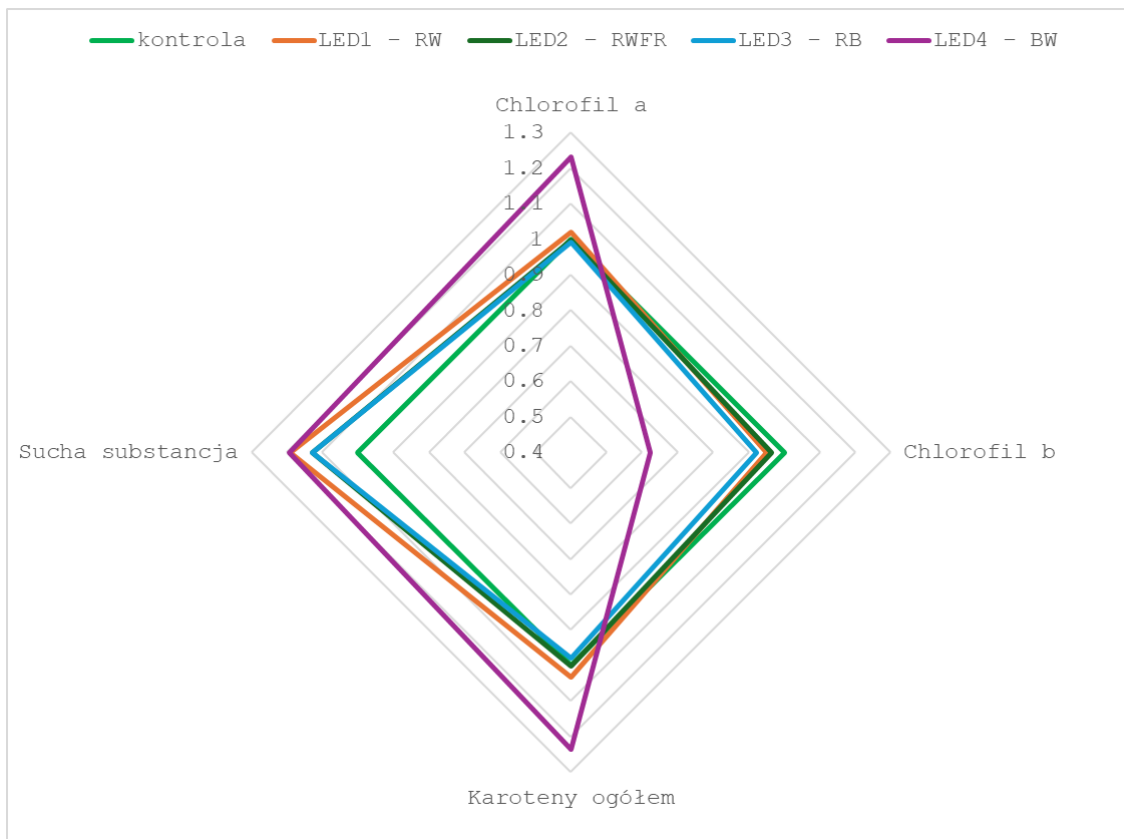
Zawartość karotenów ogółem była najwyższa w LED4 – BW (9,4 jednostek), co oznacza wzrost o 23,5% względem kontroli (7,61). Na drugim miejscu uplasował się LED1 – RW (+3,4%), natomiast LED2 – RWFR i LED3 – RB miały wartości zbliżone do kontroli (+0,3% i -2,2%). Wysoki poziom karotenów przy LED4 sugeruje, że światło o szerokim spektrum aktywuje szlaki biosyntezy związków antyoksydacyjnych. Karotenoidy pełnią kluczową rolę w ochronie chloroplastów przed stresem oksydacyjnym i w absorpcji światła pomocniczego, a ich wyższa zawartość może wskazywać na lepsze przygotowanie roślin do stresu środowiskowego.

Sucha substancja

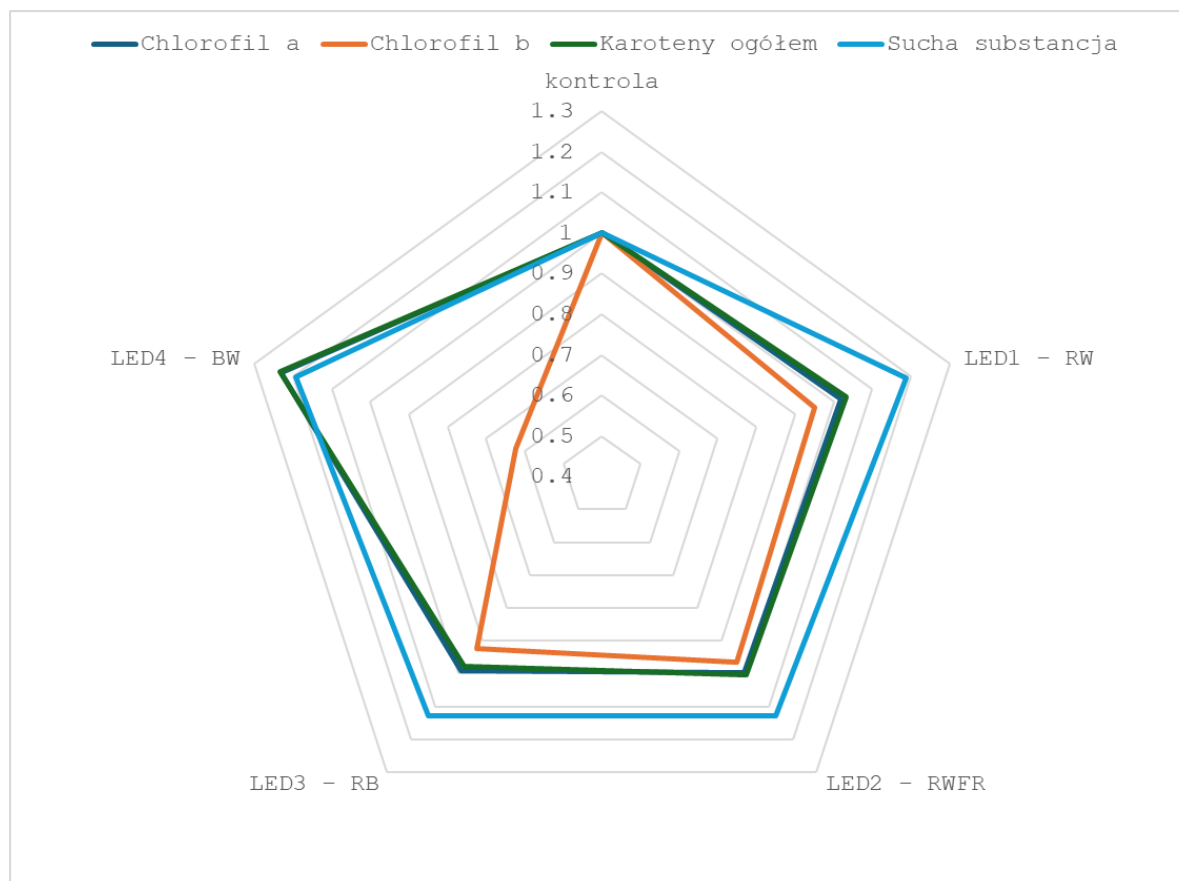
Największy udział suchej masy odnotowano w LED4 – BW (4,74%), co oznacza wzrost o 19,4% względem kontroli (3,97%). Bardzo zbliżony efekt uzyskano przy LED1 – RW (+18,9%), a LED2 – RWFR i LED3 – RB osiągnęły wartość +12,8%. Wyższy udział suchej masy oznacza



większe nagromadzenie substancji organicznych (białek, cukrów, związków bioaktywnych) i może wskazywać na bardziej zaawansowany stan fizjologiczny siewek. Światło LED, niezależnie od zastosowanego spektrum, pozytywnie wpłynęło na gromadzenie suchej masy, jednak największy efekt zanotowano w wariancie BW.



Rysunek 59. Wartości ilorazów zawartości substancji chemicznych w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1) dla siewki rozsady sałaty



Rysunek 60. Wartości ilorazów zawartości substancji chemicznych w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1) dla siewki rozsady sałaty

Podsumowując najbardziej wyróżniający się wariant to LED4 – BW, który istotnie zwiększył zawartość chlorofilu a, karotenów i suchej masy, przy jednoczesnym obniżeniu poziomu chlorofilu b. Może to świadczyć o korzystnym wpływie światła białego (o szerokim spektrum) na jakość fotosyntetyczną i metaboliczną siewek. Taki profil pigmentowy oraz wyższy udział suchej substancji sugerują większy potencjał wzrostowy po przesadzeniu roślin na stanowiska produkcyjne. LED1 – RW również wypadł korzystnie pod względem karotenów i suchej masy, jednak nie wykazał znaczących zmian w pigmentach chlorofilowych. Z kolei LED2 – RWFR i LED3 – RB miały mniejszy wpływ na cechy fizjologiczne, co sugeruje, że ich spektrum nie stymuluje w takim stopniu procesów anabolicznych w młodych roślinach. Wybór odpowiedniego spektrum LED może być więc kluczowym narzędziem w kształtowaniu jakości materiału nasadzeniowego sałaty.

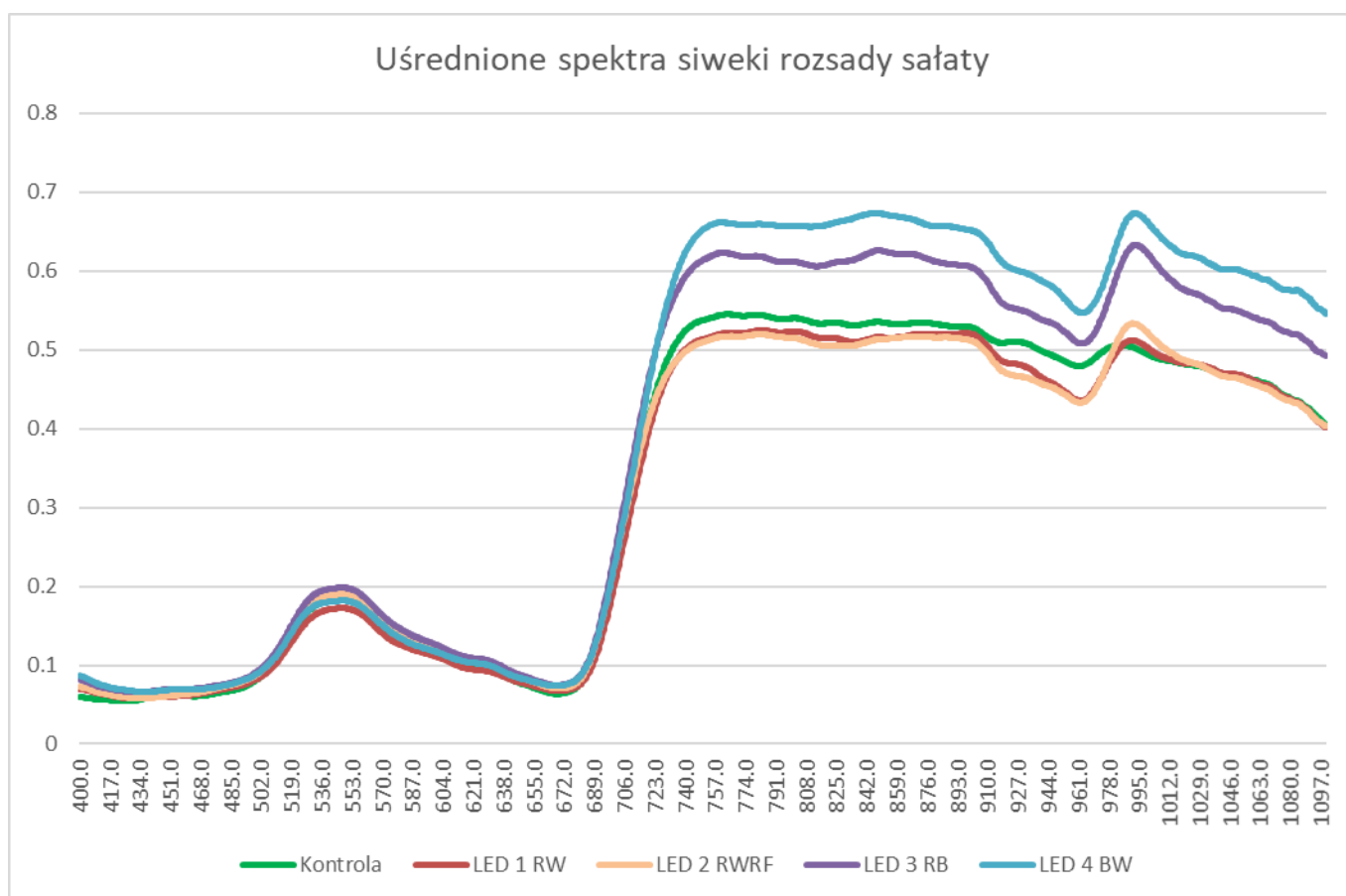
5.3.3. Analiza obrazów spektralnych siewek rozsady sałaty

Na podstawie porównania uśrednionych danych spektralnych dla siewek sałaty jednoznacznie stwierdzono, że poszczególne grupy badawcze charakteryzowały się dużą zmiennością spektrum odbitego światła mierzonego na liściach.



Analiza uśrednionych widm odbiciowych (Rysunek 61) wskazuje, że liście oświetlane światłem typu RW oraz RWFR wykazują zauważalnie najwyższe wartości refleksyjności w zakresie 550–650 nm, co może świadczyć o ich jaśniejszym, żółtawym zabarwieniu wynikającym z niższej zawartości chlorofilu. Z kolei liście eksponowane na światło typu LED3 BW charakteryzują się najniższym poziomem refleksyjności w zakresie widzialnym, co wskazuje na silną absorpcję promieniowania przez chlorofil i może być interpretowane jako cecha liści o intensywnie zielonej barwie.

Wyższe wartości refleksyjności w widmie >700nm świadczą o dobrej kondycji roślin na rysunku możemy zaobserwować kontrolę a nieznacznie poniżej niej wartości grup doświetlanych RW i RWRF, co wskazuje na gorszą kondycję roślin doświetlanych tym zakresem światła LED. Natomiast znacznie powyżej kontroli w tym zakresie są rośliny doświetlane RB oraz BW, co jednoznacznie wskazuje na dużo lepszą kondycję tych roślin względem kontroli.



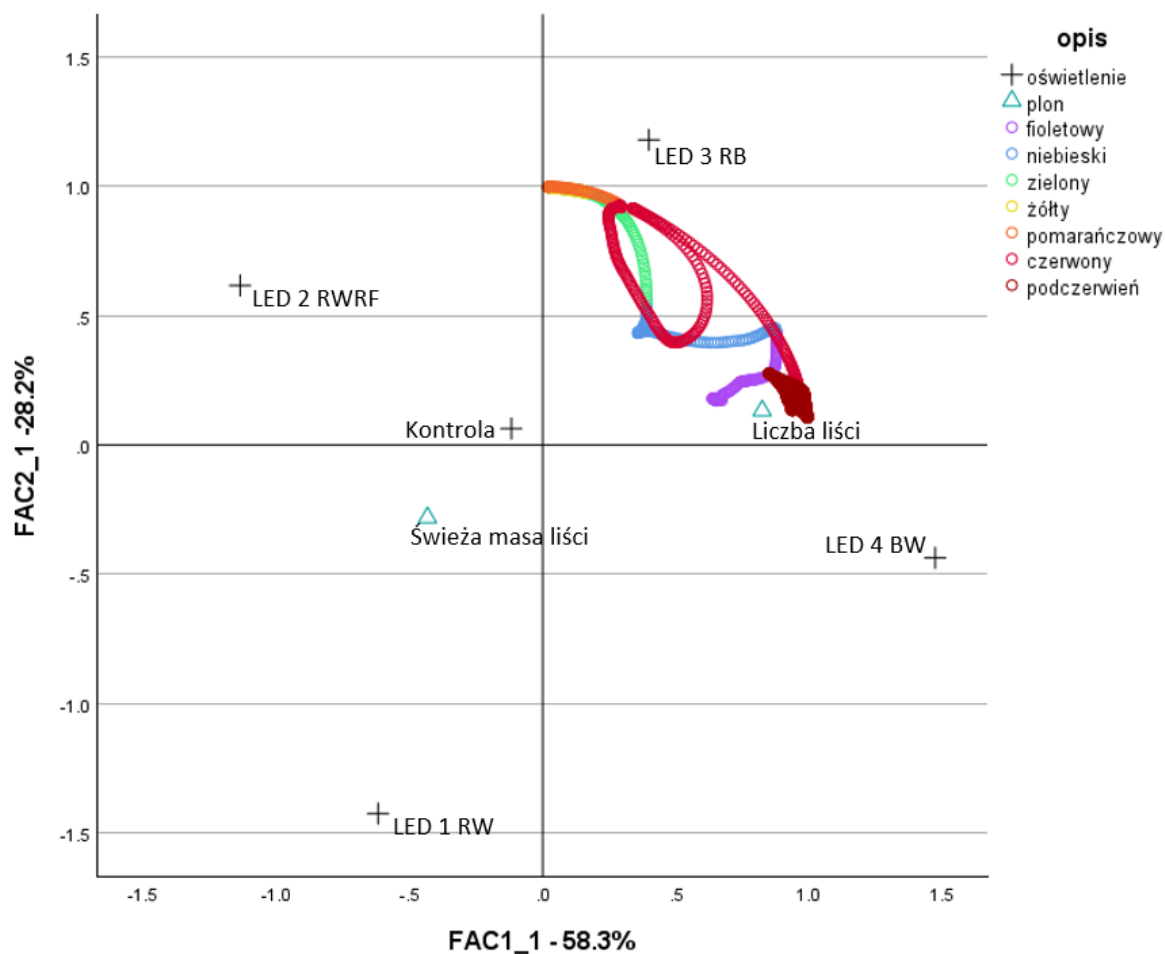
Rysunek 61. Analiza obrazów spektralnych dla siewek rozsady sałaty



5.3.4. Wpływ widma światła LED na cechy plonotwórcze siewek rozsady sałaty w świetle analizy składowych głównych (PCA)

Celem niniejszej analizy było określenie wpływu czterech wariantów oświetlenia LED (RW – czerwono-białe, RWFR – czerwono-białe z daleką czerwienią, RB – czerwono-niebieskie oraz BW – białe-niebieskie) na rozwój siewek sałaty, ze szczególnym uwzględnieniem świeżej masy liści i liczby liści. Analiza składowych głównych (PCA) posłużyła jako narzędzie interpretacyjne, pozwalające uchwycić zależności pomiędzy charakterystyką spektralną światła (zakres 400–1100 nm), a cechami plonotwórczymi badanych roślin.

W wyniku przeprowadzonej analizy otrzymano dwie pierwsze składowe główne PCA (Rysunek 62) wyjaśniają łącznie 86,5% całkowitej zmienności danych, przy czym PC1 odpowiada za 58,3%, a PC2 – za 28,2%. Tak wysoki udział dwóch pierwszych komponentów pozwala na wiarygodną interpretację zależności w przestrzeni dwuwymiarowej. Na wykresie PCA cechy plonotwórcze rozsady sałaty są rozmieszczone odmiennie: świeża masa liści znajduje się w ujemnych wartościach obu składowych (-0.43; -0.28), natomiast liczba liści zlokalizowana jest w dodatnich wartościach PC1 i nieznacznie dodatnich PC2 (0.82; 0.13). Taki rozkład sugeruje, że różne konfiguracje spektralne mogą różnicowanie wpływać na poszczególne aspekty wzrostu siewek – ich masę oraz liczbę organów liściowych. Najbliżej zmiennej świeża masa liści znajduje się wariant LED1-RW (-0.62; -1.43), co sugeruje jego istotny wpływ na wzrost biomasy liściowej. Z kolei liczba liści silnie koreluje z konfiguracją LED3-RB (0.40; 1.18), wskazując na pozytywny wpływ światła niebiesko-czerwonego na formowanie większej liczby liści. LED4-BW (1.47; -0.44), mimo obecności światła niebieskiego, jest oddalony od obu cech plonotwórczych. Kontrola (-0.12; 0.06), usytuowana w pobliżu centrum układu, wykazuje relatywnie neutralny wpływ na oba parametry. Spektra świetlne również rozkładają się charakterystycznie w przestrzeni PCA. Pasma podczerwieni (średnio 0.95; 0.18), fioletu (średnio 0.76; 0.26), czerwieni (średnio 0.53; 0.63) oraz niebieskiego (średnio 0.56; 0.44) są zlokalizowane w dodatnich wartościach PC1, z wyjątkiem niewielkich odchyłeń w PC2. Natomiast barwy zielona (średnio 0.19; 0.93), żółta (średnio 0.11; 0.99) i pomarańczowa (średnio 0.11; 0.98) dominują wyraźnie w dodatnich wartościach PC2.



Rysunek 62. Relacje grup doświadczalnych oraz cech plonotwórczych na podstawie pomiarów widma spektralnego siewek roszad sałaty

Wyniki te mogą sugerować, iż oświetlenie LED wpływa na rozwój siewek sałaty poprzez oddziaływanie na szereg procesów fizjologicznych – fotosyntezę, fotomorfogenezę, działanie regulatorów wzrostu oraz gospodarkę wodną. Wariant LED1-RW, zawierający światło czerwone i biały komponent, sprzyjał akumulacji świeżej masy liści. Światło czerwone, poprzez aktywację fitochromów, promuje elongację komórek i ekspansję blaszek liściowych, podczas gdy światło białe, będące mieszaniną wielu długości fal, może pełnić funkcję światła uzupełniającego, stabilizując efekty rozwojowe i ograniczając stres fizjologiczny. Bliskość tej konfiguracji do zmiennej świeża masa liści wskazuje na jej korzystny wpływ na wzrost biometryczny siewek. Z kolei LED3-RB, zawierający światło czerwone i niebieskie, miał największy wpływ na liczbę liści. Światło niebieskie, aktywujące fotoreceptory takie jak kryptochromy i fototropiny, wpływa na hamowanie elongacji i indukcję podziałów komórkowych, co może przekładać się na zwiększenie liczby wykształconych liści. Efekt ten był widoczny w analizie PCA poprzez bliskość wektora liczby liści do wariantu RB. LED2-RWRF, wzbogacony o daleką czerwień, znalazł się w pobliżu spektralnych zmiennych barw ciepłych i umiarkowanie korelował z cechami plonotwórczymi. Daleka czerwień, poprzez



działanie na fitochromy w stanie PFR, może wywoływać efekty elongacyjne, lecz ich wpływ na młode siewki może być ograniczony, jeśli nie towarzyszy im intensywna fotosynteza. Wskazuje to na konieczność precyzyjnego bilansowania widm, szczególnie w fazie wczesnego wzrostu. Wariant LED4-BW, choć zawierał niebieski komponent, nie sprzyjał wzrostowi ani zwiększeniu liczby liści. Może to wynikać z niekorzystnego stosunku barw oraz możliwego działania stresowego związanego z nadmiarem krótkofalowego promieniowania. Znaczące oddalenie tej konfiguracji od zmiennych plonotwórczych w analizie PCA potwierdza jej ograniczoną efektywność. Pozycja kontroli w centralnym obszarze przestrzeni PCA świadczy o braku wyraźnej stymulacji rozwoju cech plonotwórczych, co może wynikać z niedoboru intensywnego światła oraz braku ukierunkowanego bodźca spektralnego. Naturalne światło lub podstawowe warunki oświetleniowe nie były wystarczające do maksymalizacji potencjału wzrostowego siewek.

Można wykazać, iż analiza PCA wykazała istotny wpływ spektralnych parametrów światła LED na rozwój cech plonotwórczych siewek sałaty. Konfiguracja RW (LED1) okazała się najefektywniejsza w zwiększaniu świeżej masy liści, natomiast RB (LED3) najlepiej stymulowała zwiększenie liczby liści. Wynika to z fizjologicznych mechanizmów działania światła czerwonego i niebieskiego na fotosyntezę oraz fotomorfogenezę. Zastosowanie światła z dodatkiem dalekiej czerwieni (LED2) może być przydatne, ale jego efektywność zależy od doboru proporcji z pozostałymi pasmami. LED4-BW, mimo zawartości światła niebieskiego, nie wpłynął istotnie na poprawę parametrów plonu, co sugeruje potrzebę unikania jednostronnych lub nadmiernych dawek promieniowania krótkofalowego. Brak doświetlania LED (kontrola) skutkował relatywnie słabym rozwojem siewek, co wskazuje na potrzebę zastosowania odpowiednio zbilansowanego światła sztucznego w produkcji rozsady. Wnioski płynące z tej analizy mogą być pomocne w optymalizacji strategii świetlnych w profesjonalnej uprawie sałaty, szczególnie w warunkach szklarniowych i wertykalnych, gdzie kontrola spektrum światła stanowi istotny element zarządzania produkcją.

5.4. Analiza statystyczna wyników badań nad wpływem wariantów oświetlenia na plon i jakość owoców truskawki

Celem analizy było porównanie wpływu różnych wariantów oświetlenia LED na parametry plonu i jakościowe owoców truskawki uprawianej w warunkach kontrolowanych. Oceny dokonano na podstawie czterech pomiarów w okresie od września do października. Analizie poddano masę owoców, liczbę owoców, ich średnią wielkość oraz kondycję roślin i dojrzałość owoców. Kontrolę stanowiły rośliny uprawiane bez dodatkowego oświetlenia.

W celu określenia wpływu wariantów oświetlenia zastosowano:

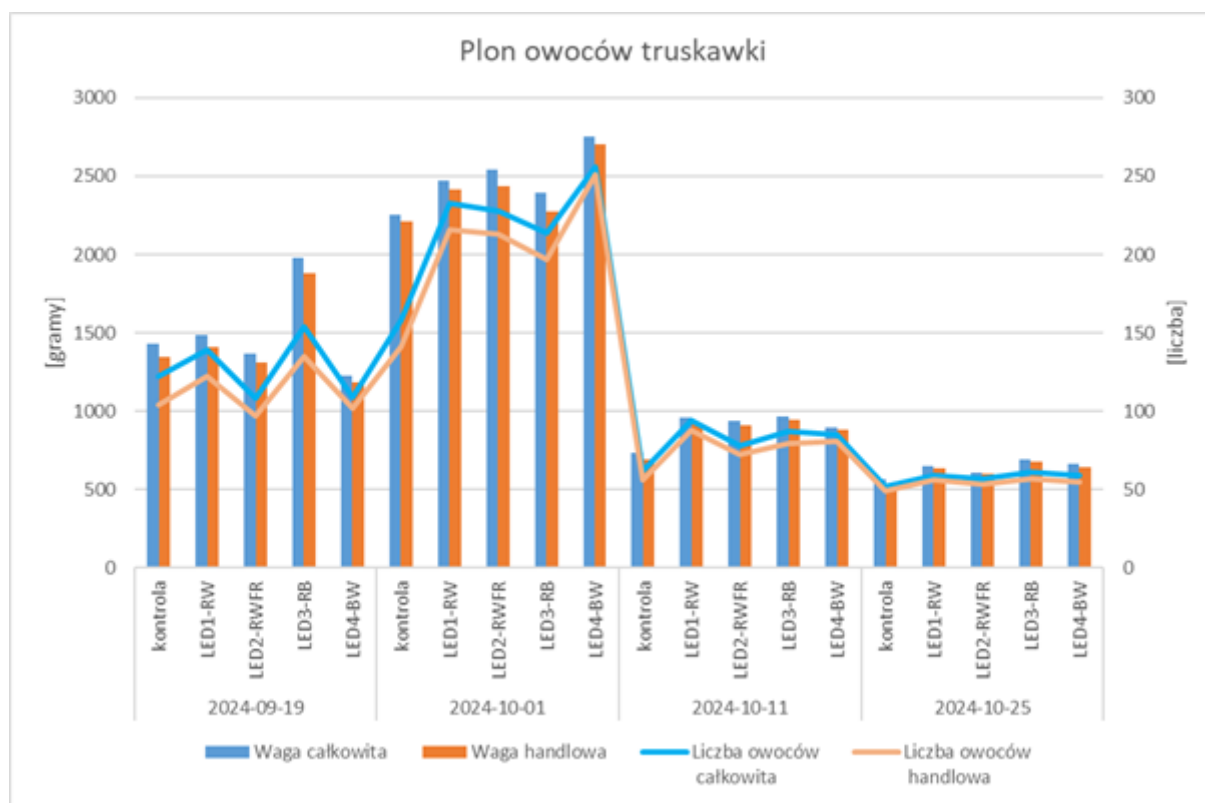
- Analizę różnic między wartościami poszczególnych cech w porównaniu do kontroli dla każdego terminu pomiaru,
- Obliczenie współczynnika zmienności (%CV) w celu oceny stabilności cech w różnych terminach.

5.4.1. Porównanie wartości cech względem kontroli

Dane wskazują, że zastosowanie oświetlenia LED miało istotny wpływ na parametry plonotwórcze truskawki (Rysunek 63):

Masa owoców: W większości przypadków masa całkowita i handlowa owoców była większa w wariantach LED niż w kontroli. Najwyższe wartości odnotowano dla wariantu LED4-BW (2755,8 g vs. 2251,7 g w kontroli, 01.10).

Liczba owoców: Warianty LED1-RW i LED4-BW charakteryzowały się większą liczbą owoców w porównaniu do kontroli (np. 256 owoców w LED4-BW vs. 158 w kontroli, 01.10).



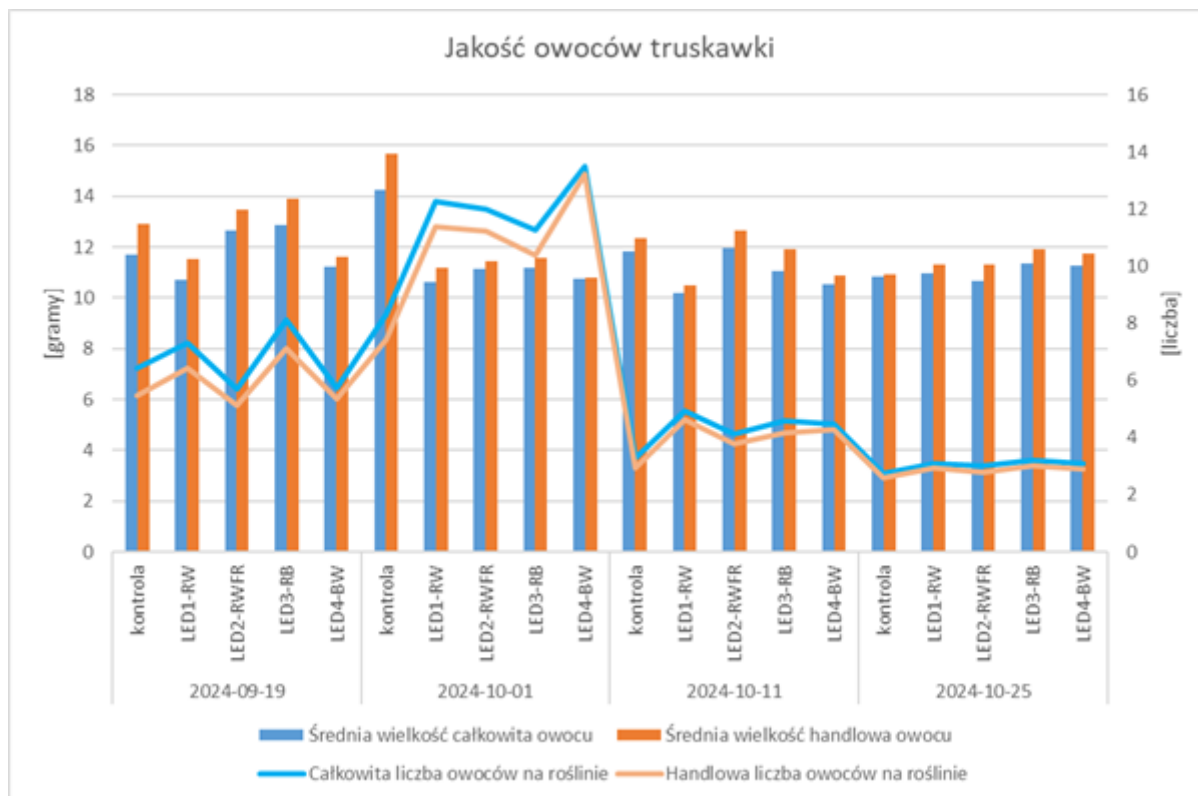
Rysunek 63. Plon owoców (waga oraz liczba) w podziale na terminy i zastosowane oświetlenie

Średnia wielkość owoców: Najwyższe wartości odnotowano w wariantach LED2-RWFR i LED3-RB, gdzie średnia masa owocu handlowego była wyższa niż w kontroli.

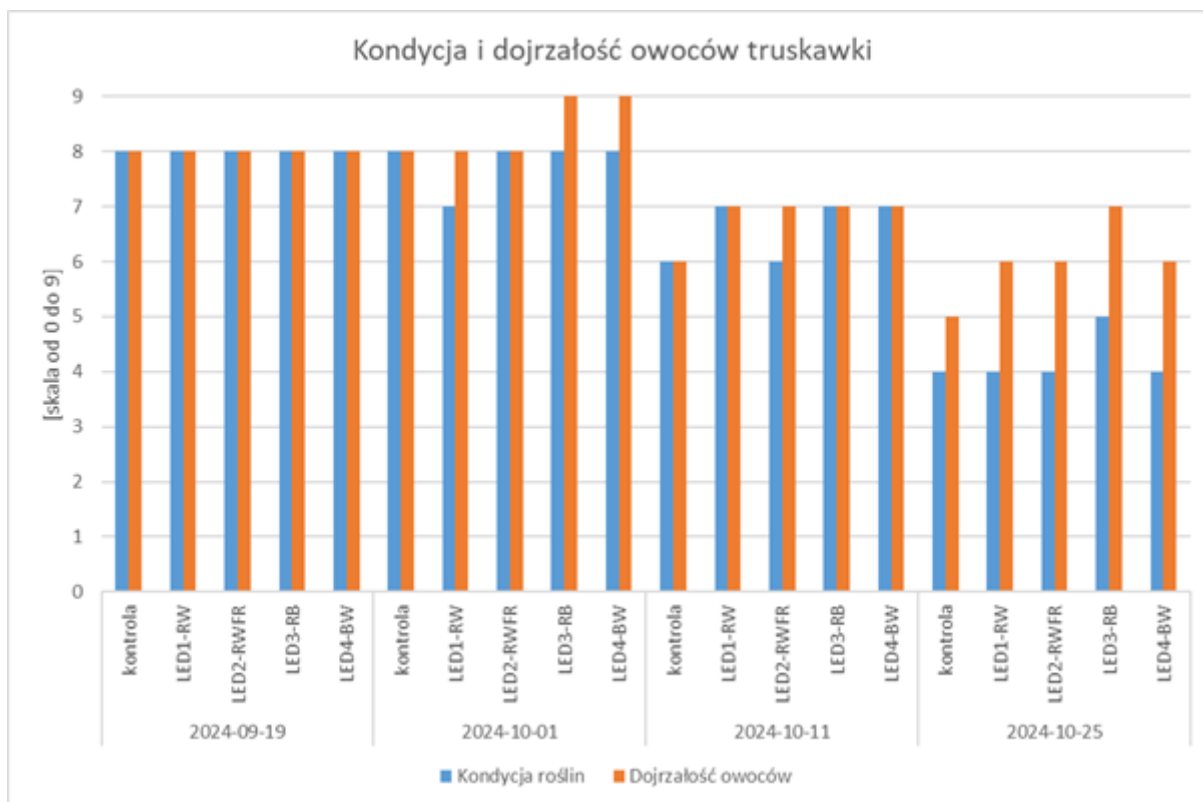
Kondycja roślin: W pierwszych dwóch pomiarach kondycja roślin była porównywalna we wszystkich wariantach. W końcowej fazie eksperymentu (25.10) nastąpiło pogorszenie kondycji roślin, szczególnie w kontroli.



Dojrzałość owoców: Owoce dojrzewały równomiernie we wszystkich wariantach, jednak w kontrolnych warunkach proces dojrzewania mógł być nieco opóźniony.



Rysunek 64. Jakość owoców (średnia wielkość owocu oraz średnia liczba owoców na roślinie) w podziale na terminy i zastosowane oświetlenie



Rysunek 65. Kondycja i dojrzałość owoców (skala od 0 do 9) w podziale na terminy i zastosowane oświetlenie

Porównując zmienność w obrębie cech a pomiędzy terminami możemy zaobserwować, iż najniższą zmienność odnotowano we wczesnych terminach pomiaru (19.09 i 01.10), co sugeruje stabilne warunki wzrostu. W terminach 11.10 i 25.10 zaobserwowano wzrost zmienności, co może wynikać z różnic w reakcjach roślin na zaabsorbowane światło doświetlania LED oraz postępującego wyczerpywania zasobów roślin w okresie jesiennym w którym temperatura atmosferyczna i tym samym temperatura uprawy była coraz niższa. Dodatkowo w okresach nocnych na zewnątrz tunelu foliowego, gdzie była przeprowadzona uprawa często pojawiała się blisko 0°C. Kondycja roślin wykazywała najmniejszą zmienność w całym okresie eksperymentu.

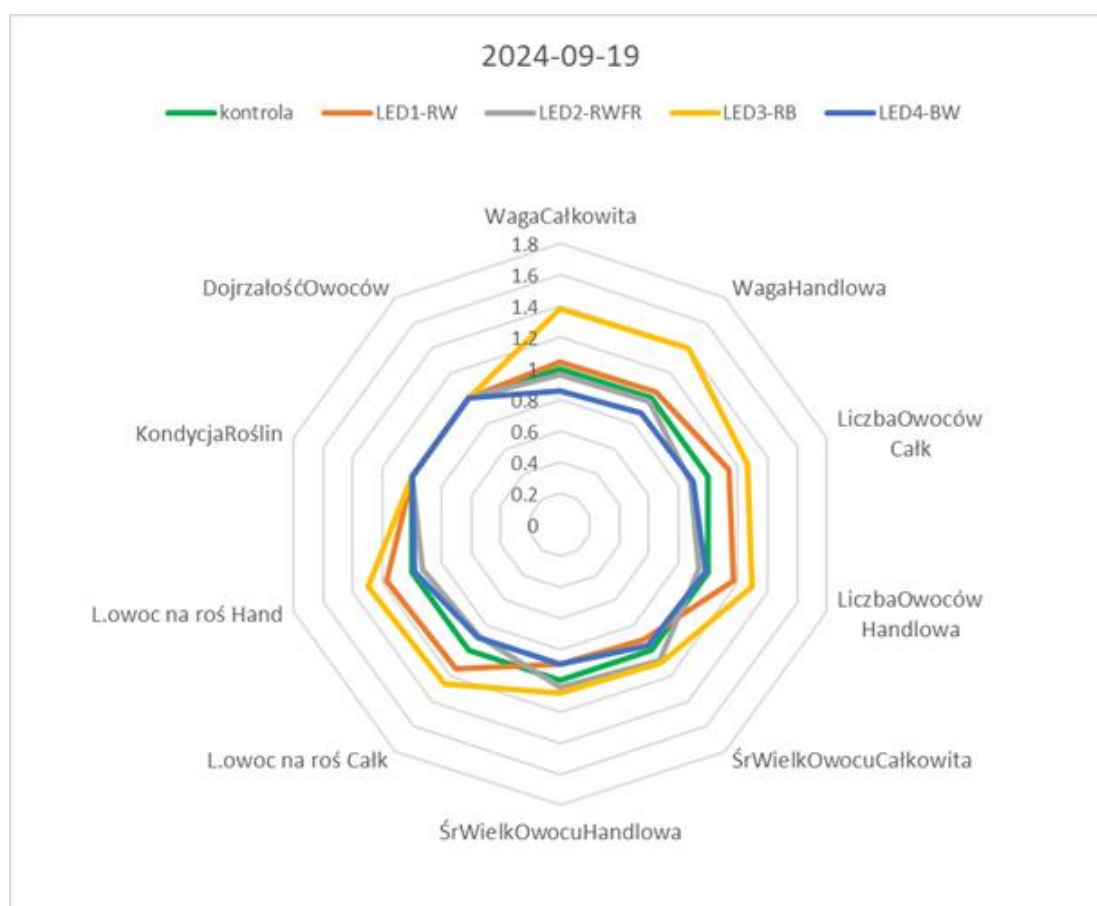
Podsumowując, możemy wyciągnąć następujące wnioski:

- Oświetlenie LED miało istotny wpływ na wzrost masy i liczby owoców truskawki – szczególnie korzystne okazały się warianty LED1-RW oraz LED4-BW.
- Różnice w średniej wielkości owoców wskazują na możliwość optymalizacji spektrum światła – wariant LED2-RWFR wykazał najwyższe wartości tego parametru.
- Największa stabilność cech została zachowana w pierwszych fazach wzrostu, natomiast w późniejszych etapach warunki eksperymentalne wpłynęły na większe zróżnicowanie wyników.

- Stan kondycji roślin pozostawał na względnie stałym poziomie, lecz pod koniec eksperymentu zaobserwowano jego pogorszenie, szczególnie w kontroli, co sugeruje potrzebę dalszych badań nad długoterminowym wpływem oświetlenia LED.
- Analiza różnic badanych cech względem kontroli w poszczególnych okresach pomiaru
- Wyniki badań wskazują, że wpływ oświetlenia LED na parametry jakościowe truskawek nie był jednakowy w każdym okresie pomiaru. Różnice względem kontroli zmieniały się w czasie, co sugeruje złożoną interakcję między warunkami uprawy, fizjologią roślin oraz specyfiką poszczególnych wariantów oświetleniowych.

Pierwszy pomiar (19.09)

Na tym etapie różnice względem kontroli były stosunkowo niewielkie. Wartości masy owoców i ich liczby w większości wariantów były zbliżone do kontroli, co wskazuje, że wczesny etap owocowania nie był jeszcze istotnie zależny od zastosowanego oświetlenia. Kondycja roślin pozostawała wyrównana, co sugeruje, że wpływ LED na wzrost roślin dopiero zaczynał się ujawniać.



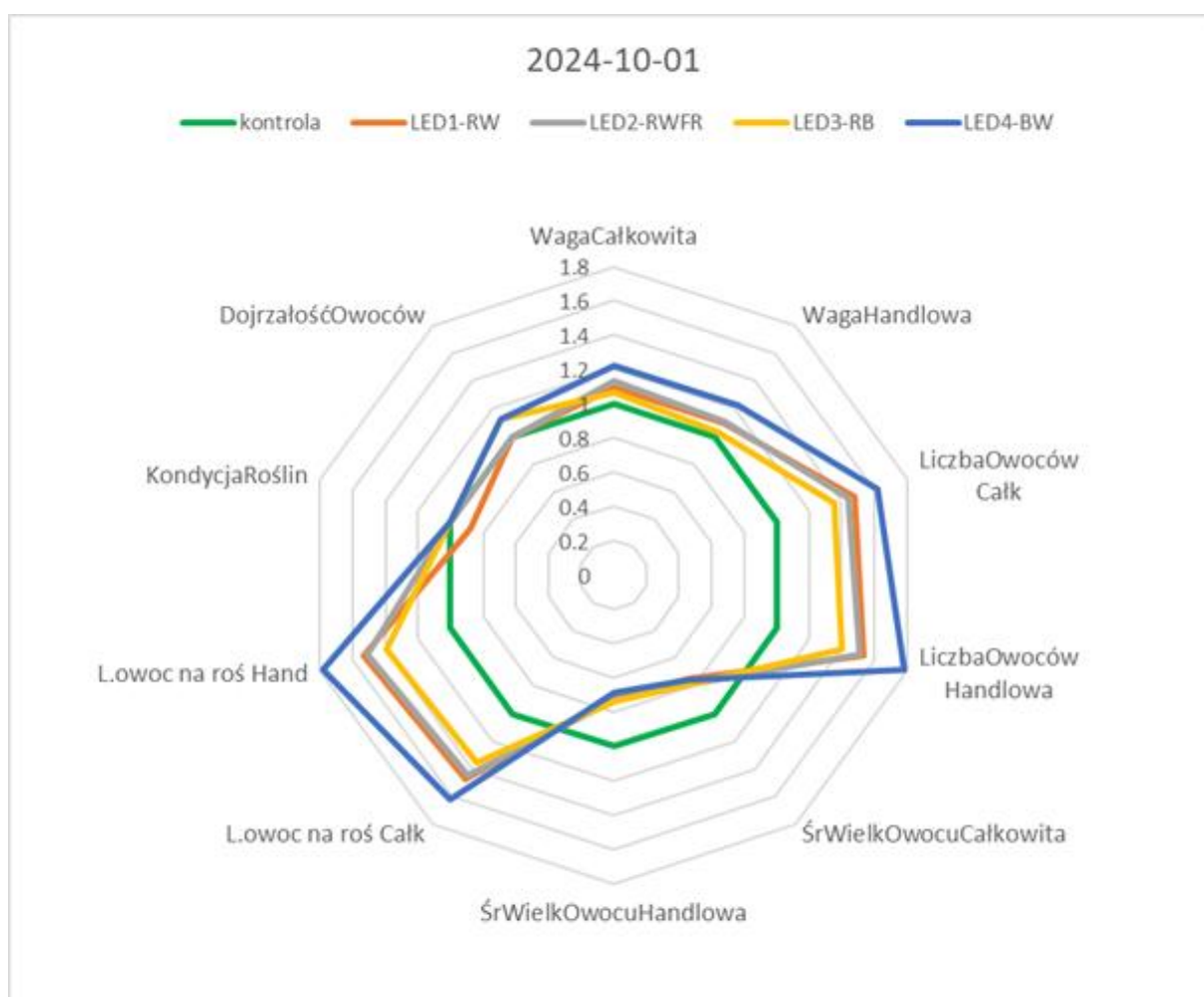
Rysunek 66. Wskaźniki ilorazu wartości plonu i jakości truskawek doświetlanych do kontroli dla terminu 2024-09-19 w podziale na zastosowane oświetlenie



Wniosek: W pierwszym pomiarze różnice między wariantami były niewielkie, co może wynikać z początkowego stadium rozwoju owoców i braku znaczącego efektu oświetlenia w krótkim okresie jego stosowania.

Drugi pomiar (01.10)

W tym terminie zaobserwowano pierwsze istotne różnice w masie owoców i ich liczbie. Warianty LED4-BW i LED1-RW wykazały znaczący wzrost plonu względem kontroli, co sugeruje, że wpływ oświetlenia zaczyna się uwidaczniać po dłuższym okresie działania. Kondycja roślin pozostawała dobra we wszystkich wariantach. Średnia wielkość owoców wykazywała niewielkie różnice, ale ich liczba wyraźnie wzrosła w wariantach z dodatkowym oświetleniem.



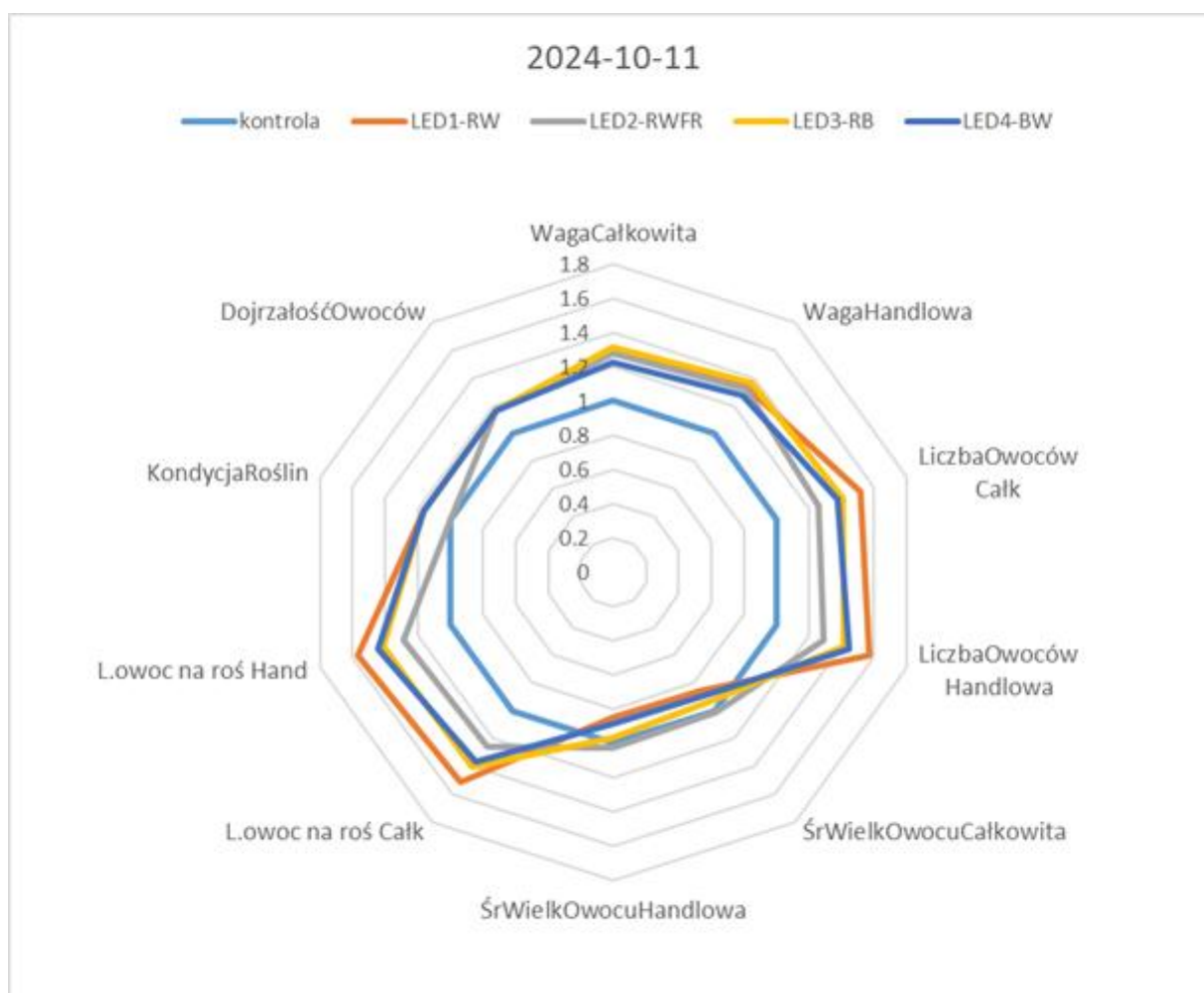
Rysunek 67. Wskaźniki ilorazu wartości plonu i jakości truskawek doświetlanych do kontroli dla terminu 2024-10-01 w podziale na zastosowane oświetlenie

Wniosek: W drugim pomiarze uwidocznił się wpływ oświetlenia LED na liczbę i masę owoców, co sugeruje, że po ok. 4 tygodniach stosowania doświetlenia różnice stają się bardziej zauważalne.



Trzeci pomiar (11.10)

Różnice względem kontroli były najwyraźniejsze. Masa owoców i ich liczba w wariantach LED znacznie przewyższały wartości kontrolne, co wskazuje na szczytowy efekt zastosowanego oświetlenia. Wariant LED2-RWFR wyróżniał się pod względem średniej wielkości owoców. Kondycja roślin nadal pozostawała na stabilnym poziomie, jednak pojawiły się pierwsze oznaki zmęczenia w wariacie kontrolnym prawdopodobnie wynikające z dużej różnicy oświetlenia. Naturalna długość dnia wynosiła około 11 godzin a rośliny doświetlane miały stałą długość dnia wynoszącą 15 godzin.



Rysunek 68. Wskaźniki ilorazu wartości plonu i jakości truskawek doświetlanych do kontroli dla terminu 2024-10-11 w podziale na zastosowane oświetlenie

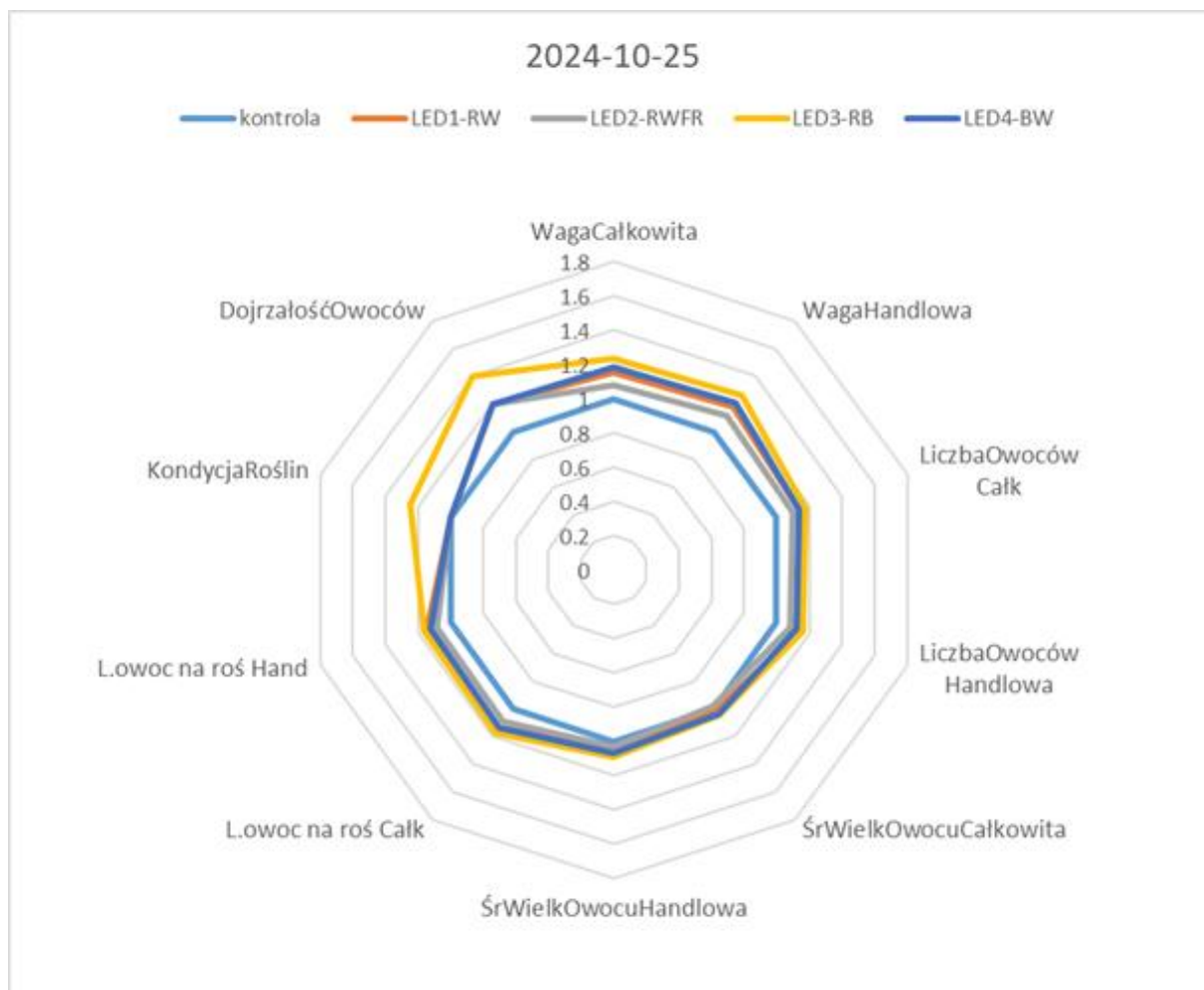
Wniosek: W trzecim pomiarze zaobserwowano maksymalne różnice względem kontroli, co sugeruje, że wpływ oświetlenia LED osiąga swoje największe znaczenie w pierwszej dekadzie października.

Czwarty pomiar (25.10)

Różnice względem kontroli zmniejszyły się w stosunku do poprzedniego pomiaru. Kondycja roślin uległa pogorszeniu, szczególnie w kontroli, ale także w wariantach LED, co może



wskazywać na wyczerpywanie się zasobów roślin w końcowej fazie uprawy i dość niskie temperatury uprawy. Masa owoców i ich liczba wciąż były wyższe w wariantach LED, ale tempo wzrostu różnic zwolniło. Średnia wielkość owoców była bardziej zróżnicowana, co może wynikać z mniejszej jednorodności dojrzewających owoców pod koniec sezonu.



Rysunek 69. Wskaźniki ilorazu wartości plonu i jakości truskawek doświetlanych do kontroli dla terminu 2024-10-25 w podziale na zastosowane oświetlenie

Wniosek: W ostatnim pomiarze różnice względem kontroli uległy redukcji, co sugeruje, że wpływ oświetlenia LED jest najbardziej efektywny w środkowej fazie doświetlania, natomiast w końcowej fazie dochodzi do wyrównania parametrów z uwagi na zmęczenie roślin i ich naturalny cykl rozwojowy.

5.4.2. Analiza statystyczna wyników oceny konsumenckiej truskawek uprawianych pod wpływem różnych wariantów doświetlania LED

Badanie miało na celu ocenę wpływu czterech różnych wariantów oświetlenia LED na jakość sensoryczną truskawek w porównaniu do owoców z uprawy kontrolnej, niedoświetlanej. Panel



konsumencki przeprowadził ocenę w skali od 0 do 9, gdzie wartość 5 odpowiadała jakości kontrolnej, wartości poniżej wskazywały na obniżenie jakości, a powyżej – na jej poprawę.

Aromat truskawkowy

Wszystkie warianty LED, z wyjątkiem LED3-RB (4,89), uzyskały oceny wyższe od kontroli (5,00), co sugeruje nieznaczłą poprawę intensywności aromatu w wariantach LED1-RW (5,11), LED2-RWFR (5,26) i LED4-BW (5,11). Wskaźnik ilorazu średnich wartości wskazuje, że w wariantach LED1-RW i LED4-BW nastąpił wzrost o 2,1%, a w LED2-RWFR o 5,3% względem kontroli. Natomiast LED3-RB wykazał spadek o 2,1%. Różnice te są jednak marginalne, co wskazuje na ograniczony wpływ doświetlania na tę cechę.

Nietypowy aromat

We wszystkich wariantach, z wyjątkiem LED4-BW (0,11), wartość wynosiła 0, co oznacza brak wykrycia niepożądanych nut zapachowych. Nieznacznie podwyższona wartość dla LED4-BW może sugerować obecność słabo wyczuwalnych, nietypowych nut aromatycznych, lecz ich znaczenie praktyczne wydaje się marginalne.

Odporność skórki na pocieranie

Wszystkie warianty LED przewyższały kontrolę (5,00), przy czym najwyższą ocenę uzyskały owoce z doświetlania LED3-RB (5,53), a najniższą LED4-BW (5,32). Wskaźnik ilorazu wskazuje na wzrost odporności skóry o 6,3%–10,5% w wariantach LED w stosunku do kontroli. Różnice są niewielkie, jednak wskazują na pewien pozytywny wpływ doświetlania na wytrzymałość skórki, szczególnie w przypadku LED3-RB.

Słodki smak

Najwyższą wartość uzyskano dla wariantu LED3-RB (6,68), co oznacza istotny wzrost w porównaniu do kontroli (5,00). Również LED4-BW (6,00) oraz LED1-RW (5,87) przewyższały próbkę kontrolną, natomiast LED2-RWFR (5,29) nie wykazał znaczącej poprawy. Wskaźnik ilorazu wskazuje na wzrost słodkości od 5,8% (LED2-RWFR) do 33,7% (LED3-RB), co sugeruje istotny wpływ spektrum światła na percepcję słodkiego smaku. Wskazuje to na możliwość poprawy percepcji słodczy pod wpływem określonych spektrów światła.

Kwaśny smak

Warianty LED wykazały zróżnicowany wpływ na kwasowość truskawek. Najniższy wynik (4,68) uzyskano dla LED3-RB, co oznacza obniżenie poziomu kwasowości w porównaniu do kontroli (5,00). Wariant LED2-RWFR (5,55) wykazał najwyższą wartość, a LED1-RW i LED4-BW uzyskały wyniki zbliżone do kontroli. Wskaźnik ilorazu wskazuje na wartości w zakresie 0,94–1,11, co oznacza, że LED3-RB obniżył kwasowość o 6,3%, a LED2-RWFR podniósł ją o



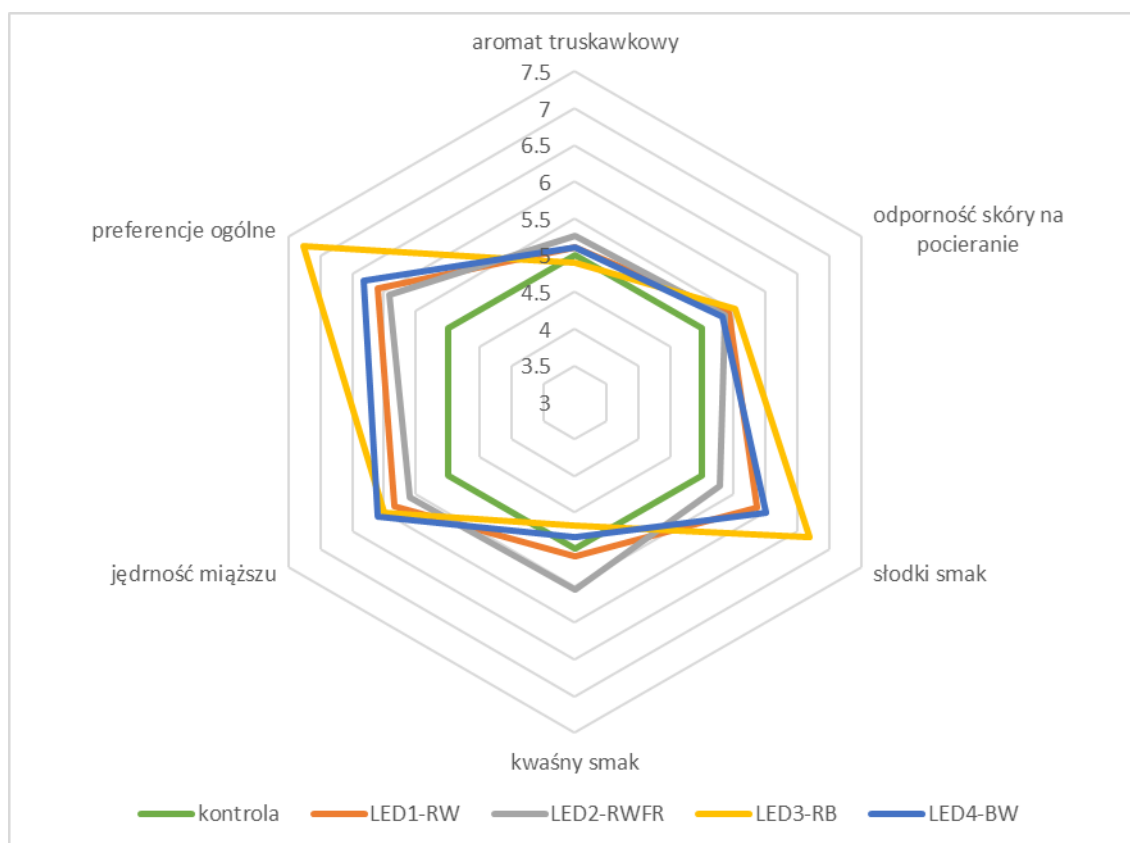
11,1%. LED3-RB sprzyja redukcji kwasowości, co może dodatkowo wzmacniać percepcję słodkiego smaku.

Jędrność miąższu

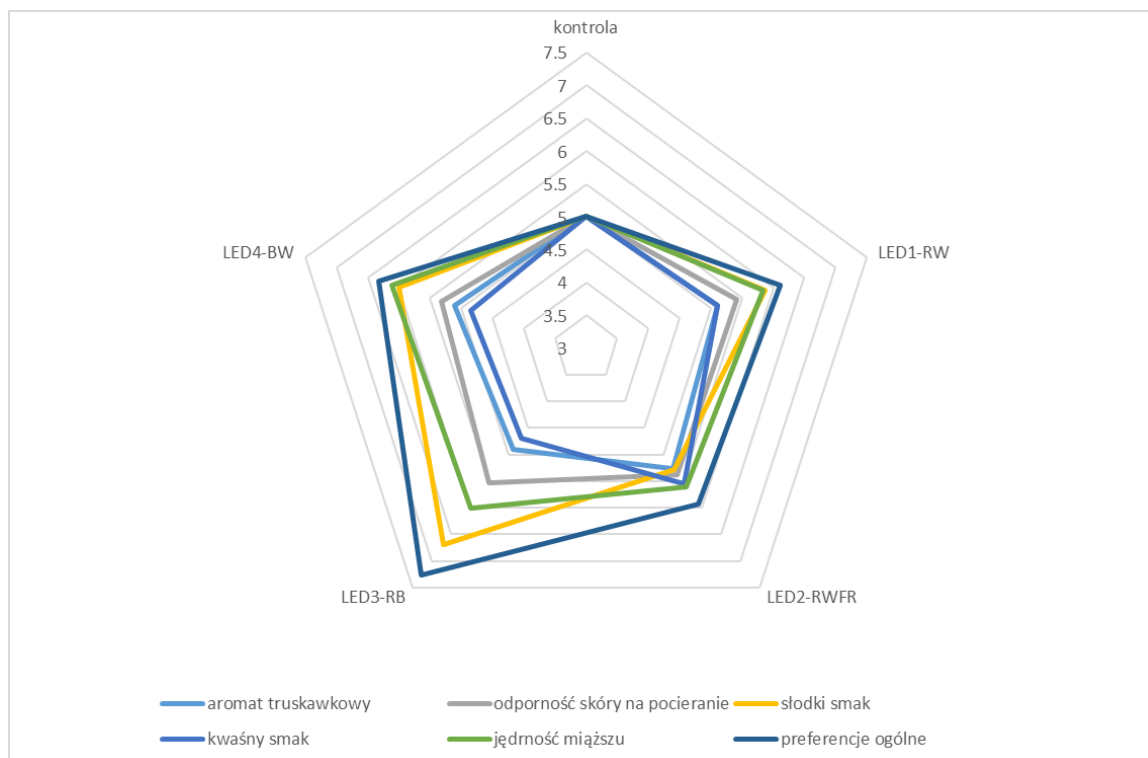
Wszystkie warianty LED poprawiły jędrność owoców względem kontroli (5,00). Najwyższy wynik uzyskano dla LED4-BW (6,11), a najniższy dla LED2-RWFR (5,61). Wskaźnik ilorazu wykazał wzrost jędrności od 12,1% (LED4-BW) do 20% (LED3-RB). Wyniki te sugerują, że doświetlanie LED, niezależnie od zastosowanego spektrum, wpływa pozytywnie na teksturę owoców.

Preferencje ogólne

Najwyższą ocenę uzyskały truskawki z wariantu LED3-RB (7,26), wskazując na istotnie wyższą akceptację konsumencką w porównaniu do kontroli (5,00). Wszystkie pozostałe warianty również przewyższały kontrolę, przy czym LED4-BW (6,32) i LED1-RW (6,11) uzyskały relatywnie wysokie oceny. Wskaźnik ilorazu wskazuje na wzrost preferencji od 18,4% (LED2-RWFR) do 45,3% (LED3-RB). Tym samym LED3-RB miał zdecydowanie największy wpływ na pozytywną ocenę konsumencką truskawek.



Rysunek 70. Średnie wartości oceny konsumenckiej cech (z pominięciem nietypowego aromatu, gdzie średnia wartość cechy była zbliżona do 0 i wynosiła 0,02) sensorycznych owoców truskawki w skali od 0 do 9.



Rysunek 71. Średnie wartości oceny konsumenckiej badanych układów doświadczeń w rozbiciu na cechy (z pominięciem nietypowego aromatu, gdzie wartość dla wszystkich układów wynosiła 0 z wyjątkiem układu LED4-BW, gdzie średnia wartość wynosiła 0,11) sensorycznych owoców truskawki w skali od 0 do 9.

Tabela 7. Wartości ilorazów, średnich wartości oceny sensorycznej ocenianych cech*

Etykiety wierszy	aromat truskawkowy	odporność skóry na pocieranie	słodki smak	kwaśny smak	jędrność miąższu	preferencje ogólne
kontrola	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
LED1-RW	1,02	1,08	1,17	1,02	1,17	1,22
LED2-RWFR	1,05	1,07	1,06	1,11	1,12	1,18
LED3-RB	0,98	1,11	1,34	0,94	1,20	1,45
LED4-BW	1,02	1,06	1,20	0,97	1,22	1,26
średnia końcowa	1,02	1,07	1,15	1,01	1,14	1,22

* wskaźnik ilorazu dla cechy nietypowy aromat, nie mógł być policzony ze względu na wartości kontroli równej 0. Za wyjątkiem LED4-BW (wartość oceny równa 0,11), wszystkie układy doświadczeń ocenę tę miały na poziomie równym 0.

Wnioski

Wpływ doświetlania LED na jakość sensoryczną truskawek był istotny, szczególnie w zakresie słodkiego smaku, jędrności miąższu oraz preferencji ogólnych.



Wariant LED3-RB charakteryzował się najwyższymi wynikami w zakresie słodkiego smaku oraz preferencji konsumenckich, co sugeruje, że spektrum RB (Red-Blue) może być optymalne dla poprawy walorów sensorycznych truskawek.

Zmniejszenie kwasowości w wariancie LED3-RB mogło przyczynić się do zwiększonego postrzegania słodczy, co mogło mieć wpływ na wysokie oceny preferencji konsumenckich.

Odporność skórki na pocieranie i jędrność miąższu poprawiły się we wszystkich wariantach doświetlanych, co może sugerować korzystny wpływ LED na strukturę owoców.

Nie wykazano istotnych różnic w intensywności aromatu truskawkowego pomiędzy wariantami LED a kontrolą, co sugeruje, że oświetlenie nie miało znaczącego wpływu na tę cechę.

Nietypowy aromat nie występował w większości wariantów, co potwierdza, że doświetlanie LED nie generowało negatywnych skutków w zakresie niepożądanych zmian zapachowych.

W oparciu o uzyskane wyniki można wnioskować, że zastosowanie oświetlenia LED, szczególnie w spektrum Red-Blue (LED3-RB), może być korzystnym rozwiązaniem w celu poprawy cech sensorycznych truskawek, zwłaszcza w zakresie percepcji słodczy i akceptacji konsumenckiej.

5.4.3. Analiza chemiczna zawartości makro i mikro elementów oraz substancji chemicznych w owocach truskawki

Owoce truskawki, po zbiorze oraz przeprowadzeniu oceny plonu, jego jakości i preferencji konsumenckich, zostały przekazane do akredytowanego laboratorium celem oznaczenia zawartości wybranych związków chemicznych i pierwiastków. Analizowano wpływ zastosowanych wariantów oświetlenia LED, porównując wyniki z wartościami uzyskanymi dla próby kontrolnej. Próbą kontrolną były owoce zebrane z roślin niedoświetlanych, głównym aspektem tego czynnika był coraz krótszy dzień. Owoce zebrano i przeanalizowano w dniu 2 października.

Skład związków chemicznych w owocach truskawki:

Sacharoza

Najwyższą zawartość sacharozy zaobserwowano w wariancie LED4 – BW (10,4 g), co stanowi 22,9% więcej niż w kontroli (8,46 g). Podobny poziom osiągnięto również w LED2 – RWFR i LED3 – RB (po 10,3 g, wzrost o 21,7%). Najniższą zawartość, poza kontrolą, uzyskano przy LED1 – RW (9,17 g, wzrost o 8,4%). Wyniki te wskazują, że dodatek niebieskiego światła (BW) i dalekiej czerwieni (RWFR) może znacząco wspierać akumulację sacharozy w owocach, co pozytywnie wpływa na ich smakowość i atrakcyjność handlową.



Glukoza

Najwyższy poziom glukozy stwierdzono w LED4 – BW (26,1 g), co oznacza wzrost o 8,3% względem kontroli. Wariant LED3 – RB również wykazywał wyższy poziom (25,4 g, +5,4%). Najniższą zawartość po kontroli (24,1 g) odnotowano przy LED1 – RW (24,5 g, wzrost o 1,7%). Choć zmienność tej cechy była mniejsza niż w przypadku sacharozy, widoczne jest, że światło niebieskie i jego kombinacje wpływają pozytywnie na akumulację glukozy.

Fruktoza

Najwyższą zawartość fruktozy również uzyskano w LED4 – BW (29,6 g), co oznacza wzrost o 10% w porównaniu z kontrolą (26,9 g). LED3 – RB (28,6 g) i LED2 – RWFR (28,0 g) również przewyższały poziom kontrolny o odpowiednio 6,3% i 4,1%. LED1 – RW wykazał najmniejszy wzrost (27,5 g, +2,2%). Tak jak w przypadku glukozy, światło BW oraz RB sprzyjało intensywniejszemu odkładaniu cukrów prostych, co może zwiększać słodycz i wartość sensoryczną owoców.

Sorbitol

Wartości sorbitolu były śladowe co uniemożliwiło precyzyjną ocenę. Dla wszystkich grup doświadczalnych akredytowane laboratorium oznaczyło wartość sorbitolu < 1 . Na wykresach i porównaniach związek ten nie jest dalej porównywany.

Kwas L-askorbinowy (witamina C)

Najwyższą zawartość kwasu L-askorbinowego stwierdzono w LED3 – RB (54,3 mg/100 g), co stanowi 6,3% więcej niż w kontroli (51,1 mg/100 g). LED2 – RWFR (51,8 mg) i LED4 – BW (53,6 mg) także wykazały nieco wyższe wartości (odpowiednio +1,4% i +4,9%). Jedynie LED1 – RW zanotował spadek o 3,7% względem kontroli. Zatem jedynie wariant czerwono-niebieski (RW) obniżał zawartość witaminy C, natomiast światło niebieskie i czerwono-niebiesko-podczerwone miały tendencję stymulującą.

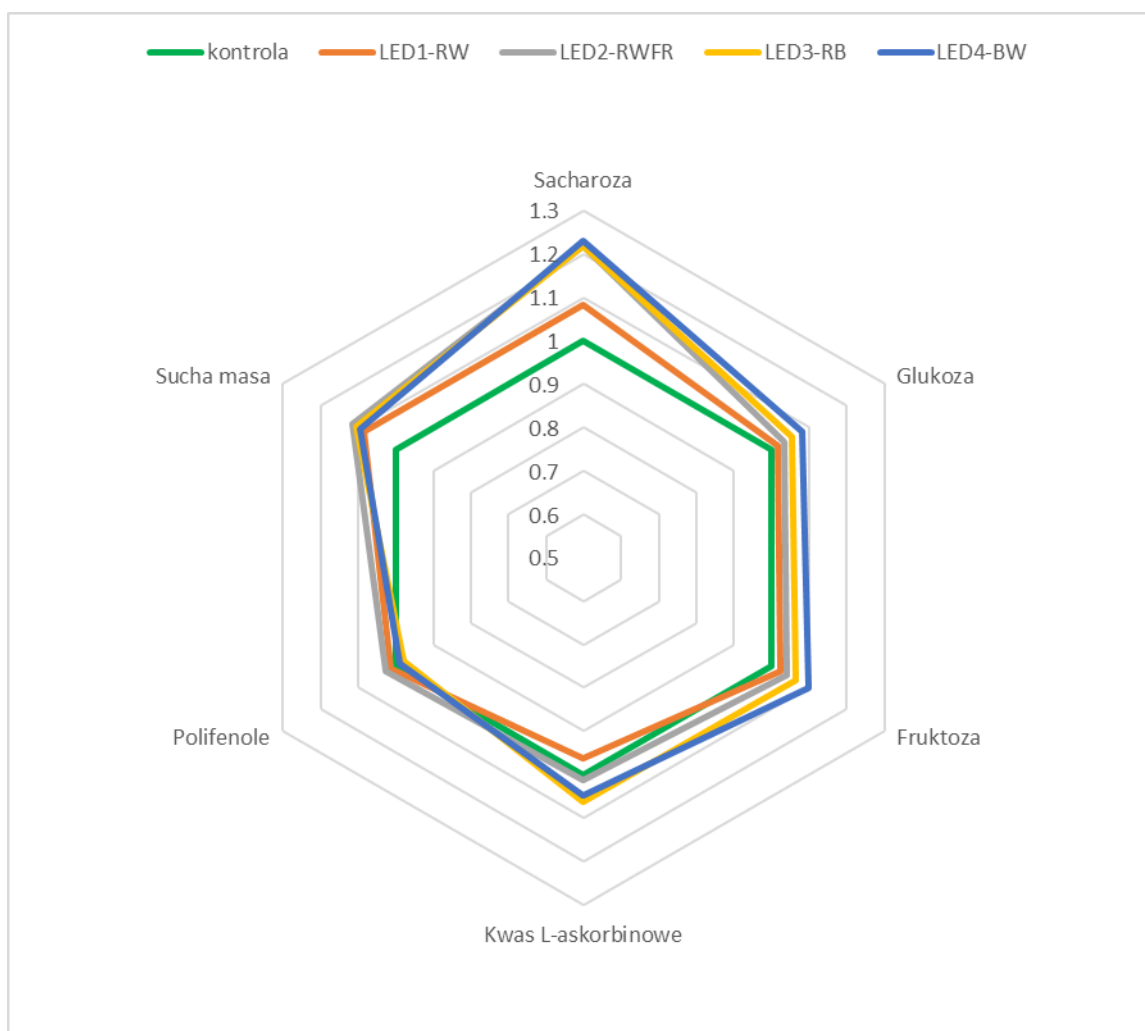
Polifenole ogółem

Największe stężenie polifenoli wystąpiło przy LED2 – RWFR (248 mg/100 g), co oznacza 2,5% wzrost względem kontroli (242 mg). LED1 – RW oraz LED4 – BW wykazywały podobne, nieco wyższe wartości (po około +1–1,2%). Najniższy poziom był w LED3 – RB (237 mg), co oznacza spadek o 2,1%. Choć różnice są niewielkie, można zauważyć, że podczerwień nieco wspierała syntezę polifenoli, natomiast RB działał odwrotnie. Związki te wpływają na właściwości antyoksydacyjne i zdrowotne owoców.

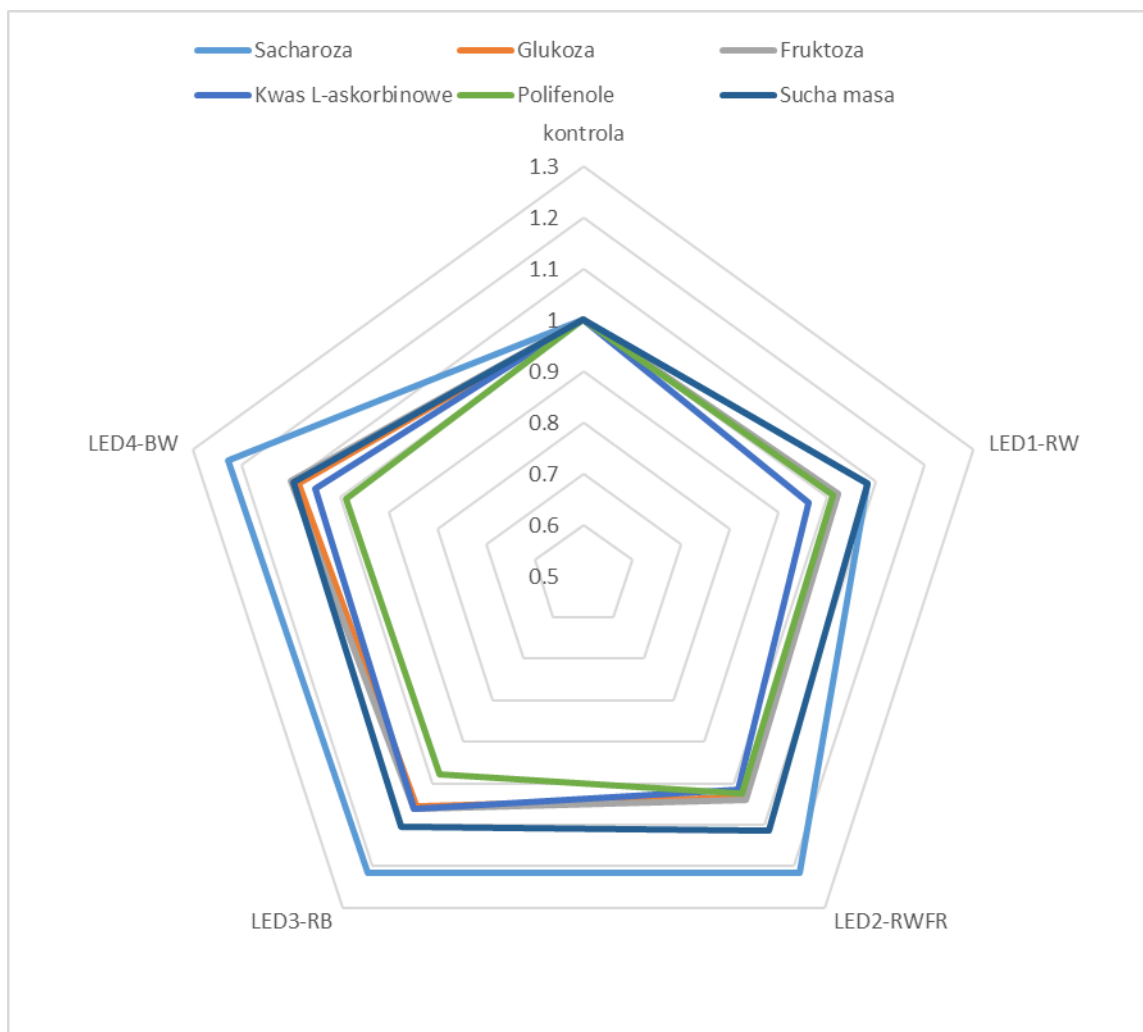
Sucha masa



Najwyższy poziom suchej masy uzyskano w LED2 – RWFR (10,7%), co stanowi 11,5% więcej niż w kontroli (9,6%). Niewiele niższe wartości miały LED3 – RB (10,6%) i LED4 – BW (10,5%), odpowiednio +10,4% i +9,4%. LED1 – RW osiągnął 10,4%, co i tak stanowiło wzrost o 8,3%. Wszystkie warianty LED pozytywnie wpłynęły na suchą masę, co może świadczyć o intensyfikacji metabolizmu i większym zagęszczeniu składników odżywczych w owocach.



Rysunek 72. Wartości ilorazów zawartości substancji chemicznych w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1) dla owoców truskawki



Rysunek 73. Wartości ilorazów zawartości substancji chemicznych w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1) dla owoców truskawki

Podsumowując światło LED wpłynęło korzystnie na większość parametrów chemicznych owoców truskawki. Największe zmiany dotyczyły zawartości sacharozy oraz suchej masy — cech istotnych dla jakości konsumenckiej i trwałości owoców. Spektrum LED4 – BW (światło białe z niebieskim) najczęściej dawało najwyższe wartości cukrów prostych i witaminy C, podczas gdy LED2 – RWFR (czerwono-niebieskie z podczerwienią) wyróżniało się korzystnym wpływem na polifenole i suchą masę. Z kolei LED1 – RW był najmniej skuteczny w zwiększaniu zawartości bioaktywnych składników, a w przypadku witaminy C nawet ją obniżał. Wyniki te sugerują, że manipulacja składem spektralnym światła może być skuteczną strategią w optymalizacji wartości odżywczej owoców truskawki, przy czym najlepsze efekty osiągane są przy wykorzystaniu szerszego spektrum obejmującego fale niebieskie i czerwone, z dodatkiem FR lub białego światła.

Skład makro i mikroelementów w owocach truskawki:



Analiza zawartości wybranych **pierwiastków chemicznych** w owocach truskawki w zależności od zastosowanego oświetlenia LED, z uwzględnieniem odniesienia do wartości w kontroli. Analiza opiera się na wartościach bezwzględnych, względnych (w procentach).

Azot (N)

Zawartość azotu była zbliżona we wszystkich wariantach LED (0,10%) i tylko nieznacznie wyższa niż w kontroli (0,09%), co daje wzrost o 11,1% w LED1, LED2 i LED3. Jedynie LED4 – BW nie wykazał różnicy. Chociaż różnice te są niewielkie, mogą wskazywać na stabilny wpływ oświetlenia na gospodarkę azotową owoców, bez istotnych zmian w akumulacji tego pierwiastka.

Fosfor (P)

Najwyższą zawartość fosforu uzyskano w LED1 – RW (290 mg), co oznacza 17,9% wzrost względem kontroli (246 mg). LED2 – RWFR również podniósł poziom fosforu (+13,8%). Najmniejsze różnice dotyczyły LED3 i LED4 (+6,5% i +6,9%). Podwyższony poziom P przy RW i RWFR może świadczyć o stymulacji przemian energetycznych (np. ATP) i procesów dojrzewania.

Potas (K)

Najwięcej potasu odnotowano w LED2 – RWFR (1845 mg), co stanowi 13,1% więcej niż w kontroli (1632 mg). LED1 – RW także wykazywał wyższy poziom (1819 mg, +11,5%). W LED3 i LED4 zawartość była nieco niższa niż w kontroli, odpowiednio -1,7% i -3,8%. Wyniki sugerują, że spektrum zawierające FR korzystnie wpływa na akumulację potasu, który pełni kluczową rolę w regulacji osmotycznej i jędrności owoców.

Magnez (Mg)

Największy przyrost magnezu stwierdzono w LED2 – RWFR (126 mg), co oznacza wzrost o 38,5% względem kontroli (91 mg). LED1 – RW również wykazał istotny wzrost (+33,0%). LED3 i LED4 miały nieco niższe wartości, ale nadal wyższe niż kontrola (+29,7% i +24,2%). Wyraźnie widoczny jest pozytywny wpływ światła LED na zawartość magnezu, który uczestniczy w fotosyntezie i syntezie chlorofilu.

Wapń (Ca)

Wapń osiągnął najwyższą wartość w LED4 – BW (144 mg), co daje 2,1% więcej niż w kontroli. Natomiast LED1 – RW i LED3 – RB wykazały niższe wartości (odpowiednio -14,9% i -2,1%). LED2 – RWFR pozostał na poziomie kontrolnym. Choć różnice są nieduże, widoczny jest wpływ światła białego na poprawę dostępności wapnia, ważnego dla jakości owoców (jędrność, odporność na uszkodzenia).



Bor (B)

Najwyższą zawartość boru uzyskano w LED2 – RWFR (1,05 mg), co stanowi wzrost o 11,7% względem kontroli. Podobne wartości wystąpiły także w pozostałych wariantach LED (wzrosty na poziomie 6–10%). Bor, choć mikroelementem, wpływa na prawidłowy transport cukrów i rozwój komórek, a jego wzrost może być korzystny dla jakości owoców.

Miedź (Cu)

Miedź w kontrolnych próbkach była <0,5 mg, a przy LED-ach wzrosła do maksymalnie 0,58 mg (LED3 i LED4). LED1 i LED2 miały poziomy odpowiednio 0,53 i 0,51 mg. Wzrost zawartości Cu przy oświetleniu LED może wiązać się z intensyfikacją reakcji enzymatycznych i obronnych (Cu jako składnik oksydaz i dysmutaz).

Żelazo (Fe)

Wariant LED1 – RW wykazał najwyższy poziom żelaza (4,73 mg), co oznacza wzrost o 175% względem kontroli (1,72 mg). LED2 i LED4 również wykazały ponad dwukrotnie wyższe wartości niż kontrola (+154,7% i +151,2%). Nawet LED3 osiągnął znaczący wzrost o 126,2%. Te wyniki potwierdzają, że światło LED silnie stymuluje akumulację Fe – kluczowego składnika enzymów oddechowych i fotosyntetycznych.

Mangan (Mn)

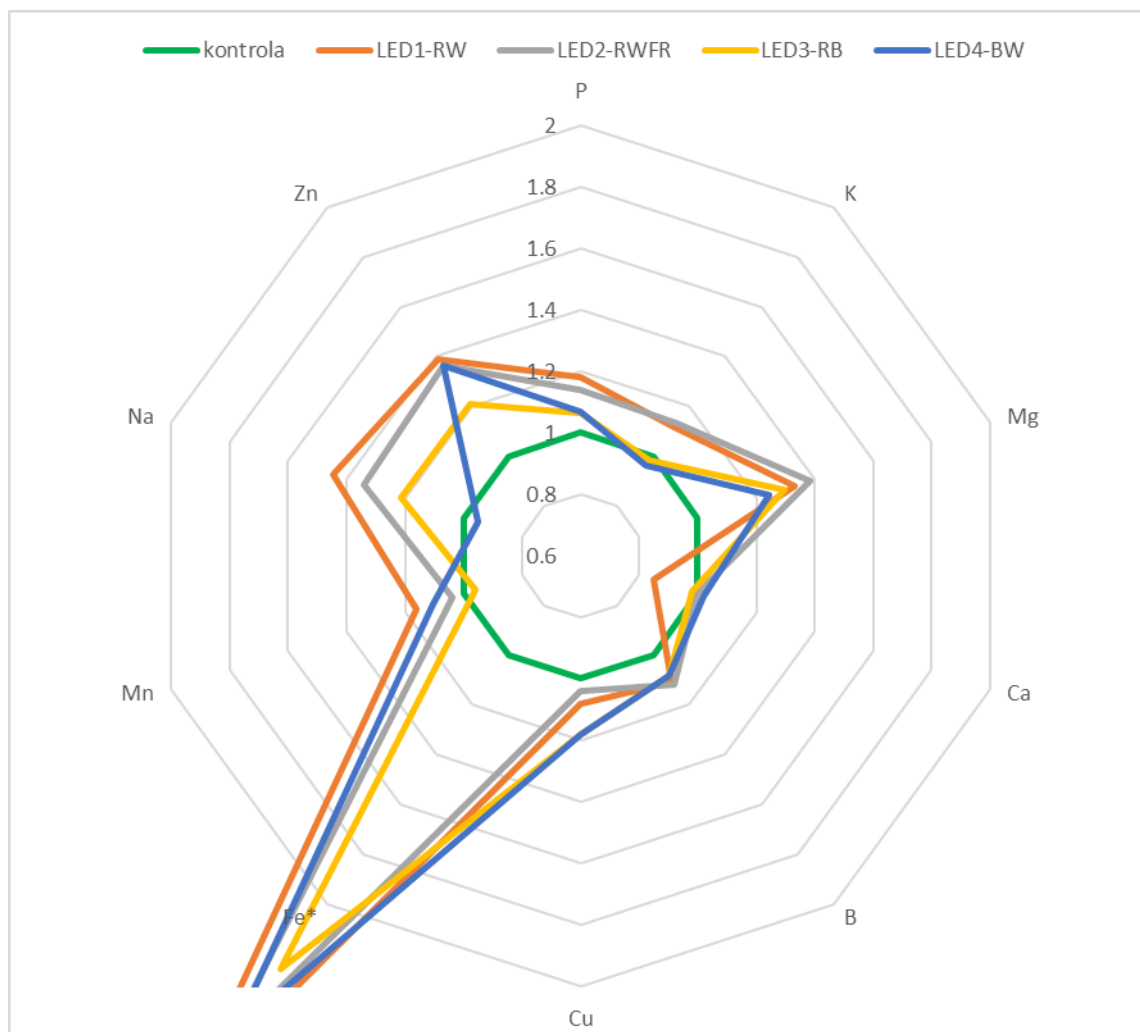
Najwyższa zawartość manganu była w LED1 – RW (3,46 mg), co oznacza wzrost o 16,1%. LED2 – RWFR i LED4 – BW również zwiększyły zawartość (+4% i +10,4%), natomiast LED3 wykazał nieznaczny spadek (-1,4%). Światło czerwone może wpływać na zwiększoną akumulację Mn, który jest kofaktorem wielu enzymów fotosyntetycznych i metabolicznych.

Sód (Na)

W LED1 – RW zawartość sodu wzrosła aż do 5,05 mg, czyli 44,7% więcej niż w kontroli (3,49 mg). LED2 i LED3 również wykazały wzrosty o 34,1% i 21,5%. Tylko LED4 – BW nieznacznie obniżył zawartość (-4,9%). Choć sód nie jest niezbędnym makroskładnikiem, jego obecność wpływa na równowagę osmotyczną – wzrosty mogą wskazywać na zwiększoną transpirację lub zmianę dostępności pierwiastków.

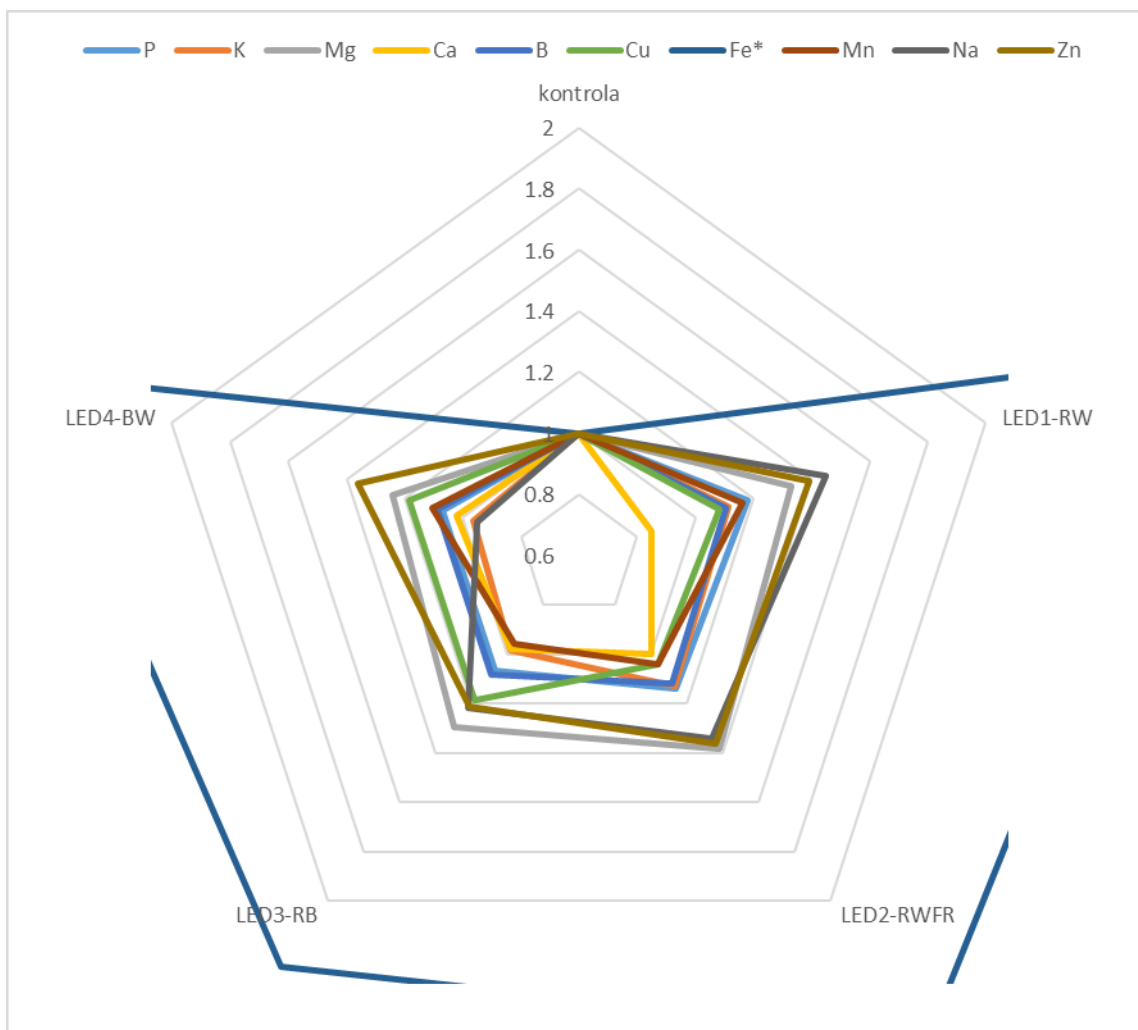
Cynk (Zn)

Najwyższą zawartość cynku wykazano w LED1 – RW (1,46 mg), co oznacza wzrost o 39,0%. LED2 i LED4 także wykazały wzrosty na poziomie około 36%. Cynk jako kofaktor wielu enzymów może mieć kluczowe znaczenie dla metabolizmu cukrów i wzrostu komórek.



Rysunek 74. Wartości ilorazów zawartości mikro i makro pierwiastków w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1) dla owoców truskawki

*LED1-RW (2.75), LED2-RWFR (2.547), LED3-RB (2.262), LED4-BW (2.512)



Rysunek 75. Wartości ilorazów zawartości mikro i makro pierwiastków w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1) dla owoców truskawki

*LED1-RW (2.75), LED2-RWFR (2.547), LED3-RB (2.262), LED4-BW (2.512)

Azotany (NO_3^-)

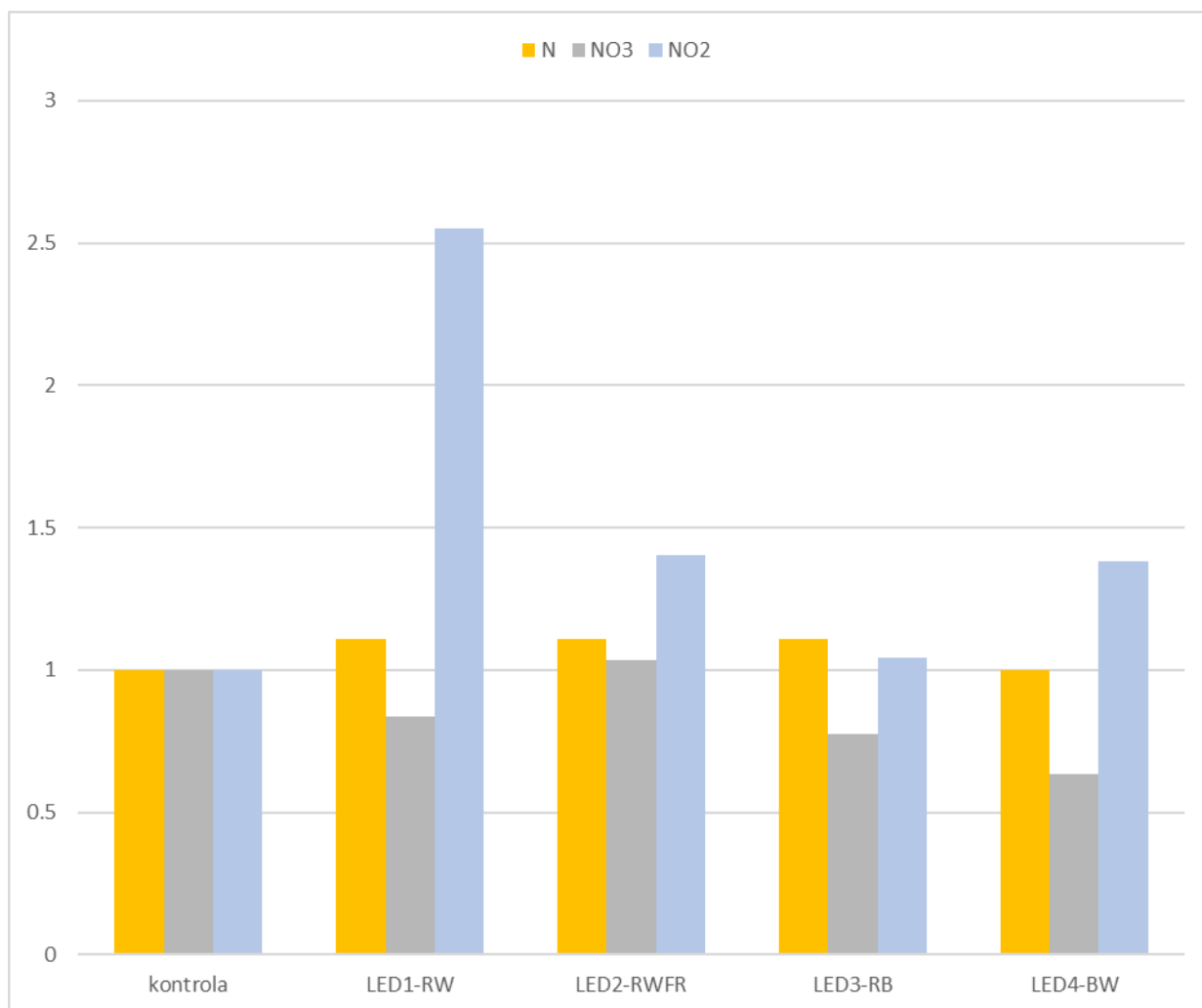
Największy spadek zawartości azotanów odnotowano w LED4 – BW (53,5 mg), co oznacza obniżenie o 36,5% względem kontroli (84,3 mg). LED3 – RB również zmniejszył ich poziom o 22,5%, a LED1 – RW o 16,3%. Tylko LED2 – RWFR nieznacznie zwiększył poziom (+3,6%). Obniżenie poziomu azotanów może wskazywać na intensywniejszy metabolizm azotu lub większe jego przekształcenie w formy organiczne, co jest pożądane z punktu widzenia bezpieczeństwa żywności.

Azotyny (NO_2^-)

Najwyższy poziom azotynów wykazano w LED1 – RW (1,2 mg), czyli ponad 150% więcej niż w kontroli (<0,5 mg). LED2 i LED4 również wykazały wzrosty, ale mniejsze (ok. 40%). LED3 nie wykazał obecności NO_2^- . Wyższe stężenia mogą wskazywać na częściowe zahamowanie



przekształcania azotanów w formy mniej reaktywne – istotny wniosek z punktu widzenia jakości żywności.



Rysunek 76. Wartości ilorazów zawartości azotanów, azotynów i azotu w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1) dla owoców truskawki

Podsumowując zastosowanie światła LED znacząco wpłynęło na zawartość wielu pierwiastków w owocach truskawki. Największe różnice odnotowano dla żelaza, cynku, sodu i azotanów, gdzie LED1 – RW i LED2 – RWFR wyróżniały się pozytywnym wpływem. LED2 – RWFR łączył korzystny wpływ na akumulację Fe, K, Mg i jednocześnie nie zwiększał nadmiernie poziomu azotynów. Z kolei LED4 – BW wykazał silny efekt w redukcji azotanów, co może być ważnym aspektem jakościowym. Światło czerwone (RW) choć sprzyjało wzrostowi wielu mikroelementów, wiązało się też z wyraźnym wzrostem azotynów, co może stanowić czynnik ryzyka. W zależności od celu uprawy (jakość sensoryczna, bezpieczeństwo żywności), można rekomendować różne warianty spektrum LED.



5.4.4. Analiza obrazów spektralnych owoców i liści truskawki

W ramach eksperymentu zebrano dane spektralne liści oraz owoców truskawki (*Fragaria × ananassa* Duchesne) uprawianej pod różnymi typami oświetlenia LED, różniącymi się składem widmowym oraz intensywnością promieniowania w kluczowych zakresach długości fal. Zastosowano cztery warianty naświetlania:

Dla każdego poletka doświadczalnego zebrano 30 widm odbiciowych owoców oraz 25 widm liści (pięć liści z pięciu oddzielnych roślin), przy zachowaniu identycznych warunków akwizycji danych.

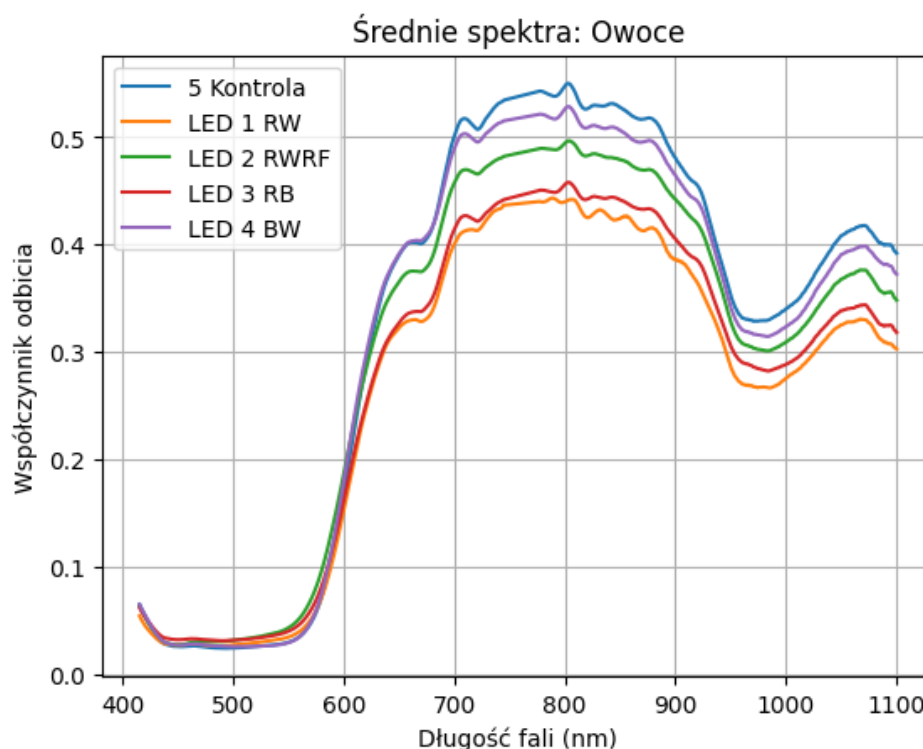
Największą jednorodność widm (**Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.**) wykazywały owoce pochodzące z uprawy oświetlanej światłem LED4 BW, natomiast największe zróżnicowanie spektralne obserwowano dla próbek z wariantów LED1 RW oraz LED3 RB. Świadczy to o zróżnicowanej reakcji roślin na skład widmowy światła w odniesieniu do procesów metabolicznych związanych z dojrzewaniem owoców.

Analiza spektralna obejmowała zakres od 400 do 1000 nm. Zakres 400–570 nm, odpowiadający barwom niebieskim i zielonym, cechował się wysoką absorpcją dla wszystkich próbek owoców, co jest typowe dla tkanek zawierających chlorofile i karotenoidy. Zakres 570–600 nm (żółcie i pomarańcze) oraz powyżej 600 nm do 700 nm (czerwień) wykazał większe zróżnicowanie między wariantami, co może być związane z poziomem dojrzałości owoców.

W spektrum widzialnym, obecność pików absorpcyjnego w okolicach 680 nm wskazuje na obecność chlorofilu – jego głębokość koreluje z niedojrzałością owocu. Im głębszy pik w tym zakresie, tym niższy stopień dojrzałości, co może służyć jako nieinwazyjny wskaźnik w ocenie fizjologicznego etapu rozwoju owocu. Uśrednienie spektrów dla danego poletka pozwala na szacunkową ocenę średniego poziomu dojrzałości plonu.

W zakresie bliskiej podczerwieni (700–900 nm) obserwuje się odbicie zależne od struktury komórkowej, jędrności, gęstości oraz grubości skórki, jednakże konkretne piki w tym obszarze wymagają dalszej interpretacji. Szerokie pasmo w zakresie 940–1060 nm jest związane z zawartością wody i cukrów prostych. Szczególnie:

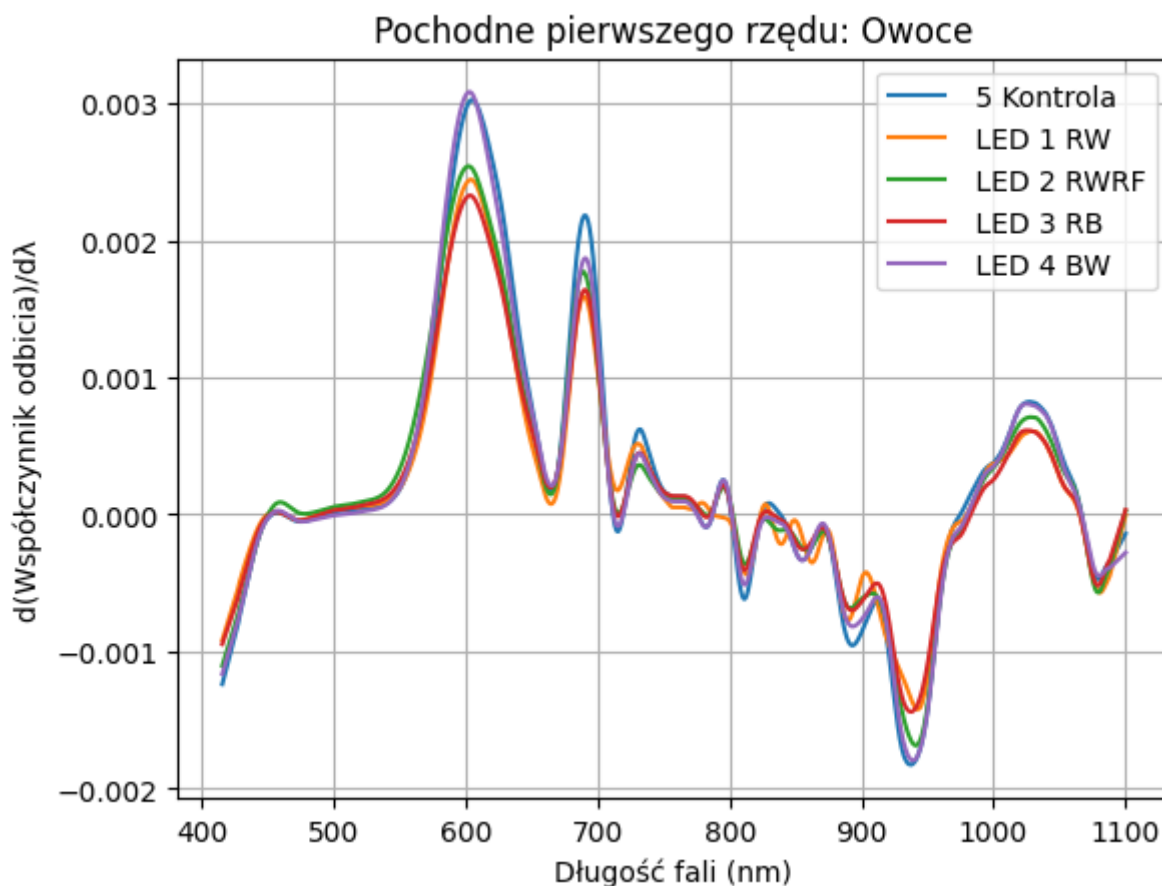
- około 970 nm występuje pasmo absorpcyjne związane z obecnością wody i grup hydroksylowych,
- zakres 1020–1060 nm odpowiada kombinacyjnym i overtone'owym pasmom cukrów prostych, takich jak glukoza i fruktoza.



Rysunek 77. Analiza uśrednionych obrazów spektralnych dla owoców truskawki

Na podstawie analizy przedstawionego wykresu (**Błąd! Nie można odnaleźć źródła o**
dwolania.) widoczne jest, że owoce z upraw kontrolnych oraz tych naświetlanych światłem
LED4 BW charakteryzowały się najintensywniejszym zabarwieniem czerwonym. Nieco niższą
intensywność koloru zaobserwowano w przypadku wariantu LED2 RWFR. Najśłabsze
nasycenie barwy czerwonej wykazały owoce z upraw oświetlanych LED3 RB oraz LED1 RW.

Zawartość wody w owocach może być szacowana na podstawie względnej głębokości piku
absorpcyjnego w okolicach 970 nm, charakterystycznego dla obecności grup hydroksylowych
związanych z wodą. W celu dokładniejszej identyfikacji zmian w tym zakresie widma, obliczono
pierwszą pochodną spektralną. Pozwala ona określić, w którym przypadku następuje
najszybszy spadek intensywności sygnału, co może być wskaźnikiem wyższej zawartości
wody w tkankach owocu.



Rysunek 78. Pochodne pierwszego rzędu wyznaczone na podstawie analizy spektralnej dla owocu truskawki.

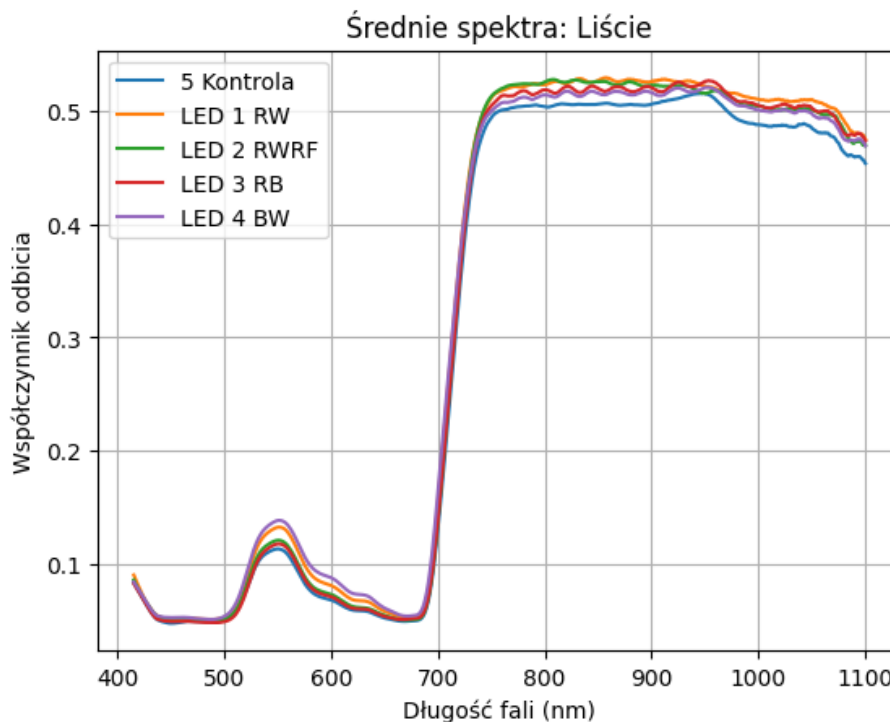
Najgłębszy, relatywny pik wodny w zakresie około 970 nm zaobserwowano (**Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.**) w próbkach pochodzących z upraw kontrolnych, a także oświetlanych LED4 BW oraz LED2 RWFR. Wskazuje to, że owoce te charakteryzowały się najwyższą zawartością wody, a tym samym mogły być najbardziej soczyste. Co istotne, obserwacja ta koreluje z intensywnością czerwonego zabarwienia owoców, które również była najwyższa w tych wariantach.

Podobną tendencję zaobserwowano w zakresie 1020–1060 nm, odpowiadającym pasmom pochłaniania związanym z obecnością cukrów prostych. Największe wartości odnotowano w próbkach kontrolnych oraz LED4 BW, pośrednie w LED2 RWFR, natomiast najniższe w wariantach LED3 RB i LED1 RW. Wyniki te mogą sugerować wyższy stopień dojrzałości i lepsze parametry jakościowe owoców w warunkach kontrolnych oraz przy zastosowaniu światła LED o dominującej składowej niebiesko-białej (BW).

Wykonano także analizę spektralną liści roślin truskawki (**Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.**). W przypadku liści, istotne zróżnicowanie spektralne zaobserwowano jedynie w wariantcie LED4 BW, co może świadczyć o większej niejednorodności wegetacji w tym wariantcie. Pomimo tego, uśrednione widma dla wszystkich wariantów wykazują dużą



zbieżność, co sugeruje ogólnie zbliżony stan fizjologiczny roślin. Liście w wariantach LED4 BW oraz LED1 RW charakteryzowały się nieco wyższym poziomem odbicia w zakresie 550–600 nm, co może wskazywać na jaśniejsze, lekko zażółcone ubarwienie w porównaniu do pozostałych wariantów.



Rysunek 79. Analiza uśrednionych obrazów spektralnych dla liści roślin truskawki

5.4.5. Wpływ spektralnego doświetlania LED na cechy plonotwórcze truskawek w kontekście analizy PCA na podstawie analizy owoców truskawki

W uprawach pod osłonami, światło stanowi jeden z kluczowych czynników wpływających na jakość oraz ilość plonu roślin. Zastosowanie sztucznego doświetlania z wykorzystaniem diod LED staje się coraz powszechniejszą praktyką mającą na celu zoptymalizowanie warunków fotosyntezy, a co za tym idzie – poprawę wydajności produkcyjnej. Celem niniejszej analizy było zbadanie wpływu różnych kombinacji spektralnych światła LED na cechy plonotwórcze truskawek w oparciu o analizę składowych głównych (PCA) na podstawie pomiaru odbitego światła spektralnego na dojrzałych owocach truskawki.

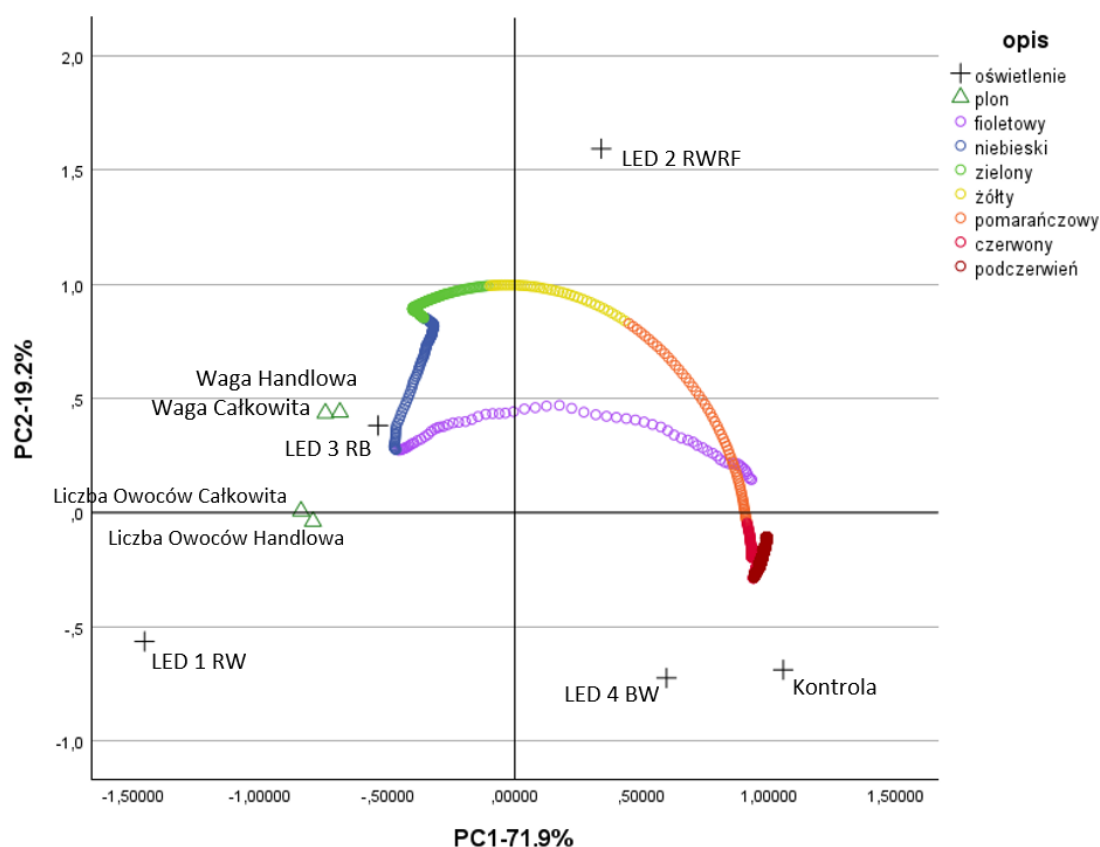
Analiza PCA, bazująca na spektrum od 400 nm do 1100 nm oraz parametrach takich jak masa owoców i ich liczba, pozwoliła na wyodrębnienie dwóch głównych składowych (Rysunek 80): PC1 (71,9% zmienności) i PC2 (19,2%). Łącznie wyjaśniają one 91,1% całkowitej zmienności, co wskazuje na wysoką jakość modelu i jego przydatność do dalszych interpretacji.



W przestrzeni dwuwymiarowej (BiPlot – warstwa zmierzonego na owocach światła spektralnego i cech plonotwórczych oraz korelacji grup doświadczalnych), PC1 rozdziela obiekty na podstawie ich związku z długościami fal w zakresie czerwieni i podczerwieni, które wykazały najwyższe dodatnie ładunki (np. czerwony: średnio 0.95, podczerwień: średnio 0.97). Z kolei pasma niebieskie, zielone i żółte miały dodatnie ładunki względem PC2 (np. zielony: średnio 0.91, żółty: średnio 0.96), co sugeruje ich rolę w kształtowaniu cech różnicujących inne aspekty wzrostu.

Pod względem położenia obiektów eksperymentalnych, kontrola (bez doświetlania) wykazała wysokie wartości PC1, natomiast LED 1 (RW) – najniższe. Obiekt LED 2 (RWFR) znajduje się wysoko w PC2, podobnie jak LED 3 (RB). Świadczy to o znacznym wpływie długości fal z zakresu czerwieni, czerwieni dalekiej oraz niebieskiego na analizowane cechy.

Spośród czterech analizowanych cech plonotwórczych (Waga Całkowita, Waga Handlowa, Liczba Owoców Całkowita, Liczba Owoców Handlowa), wszystkie są silnie skorelowane ujemnie z PC1, szczególnie „Liczba Owoców Całkowita” ($PC1 = -0.84$). Oznacza to, że kierunek przeciwny do składowej pierwszej (czyli m.in. mniejsze nasilenie światła czerwonego i podczerwonego) obserwujemy na większym plonie.



Rysunek 80. Relacje grup doświadczalnych oraz cech plonotwórczych na podstawie pomiarów widma spektralnego na owocach truskawki



Z fizjologicznego punktu widzenia, światło czerwone (660 nm) i dalekiej czerwieni (730 nm) silnie oddziałują na fitochromy, regulujące m.in. kiełkowanie, elongację pędów oraz kwitnienie. Ich nadmiar, szczególnie przy niedoborze światła niebieskiego, może prowadzić do tzw. „wydłużonego wzrostu” kosztem jakości owoców. W analizie LED 1 (RW), który wykazał minimalne wartości PC1, zaobserwowano najslabsze wyniki cech plonotwórczych, co potwierdza biologiczny mechanizm kompensacji.

Światło niebieskie (450 nm), poprzez wpływ na kryptochromy oraz fototropiny, reguluje otwieranie aparatów szparkowych, rozwój chloroplastów oraz akumulację antocyjanów. Obiekty LED 3 (RB) i LED 4 (BW), bogate w zakres niebieski, wykazały zrównoważone lub lekko dodatnie wyniki pod względem PC2, co koreluje z korzystnym wpływem niebieskiego światła na jakość i liczebność owoców.

Światło zielone i żółte, choć dawniej uważane za mało istotne, wykazują coraz więcej dowodów na swoje funkcje w penetracji głębszych warstw tkankowych oraz synergii z fotoreceptorami czerwonymi. W analizie PCA miały one silne dodatnie wartości dla PC2, wskazując na ich znaczenie w różnicowaniu jakości handlowej owoców.

Podsumowując, najbardziej korzystne efekty pod względem liczby i wagi owoców wykazano w obiektach zrównoważonych spektralnie (RB, BW), gdzie balans pomiędzy czerwienią a niebieskim światłem był najlepiej dostosowany do fizjologii truskawki. Nadmiar światła czerwonego bez obecności niebieskiego (RW) prowadził do obniżenia parametrów plonotwórczych. Analiza PCA stanowi skuteczne narzędzie integracji danych spektralnych i fizjologicznych w kontekście oceny skuteczności strategii doświetlania.

5.4.6. Wpływ spektralnego doświetlania LED na cechy plonotwórcze truskawek w kontekście analizy PCA na podstawie analizy liści truskawki

Celem niniejszego opracowania jest analiza wpływu różnych konfiguracji spektralnych LED (RW – red-white, RWFR – red-white-far red, RB – red-blue, BW – blue-white) na cechy plonotwórcze truskawki, takie jak waga całkowita i handlowa owoców oraz ich liczba, w odniesieniu do rozkładu spektralnego światła w zakresie 400–1100 nm. Do interpretacji danych wykorzystano analizę składowych głównych (PCA) na podstawie pomiarów odbitego spektrum światła na liściach truskawki, co pozwoliło na redukcję wymiarowości i wskazanie zależności pomiędzy widmem mierzonym na liściach a grupą doświadczalną i obserwowanymi cechami plonotwórczymi.

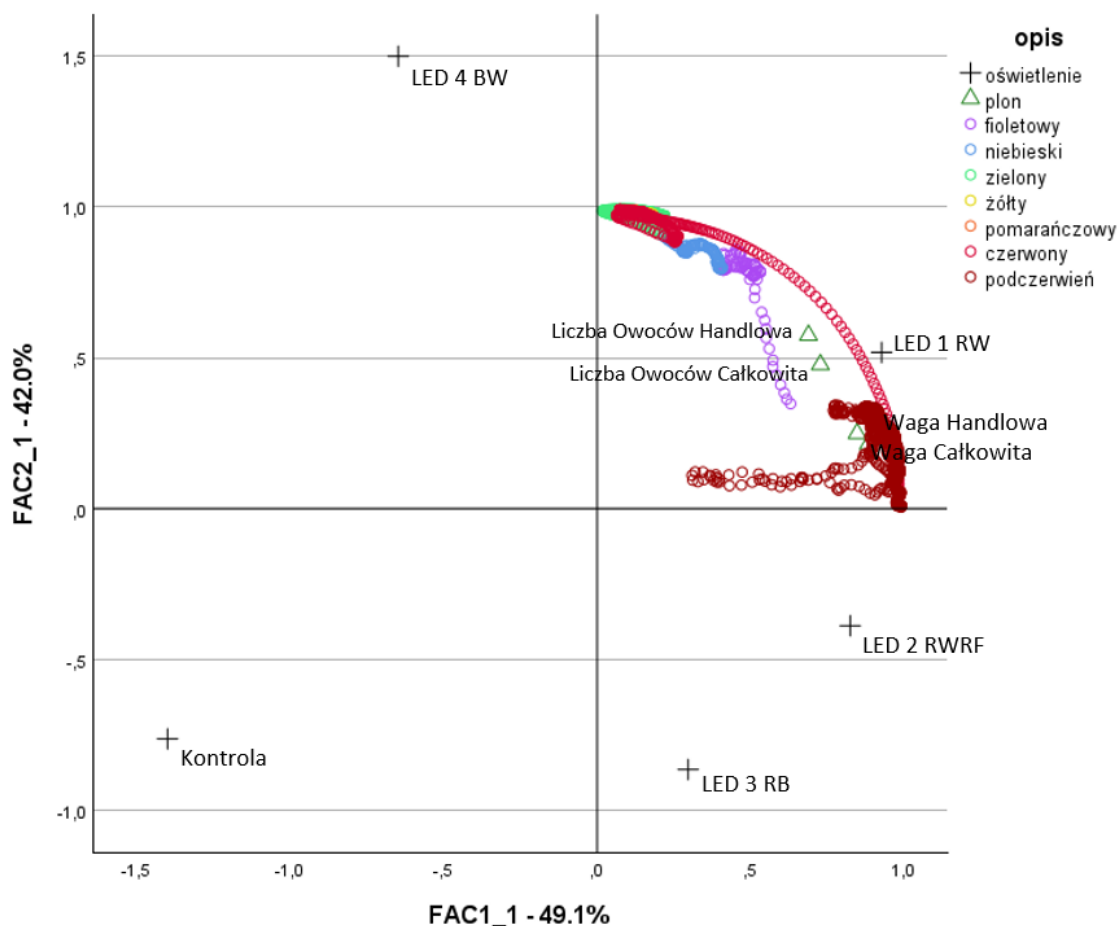
Otrzymane pierwsze dwie składowe (Rysunek 81) główne PCA wyjaśniają łącznie 91,1% całkowitej zmienności (PC1 – 49,1%, PC2 – 42,0%), co świadczy o wysokim poziomie



reprezentatywności modelu. W przestrzeni dwuwymiarowej PC1 × PC2 widoczne są wyraźne różnice w położeniu badanych wariantów oświetlenia względem cech plonotwórczych.

Zmienna waga całkowita osiąga wysokie wartości PC1 (0,88) oraz umiarkowane PC2 (0,21), podobnie jak waga handlowa (0,85; 0,25), co wskazuje, że są one silnie skorelowane z kierunkiem reprezentującym widmo czerwone (średnio 0,33; 0,83), niebieskie (średnio 0,33; 0,85) oraz fioletowe (średnio 0,49; 0,75). Liczba owoców całkowita i handlowa wykazują wysokie dodatnie wartości na obu osiach (odpowiednio: 0,73 i 0,69 dla PC1 oraz 0,48 i 0,57 dla PC2), co sugeruje ich zależność od szerszego spektrum – obejmującego zarówno barwy chłodne (fiolet, niebieski, zielony), jak i cieplejsze składowe, takie jak czerwony i podczerwień.

Pozycjonowanie wariantów LED w przestrzeni PCA również dostarcza interesujących informacji. LED1-RW (0,93; 0,52) i LED2-RWFR (0,82; -0,39) wykazują silne powiązanie z kierunkiem reprezentującym wysokie wartości wag i liczby owoców, wskazując na ich korzystny wpływ na plon. Z kolei LED3-RB (0,3; -0,87), mimo obecności światła niebieskiego, charakteryzuje się przesunięciem w kierunku przeciwnym do cech plonotwórczych, co może sugerować ograniczoną efektywność tej konfiguracji. LED4-BW (-0,65; 1,5), będący najbardziej oddalonym punktem w kierunku PC2, wykazuje silne powiązanie z zielonym (średnio 0,97) i żółtym (średnio 0,98) zakresem widma, jednak jego oddalenie od cech plonotwórczych sugeruje mniejszą skuteczność. Kontrola (-1,4; -0,76) znajduje się w przeciwległym obszarze przestrzeni PCA, co potwierdza, że brak doświetlania skutkowało najniższymi wartościami cech plonu.



Rysunek 81. Relacje grup doświadczalnych oraz cech plonotwórczych na podstawie pomiarów widma spektralnego na liściach truskawki

Obserwacja spektrum światła odbitego na liściach truskawki istotna jest z punktu widzenia zrozumienia procesów biologicznych. Światło czerwone (ok. 660 nm) oraz niebieskie (ok. 450 nm) odgrywają kluczową rolę w procesach fotosyntezy i regulacji morfogenezy roślin. Światło czerwone aktywuje fitochromy, wspierając elongację komórek, fotosyntezę oraz inicjację kwitnienia. W analizie PCA widmo czerwone jest pozytywnie skorelowane z kierunkiem wzrostu masy owoców, co potwierdza jego istotną rolę w akumulacji biomasy i rozwoju organów generatywnych. Jednocześnie, obecność podczerwieni (średnio 0,91; 0,20), choć umiarkowanie związana z cechami plonotwórczymi, może działać synergistycznie z czerwienią, stymulując przekształcenia metaboliczne korzystne dla rozwoju owoców. Światło niebieskie i fioletowe, działające przez fotoreceptory takie jak kryptochromy i fototropiny, odpowiadają za kompaktowy pokrój rośliny, rozwój aparatów fotosyntetycznych i kontrolę stomatalną. Ich korelacja z cechami liczbowymi owoców sugeruje wpływ na zwiększoną inicjację kwiatów oraz poprawę zapylenia i zawiązywania owoców. Wariant LED1-RW, łączący czerwone i białe światło, wykazuje najwyższą zgodność z kierunkiem wszystkich cech plonotwórczych, co potwierdza hipotezę o synergistycznym działaniu spektralnym światła białego (jako mieszaniny) z aktywnym udziałem fal czerwonych. Konfiguracja LED2-RWRF,



zawierająca komponent dalekiej czerwieni (far red), wykazuje nieco niższy związek z cechami liczbowymi plonu. Daleka czerwień, poprzez działanie na fitochromy w formie nieaktywnej (Pr), może wywoływać efekt cienia, prowadząc do elongacji pędów kosztem rozwoju organów generatywnych. LED3-RB, mimo zawartości czerwieni i niebieskiego, plasuje się poza główną strefą związaną z wysokim plonem, co może sugerować niewłaściwe proporcje spektralne. LED4-BW, dominowany przez fale krótsze (niebieski, zielony), nie wywiera znaczącego wpływu na plonowanie – może to wynikać z nadmiernego udziału pasm, które intensyfikują rozwój liści i metabolizm wegetatywny, ograniczając jednocześnie inwestycję w owocowanie.

W warunkach tego doświadczenia analiza PCA wykazała, że konfiguracje LED zawierające dominujące pasma czerwonego i białego światła (LED1-RW i LED2-RWFR) mają korzystny wpływ na cechy plonotwórcze truskawki, w tym wagę i liczbę owoców. Szczególnie efektywny okazał się wariant LED1-RW, którego pozycjonowanie w przestrzeni PCA odpowiada największej zgodności z cechami produktywności. Mechanizmy biologiczne stojące za tymi obserwacjami obejmują stymulację fotosyntezy, indukcję kwitnienia oraz poprawę rozwoju generatywnego przy odpowiednim zrównoważeniu pasm światła czerwonego i niebieskiego. Konfiguracje o przewadze światła niebieskiego i zielonego (LED4-BW) oraz brak doświetlania (kontrola) były najmniej skuteczne, co wskazuje na konieczność dostosowania widma światła sztucznego do wymagań fizjologicznych roślin owocujących. Uzyskane wyniki stanowią podstawę do optymalizacji strategii doświetlania upraw truskawki, z wykorzystaniem odpowiednio dobranych spektrów LED, z naciskiem na synergię między czerwienią a światłem szerokopasmowym.

5.5. Analiza optyczna i końcowa plonu w kontekście zagospodarowania produktów ubocznych produkcji upraw w środowisku kontrolowanym

5.5.1. Plon i cechy jakości ziarna dla poszczególnych wariantów

Badania dotyczące plonu oraz jakości ziarna pszenicy przeprowadzono w Katedrze Agronomii Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie z wykorzystaniem analizatora całego ziarna Infratec™ 1241. Urządzenie to wykorzystuje technologię bliskiej podczerwieni (NIR) do jednoczesnego oznaczania szeregu wyróżników jakościowych, takich jak zawartość białka, wilgotności, skrobi czy glutenu mokrego. Infratec™ 1241 jest uznanym na świecie narzędziem analitycznym, charakteryzującym się wysoką dokładnością i wszechstronnością, dzięki zastosowaniu globalnych kalibracji opartych na danych gromadzonych przez ponad 25 lat. Analizator może być również doposażony w moduły umożliwiające pomiar gęstości w stanie zsypanym oraz innych właściwości fizykochemicznych ziarna. W ramach badań oceniano następujące cechy pszenicy: liczbę kłosów, masę ziarna (g/m^2), masę tysiąca ziaren,



zawartość białka (%), wilgotność (%), skrobię (%), zawartość glutenu mokrego (%), wskaźnik Zeleny'ego oraz gęstość ziarna (kg/hl).

Tabela 8. Średnie dla plonu, składowych plonu i cech jakościowych ziarna.

Obiekt	Liczba kłosów	Masa ziarna (g/m ²)	Masa 1000 ziaren	Białko (%)	Wilgotność (%)	Skrobia (%)	Gluten mokry (%)	Zeleny	Gęstość (kg/hl)
I wariant	400,5	611,3	43,6	11,50	12,9	69,1	24,7	36,2	81,9
II wariant	324,0	468,7	42,3	10,75	13,0	68,9	22,5	32,6	79,1
III wariant K	310,5	512,6	43,5	11,65	12,9	69,2	25,3	36,2	82,2
IV wariant	313,0	555,7	43,6	11,40	13,0	68,1	25,3	33,7	82,3

Najwięcej kłosów na jednostce powierzchni uzyskano w I wariantcie (400,5), co przełożyło się również na najwyższą masę ziarna (611,3 g). Najniższe wartości tych parametrów odnotowano dla II wariantu. Masa 1000 ziaren była zbliżona we wszystkich wariantach i wahała się od 42,3 g do 43,6 g. Pod względem zawartości białka w suchej masie najwyższy wynik osiągnięto w III wariantcie K (11,65%), a najniższy w II wariantcie (10,75%). Zawartość skrobi utrzymywała się na podobnym poziomie we wszystkich próbach, nieco wyższa była w III wariantcie (69,2%). Najwięcej glutenu mokrego odnotowano w III i IV wariantcie (25,3%), a najmniej w II wariantcie (22,5%). Wartość testu sedymentacyjnego Zeleny'ego była najwyższa w I i III wariantcie (36,2), co może świadczyć o lepszych właściwościach wypiekowych ziarna. Gęstość ziarna była najwyższa w IV wariantcie (82,3 kg/hl), a najniższa w II wariantcie (79,1 kg/hl).

5.5.2. Ocena stanu roślinności na poletkach doświadczalnych z wykorzystaniem wskaźnika NDVI z zdjęć satelitarnych z satelitów Sentinel- 2

Sentinel-2 to para satelitów (Sentinel-2A i Sentinel-2B) należących do programu Copernicus prowadzonego przez Europejską Agencję Kosmiczną (ESA). Głównym zadaniem Sentinel-2 jest monitorowanie powierzchni Ziemi, w tym roślinności, wód, gleb oraz zjawisk związanych z użytkowaniem terenu.

Cechy charakterystyczne Sentinel-2:

- Rozdzielczość przestrzenna: od 10 m do 60 m – zależnie od pasma spektralnego.
- Najwyższa rozdzielczość (10 m) – dotyczy pasm: B2 (niebieski) – 490 nm, B3 (zielony) – 560 nm, B4 (czerwony) – 665 nm, B8 (bliska podczerwień – NIR) – 842 nm

Te pasma są kluczowe dla obliczania wskaźnika NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), który jest miarą zdrowotności i aktywności fotosyntetycznej roślinności.

NDVI – obliczanie i interpretacja:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$



NIR - wartość odbicia promieniowania w bliskiej podczerwieni

RED - wartość odbicia promieniowania w zakresie czerwonym światła widzialnego

Wartości NDVI zawierają się w przedziale od -1 do 1, czym wyższa wartość NDVI tym większa zielona biomasa na jednostce powierzchni (intensywniejsza vegetacja):

- 0,2–0,5 – roślinność słaba do umiarkowanej (wczesne stadia wzrostu lub suchsze warunki)
- 0,5–0,9 – bujna, zdrowa roślinność (np. w pełni rozwinięte uprawy)
- < 0,2 – brak roślinności lub goła gleba



Rysunek 82. Mapa z granicami pól i opisem poszczególnych wariantów

Tabela 9 prezentuje średnie wartości NDVI obliczonego na podstawie zdjęć satelitarnych z satelitów Sentinel-2 dla poszczególnych wariantów doświadczenia w poszczególnych terminach prowadzonych obserwacji. Na rysunkach 1-1 przedstawiono mapki NDVI obliczonego na podstawie zdjęć z satelitów Sentinel-2 w dwóch wersjach: (1) mapki z średnim NDVI z wyświetlonymi wartościami oraz (2) mapki z NDVI nieuśrednionym, tylko dla poszczególnych pikseli z zdjęć satelitarnych (piksele są wielkości 10 x 10 metrów). Wyniki prowadzonych obserwacji i ocena zabarwienia łąnu na podstawie obliczonych wskaźników pozwoliło określić jaki wpływ na wyrównanie zabarwienia (co za tym idzie polepszenie stanu fizjologicznego roślin) ma nawożenie produktem ubocznym jakim jest przelew pożywki nawozowej wykorzystywanej w uprawie truskawek w substracie uprawowym. Badanie to było



niezbędne w celu wytworzenia innowacji ze względu na łatwy sposób określenia wpływu na stan fizjologiczny określany zabarwieniem. Wyniki badań w postaci zdjęć satelitarnych pozwoliły również na szybką analizę wizualną łąnu grup badawczych, w celu weryfikacji skuteczności stosowanych zabiegów.

Tabela 9. Średnie wartości NDVI obliczonego na podstawie zdjęć satelitarnych z satelitów Sentinel-2 dla poszczególnych wariantów w poszczególnych terminach

opis	30.03.2024	29.04.2024	04.05.2024	14.05.2024	26.05.2024	15.06.2024
I wariant	0,391	0,557	0,525	0,518	0,448	0,295
II wariant	0,398	0,554	0,490	0,513	0,443	0,290
III wariant K	0,416	0,584	0,564	0,564	0,486	0,322
IV wariant	0,450	0,584	0,582	0,580	0,494	0,336

Ogólne wnioski na podstawie wyników z tabeli 1:

- Najwyższe wartości NDVI w całym okresie wegetacyjnym wykazywał IV wariant, co sugeruje najlepszy stan wegetacyjny roślin.
- III wariant K również uzyskał wysokie i stabilne wartości NDVI, zwłaszcza w maju, co może świadczyć o optymalnych warunkach dla wzrostu.
- Warianty I i II miały niższe wartości NDVI we wszystkich terminach, co może być wynikiem słabszych warunków glebowych lub agrotechnicznych (co pokrywa się z niższym plonem i parametrami jakościowymi w poprzedniej tabeli).
- We wszystkich wariantach widać spadek NDVI w połowie czerwca, co może być związane z końcem fazy aktywnego wzrostu, stopniowym dojrzewaniem roślin i zmniejszaniem zawartości chlorofilu w roślinach.

NDVI 30.03.2024 r.



Rysunek 83. Mapki z średnim NDVI dla poszczególnych poletek oraz mapki z NDVI nieuśrednionym (dla pikseli 10x10 metrów – po prawej) w dniu 30.03.2024 r.

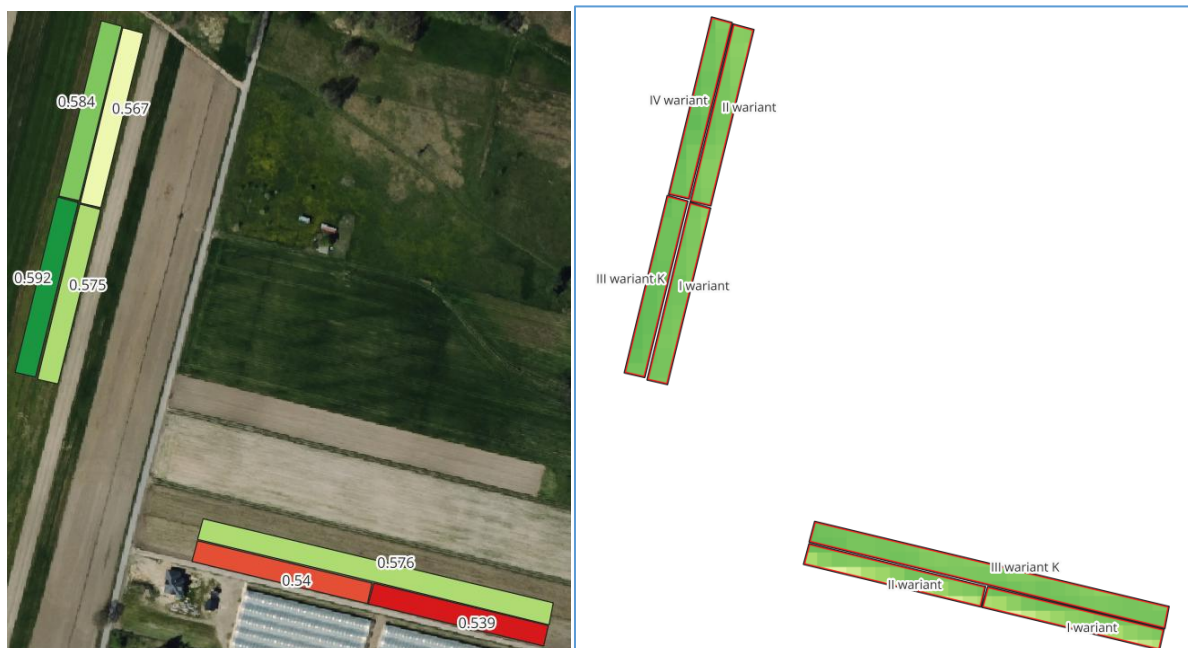
Na tym wczesnym etapie wegetacji wartości NDVI są jeszcze stosunkowo niskie, co jest typowe dla roślin w fazie ruszania wegetacji po zimie.

IV wariant już na starcie wykazuje najwyższy NDVI (0,450), co może sugerować szybszy start rozwoju roślin lub lepsze warunki siedliskowe.

III wariant K również osiąga wyższą wartość (0,416) niż warianty I i II.

Warianty I i II mają podobne wartości (ok. 0,39), co świadczy o zbliżonym, ale nieco wolniejszym początku wegetacji.

NDVI 29.04.2024 r.



Rysunek 84. Mapki z średnim NDVI dla poszczególnych pól oraz mapki z NDVI nieuśrednionym (dla pikseli 10x10 metrów – po prawej) w dniu 29.04.2024 r.

W tym okresie obserwujemy duży wzrost NDVI we wszystkich wariantach, co odzwierciedla intensywny przyrost biomasy.

III i IV wariant osiągają identyczne i najwyższe wartości NDVI (0,584), co świadczy o bardzo dobrej kondycji upraw.

Warianty I i II również wykazują wysokie wartości, ale są o kilka setnych niższe – sugeruje to drobne różnice w dynamice wzrostu.

NDVI 04.05.2024 r.



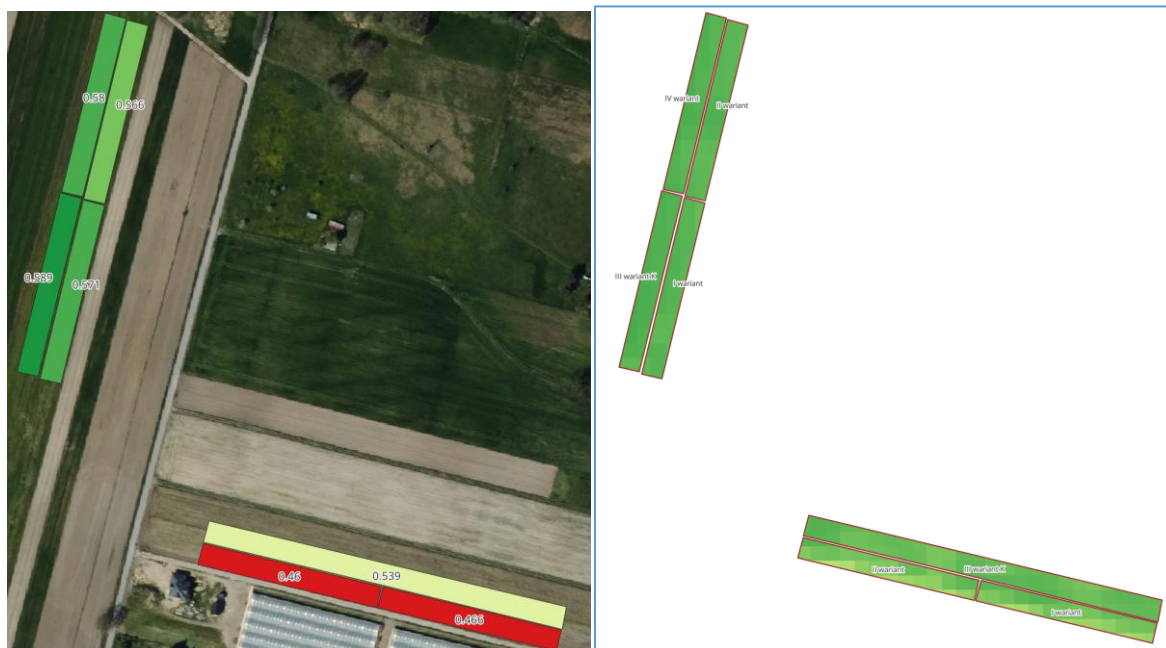
Rysunek 85. Mapki z średnim NDVI dla poszczególnych poletek oraz mapki z NDVI nieuśrednionym (dla pikseli 10x10 metrów – po prawej) w dniu 04.05.2024 r.

NDVI nadal utrzymuje się na wysokim poziomie, choć w niektórych wariantach widać lekkie obniżenie (np. I i II).

IV wariant nadal dominuje pod względem wartości NDVI – roślinność jest najgęstsza i najaktywniejsza fotosyntetycznie.

Wariant II zaczyna odstawać od reszty (spadek do 0,490), co może sugerować pogorszenie stanu łąnu lub słabsze warunki wodne czy glebowe.

NDVI 14.05.2024 r.



Rysunek 86. Mapki z średnim NDVI dla poszczególnych poletek oraz mapki z NDVI nieuśrednionym (dla pikseli 10x10 metrów – po prawej) w dniu 14.05.2024 r.

W tym terminie III i IV wariant nadal utrzymują się na bardzo wysokim poziomie NDVI, co potwierdza stabilny i silny rozwój roślin.

Warianty I i II mają wartości o ok. 0,05 niższe – sugeruje to mniejsze zwarcie ładu lub niższą aktywność roślin w porównaniu z wariantami kontrolnym i IV.

NDVI 05.26.2024 r.



Rysunek 87. Mapki z średnim NDVI dla poszczególnych poletek oraz mapki z NDVI nieuśrednionym (dla pikseli 10x10 metrów – po prawej) w dniu 26.05.2024 r.

Wartości NDVI zaczynają spadać we wszystkich wariantach – to naturalne zjawisko związane z stopniowym dojrzewaniem zbóż i ograniczeniem aktywności fotosyntezy.

IV i III wariant nadal mają wyższe NDVI niż I i II, co może sugerować, że rośliny są wciąż w lepszej kondycji lub nieco wolniej dojrzewają.

NDVI 15.06.2024 r.



Rysunek 88. Mapki z średnim NDVI dla poszczególnych poletek oraz mapki z NDVI nieuśrednionym (dla pikseli 10x10 metrów – po prawej) w dniu 15.06.2024 r.

We wszystkich wariantach nastąpił wyraźny spadek NDVI, co jest typowe dla dojrzałych roślin – łan żółknie, spada ilość zielonej masy.

IV wariant nadal wykazuje najwyższą wartość (0,336), co może sugerować lepsze utrzymanie kondycji do końca sezonu lub opóźnienie dojrzewania.

Warianty I i II mają najniższe NDVI – to potwierdza wcześniejsze wnioski o słabszym rozwoju lub szybszym starzeniu się roślin.

5.5.3. Powiązania między NDVI oraz plonem, składowymi plonu i cechami jakości ziarna oraz wielocechowa charakterystyka obiektów

W przeprowadzonej analizie obliczono współczynniki korelacji pomiędzy wartościami wskaźnika wegetacji NDVI, wyznaczonymi na podstawie zdjęć satelitarnych Sentinel-2 w różnych terminach, a wybranymi parametrami plonowania i jakości ziarna dla czterech wariantów uprawy.

Zakres analizy:

Dane wejściowe:

- NDVI dla sześciu terminów: od marca do czerwca 2024 r.



- Cechy ilościowe i jakościowe roślin: m.in. liczba kłosów, masa plonu, masa 1000 ziaren, zawartość białka, skrobi, glutenu, wilgotność, wskaźnik Zeleny'ego, gęstość ziarna.
- Dane pochodzą z czterech wariantów doświadczalnych.

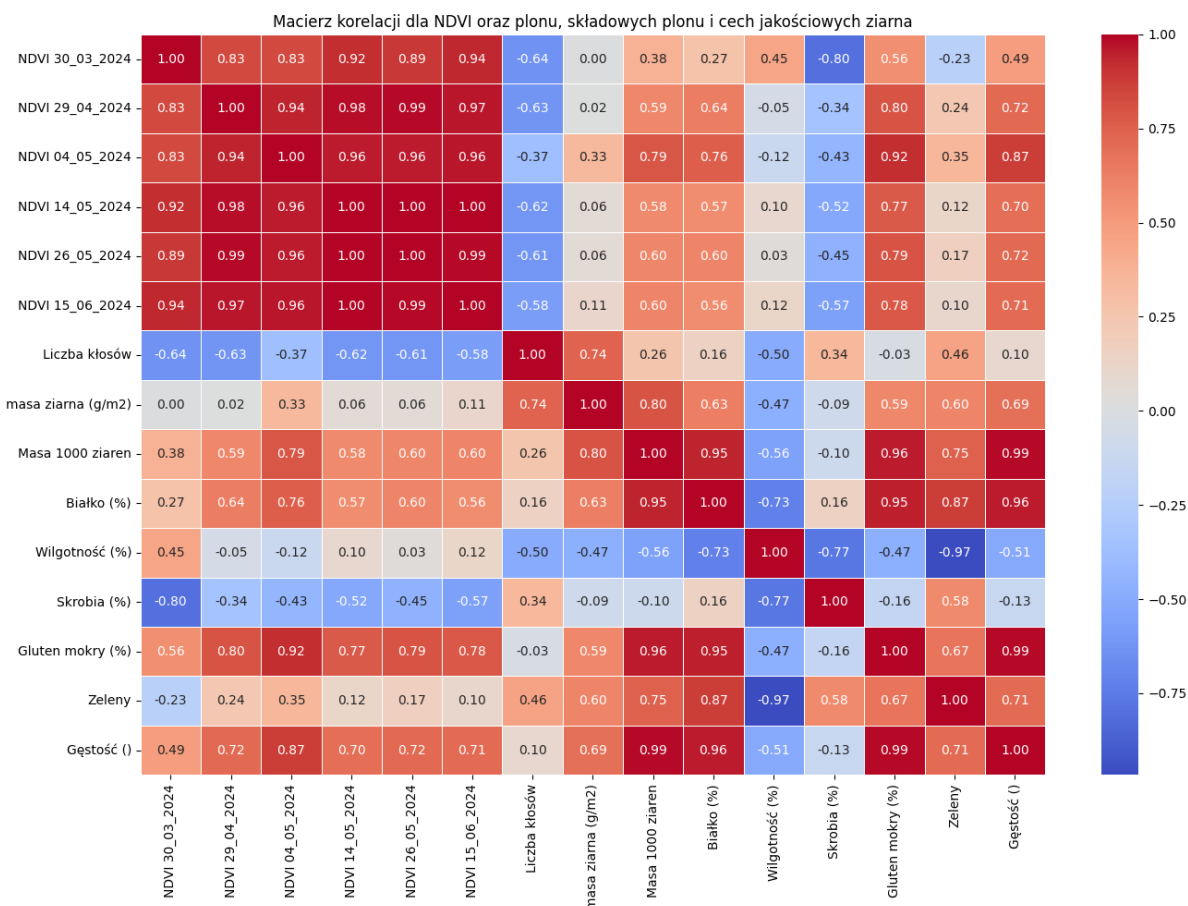
Metodyka analiz korelacji:

Dla każdej pary zmiennych obliczono współczynnik korelacji Pearsona, który określa siłę i kierunek zależności liniowej między nimi.

Wyniki przedstawiono w formie heatmapy (mapy cieplnej), gdzie kolory odzwierciedlają wartość korelacji:

- wartość bliska +1 – silna korelacja dodatnia,
- wartość bliska -1 – silna korelacja ujemna,
- wartość bliska 0 – brak istotnej zależności liniowej.

Celem analizy było określenie, które terminy obrazowania NDVI najlepiej odzwierciedlają potencjał plonotwórczy roślin i ich cechy jakościowe. Dzięki temu można wskazać, w których momentach sezonu wegetacyjnego NDVI najlepiej koreluje z późniejszym plonem i jakością ziarna.



Rysunek 89. Współczynniki korelacji przedstawiające zależności pomiędzy wskaźnikami NDVI (dla 6 terminów) a parametrami plonu i jakości ziarna pszenicy.

Zależności między NDVI a cechami plonu i jakości ziarna:

NDVI z wcześniejszych terminów (30.03–14.05.2024):

- NDVI z tych terminów silnie koreluje między sobą ($r \approx 0,89–1,00$) — co oznacza, że wczesne wartości NDVI były stabilne i rośliny rozwijały się równomiernie.

Silna dodatnia korelacja z jakością ziarna, zwłaszcza:

- Białko (%): $r = 0,64–0,66$ (najwyżej z 29.04 i 14.05),
- Gluten mokry (%): $r = 0,78–0,92$,
- Zeleny: $r = 0,70–0,77$,
- Gęstość ziarna: $r = 0,70–0,87$.

Wskazuje to, że NDVI w fazie strzelania w źdźbło i kłoszenia może być dobrym wskaźnikiem do prognozowania jakości technologicznej ziarna.

NDVI z późniejszych terminów (26.05 i 15.06.2024):

- Korelacje z jakością nadal występują, ale są nieco słabsze.



- Nadal jednak widoczna jest silna zależność z glutenem ($r \approx 0,87-0,96$) oraz z gęstością ($r \approx 0,70-0,71$).
- NDVI w późniejszych terminach może wskazywać na utrzymanie kondycji roślin oraz późne czynniki stresowe wpływające na jakość.

Liczba kłosów:

- Ujemna korelacja z NDVI w każdym terminie (r od $-0,37$ do $-0,64$) – może wskazywać, że większa liczba kłosów nie przekładała się na intensywniejszą biomasę liściową lub były to kłosy mniejsze/słabsze.

Masa ziarna (plon):

- Korelacja z NDVI umiarkowana ($r = 0,00-0,33$), najsilniejsza dla 04.05.2024 ($r = 0,33$) – co sugeruje, że NDVI może w pewnym stopniu przewidywać plon, ale nie jest to zależność bardzo silna.

Masa 1000 ziaren:

- Bardzo wysoka dodatnia korelacja z NDVI (szczególnie 29.04–14.05, $r \approx 0,58-0,95$). To oznacza, że NDVI w tych terminach może być dobrym wskaźnikiem wielkości i wypełnienia ziarna.

Zależności między cechami jakości:

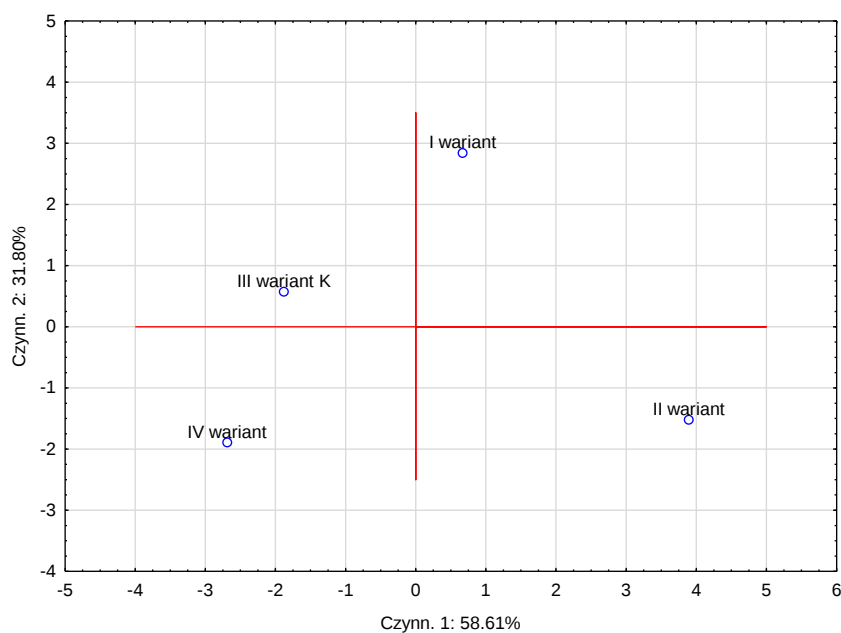
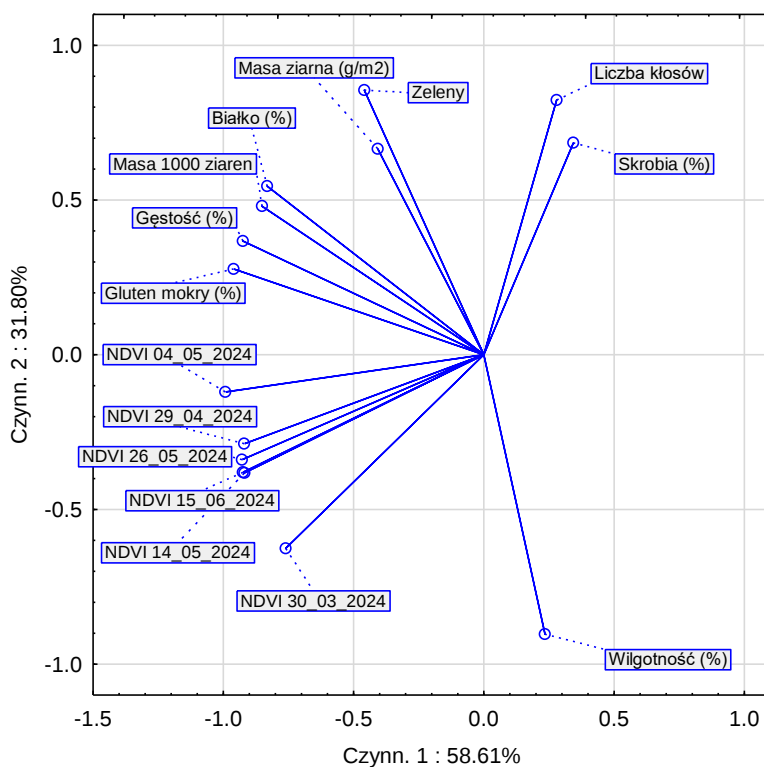
- Białko, gluten mokry, Zeleny, gęstość i masa 1000 ziaren są bardzo silnie ze sobą skorelowane ($r > 0,95$), co jest zgodne z właściwościami ziarna pszenicy.
- Skrobia (%) jest ujemnie skorelowana z białkiem, glutenem i NDVI ($r \approx -0,7$ do $-0,8$) – zgodne z zasadą, że wyższa zawartość białka często oznacza niższą zawartość skrobi.

Podsumowanie:

NDVI z przełomu kwietnia i maja (szczególnie 29.04 i 14.05) ma największy potencjał predykcyjny w odniesieniu do jakości ziarna i masy 1000 ziaren.

NDVI z marca już wykazuje wyraźne zależności z jakością ziarna, co może być cenne dla wczesnych prognoz.

Liczba kłosów nie koreluje dodatnio z NDVI — może świadczyć o kompensacji plonu (np. mniej kłosów, ale lepsze ziarno).



Rysunek 90. Wykresy przedstawiające wyniki PCA, tj. powiązania między badanymi cechami oraz wielocechowe zróżnicowanie obiektów w układzie dwóch pierwszych składowych głównych.

Analiza PCA (ang. Principal Component Analysis, analiza głównych składowych) to narzędzie statystyczne używane do redukcji wymiarowości danych i wykrywania wzorców w dużych zbiorach zmiennych. Pomaga zrozumieć, które zmienne najbardziej wpływają na różnice między obserwacjami.

Cel zastosowania PCA:



1. Redukcja liczby zmiennych: zamiast analizować każdą zmienną osobno (co może być trudne przy dużej liczbie NDVI i cech związanych z plonowaniem i jakością ziarna), PCA pozwala wyrazić te dane w kilku głównych składowych, które zawierają najwięcej informacji.
2. Wizualizacja różnic między wariantami: można zobaczyć, które warianty doświadczalne są do siebie podobne, a które się różnią.
3. Identyfikacja najważniejszych zmiennych: PCA pokazuje, które zmienne (np. NDVI w określonym terminie lub zawartość białka) najbardziej wpływają na różnice między wariantami.

Interpretacja wyników PCA:

1. Wykres głównych składowych (np. PC1 i PC2):
 - Każdy punkt na wykresie reprezentuje jeden wariant doświadczalny.
 - Położenie punktów pokazuje podobieństwa i różnice – blisko siebie = podobne; daleko = różne.
2. Wektory zmiennych (tzw. loading plot):
 - Wskazują, które zmienne miały największy wpływ na pozycję punktów na wykresie.
 - Np. jeśli NDVI z późnego terminu jest silnie powiązany z PC1, oznacza to, że ta zmienna silnie różnicuje warianty.

Analiza głównych składowych (PCA) ujawniła, że zmienne związane z NDVI w różnych terminach silnie i negatywnie korelują z pierwszą główną składową (PC1), co sugeruje, że PC1 reprezentuje ogólny poziom wigoru roślin w sezonie wegetacyjnym. Wartości NDVI mają również umiarkowany negatywny wkład w PC2, co oznacza ich mniejsze znaczenie w różnicowaniu wzdłuż tej osi. PC2 natomiast mocno różnicują cechy jakościowe i związane z plonem, jak liczba kłosów, zawartość skrobi, Zeleny, czy wilgotność ziarna. Szczególnie silnie i dodatnio z PC2 skorelowana jest liczba kłosów (0,823) oraz Zeleny (0,855), natomiast wilgotność ziarna silnie ujemnie (-0,903).

Wśród wariantów, I wariant ma wysoką wartość PC2 (2,841), co wskazuje na dobre cechy jakościowe i dużą liczbę kłosów, mimo że jego NDVI nie były wysokie (średnia wartość PC1). II wariant ma najwyższy wynik PC1 (3,895), co sugeruje wysoki NDVI w sezonie i potencjalnie dobrą kondycję łąnu, jednak niska wartość PC2 (-1,521) może oznaczać gorsze parametry jakościowe. III wariant K ma niską wartość PC1 (-1,877), co sugeruje słabszą vegetację, ale umiarkowaną jakość ziarna (PC2 = 0,575). IV wariant natomiast wypada najgorzej pod

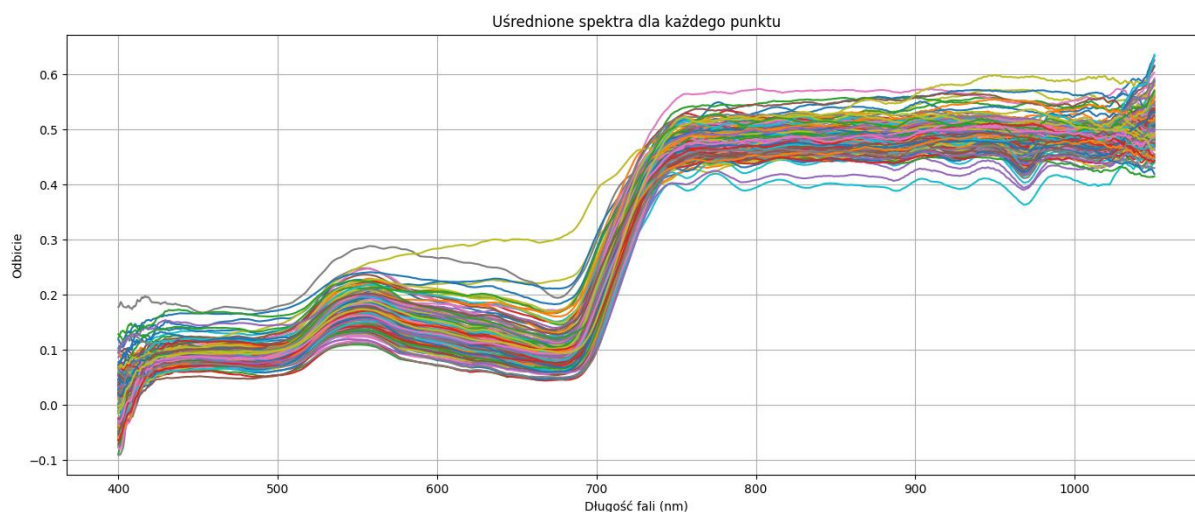


względem obu składowych – niski NDVI i niskie parametry jakościowe ($PC1 = -2,689$, $PC2 = -1,895$), co może świadczyć o występowaniu warunków stresowych w końcu wegetacji.

5.5.4. Analiza obrazów spektralnych pszenicy

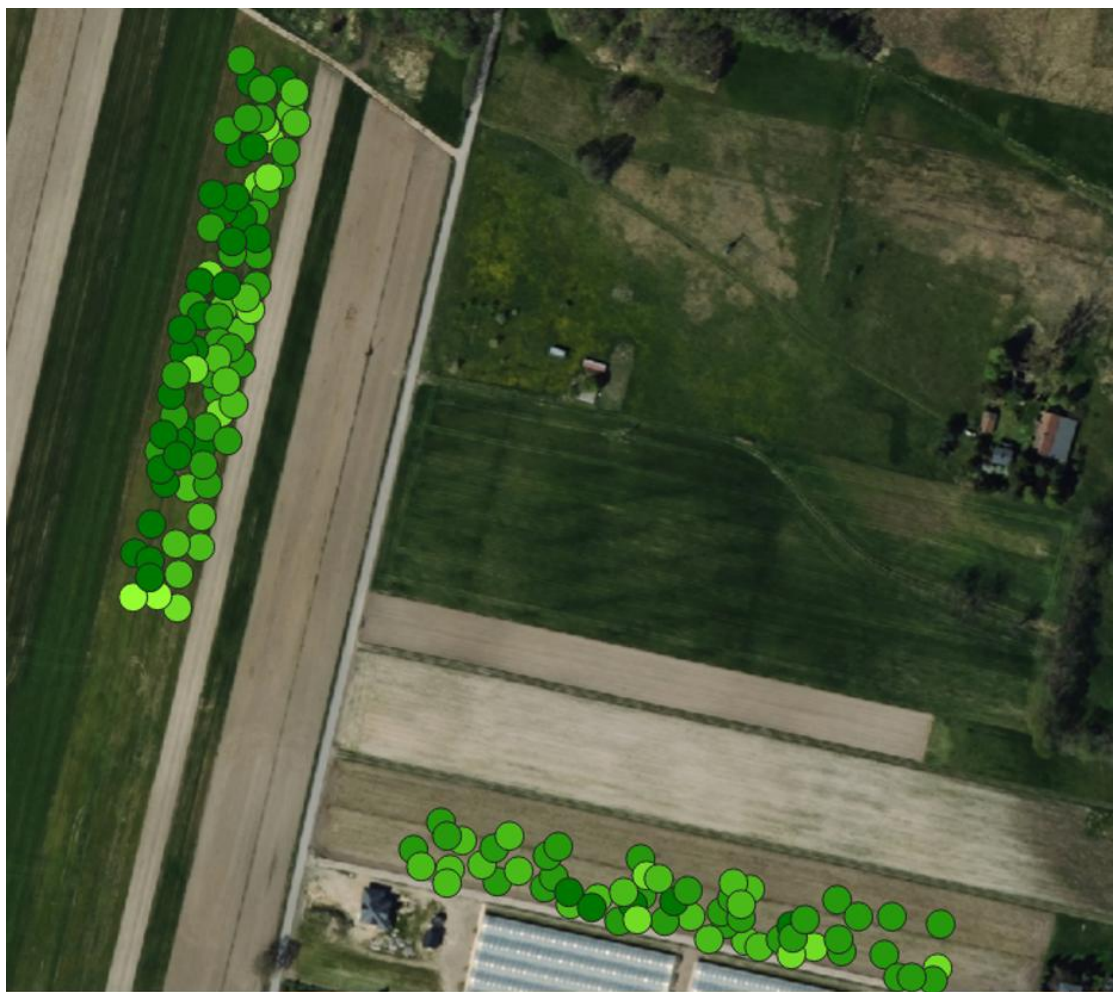
Wyniki są zbierane w celu porównawczych.

Celem przeprowadzonych badań było wykorzystanie analizy spektralnej do oceny wpływu nawożenia odciekami pochodzącym z uprawy truskawki na stan fizjologiczny pszenicy uprawianej w warunkach polowych. Metoda ta pozwala na nieniszczącą ocenę parametrów roślin poprzez analizę odbicia promieniowania elektromagnetycznego w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni (VIS-NIR). W warunkach polowych, bez dodatkowego doświetlania, uzyskane spektra mogą odzwierciedlać różnice w zawartości chlorofilu, struktury komórkowej oraz nawodnienia liści, które wynikają z zastosowanego sposobu nawożenia. Doświadczenie prowadzono w czterech wariantach nawożenia: I, II, III (kontrolny) oraz IV, różniących się dawką aplikacji odcieku. Analiza widm odbiciowych pozwala na identyfikację subtelnych różnic w barwie i kondycji roślin pszenicy, umożliwiając ocenę efektywności zastosowanego zabiegu nawożenia organicznego.



Rysunek 91. Uśrednione spektra obrazu pszenicy dla wszystkich badanych punktów.

Dla wybranych punktów pomiarowych zostały obliczone różne wskaźniki wegetacyjne, które następnie zestawione w tabeli wraz z odpowiadającymi im współrzędnymi geograficznymi, były podstawą ich wizualizacji w formie map przestrzennych.



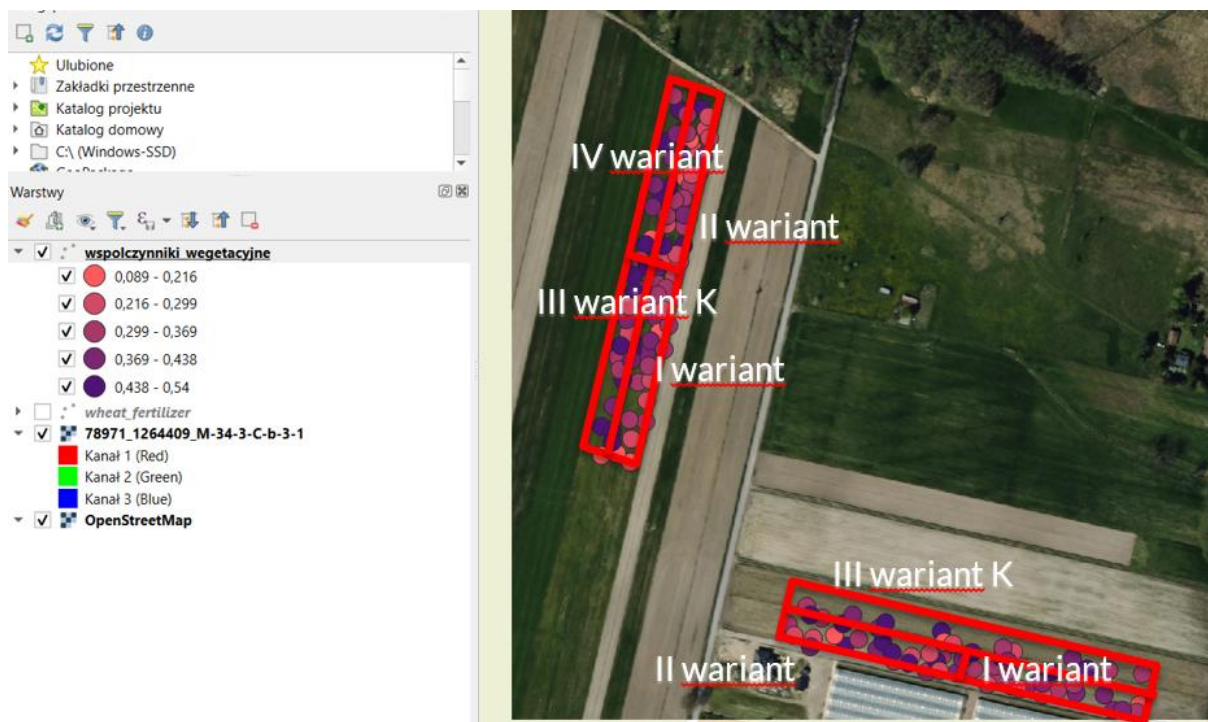
Rysunek 92. Mapa NDVI



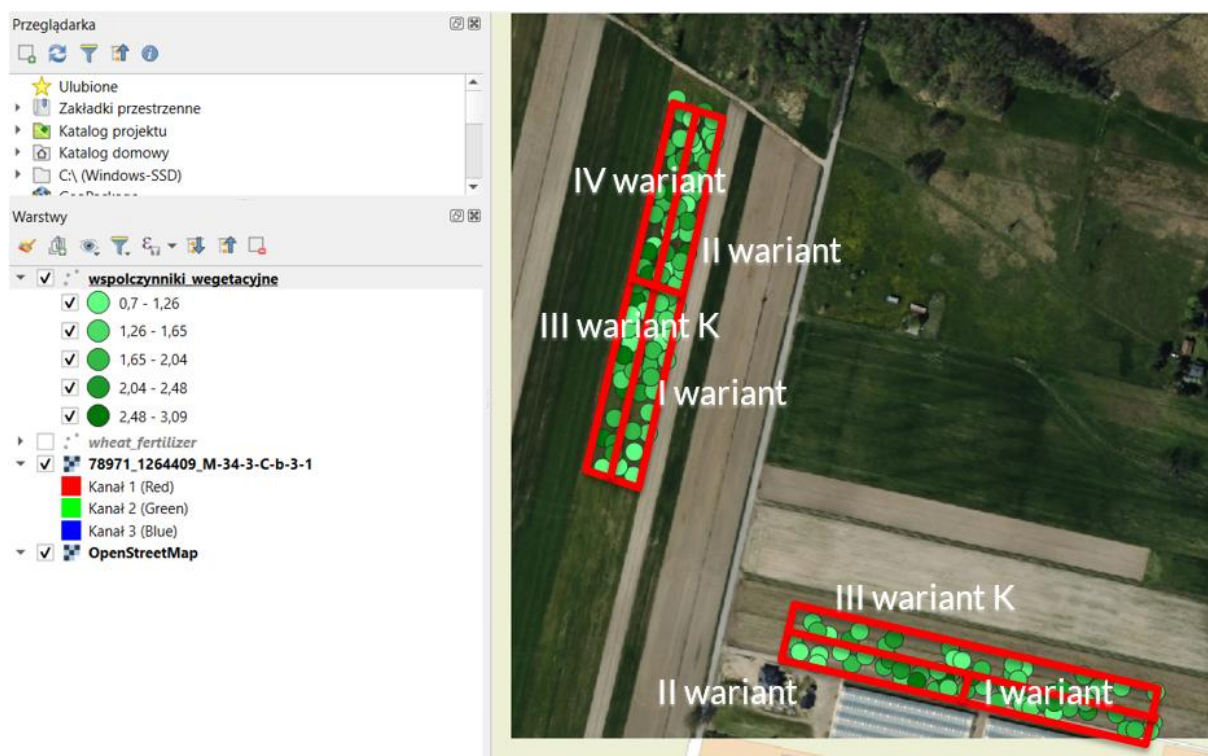
Rysunek 93. Mapa PRI



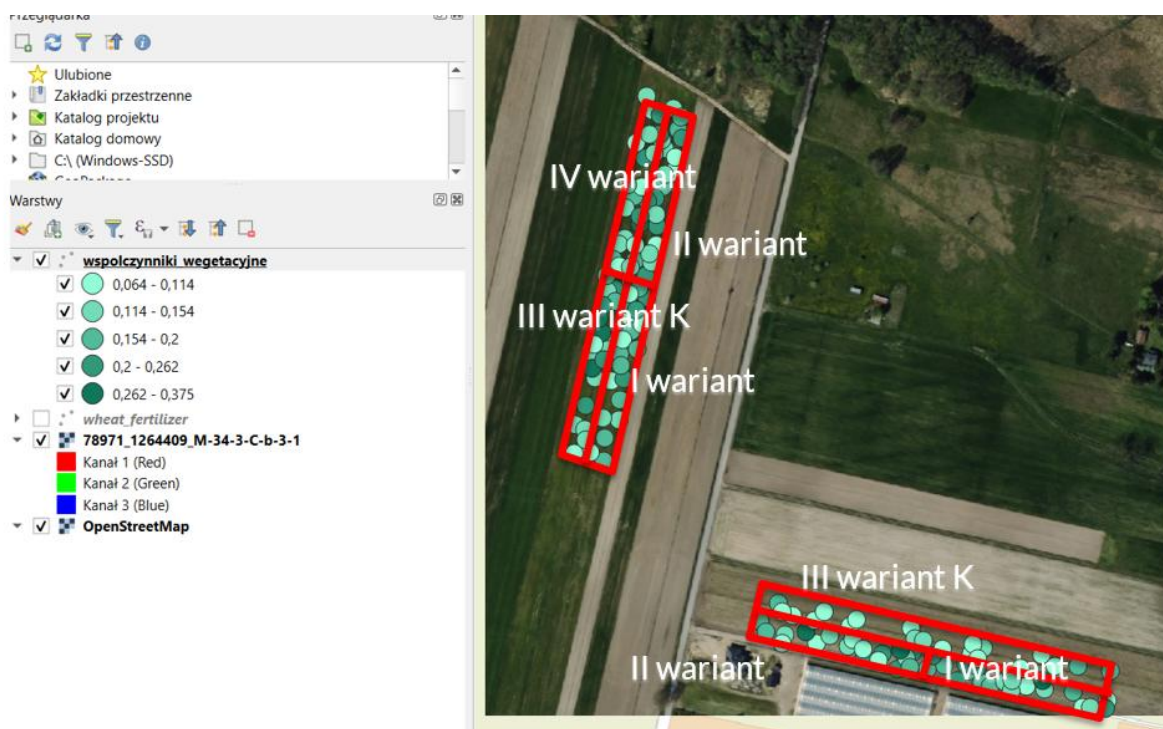
Rysunek 94. Mapa WSI



Rysunek 95. Mapa red-edge stress



Rysunek 96. Mapa CI-green



Rysunek 97. Mapa MCARI

5.5.5. Wpływ stosowania produktów ubocznych z uprawy truskawki (odciek z podłoża) na środowisko

Współczesne systemy produkcji ogrodnictwa i rolnictwa, szczególnie te oparte na technologiach bezglebowych, generują specyficzne odpady w postaci odcieków pożywek nawozowych. Z uwagi na ich wysokie zasolenie oraz obecność pozostałości nawozów mineralnych, odcieki te mogą stanowić zagrożenie dla środowiska naturalnego, w szczególności dla wód gruntowych i powierzchniowych. Jednocześnie zawartość makro- i mikroelementów w tych roztworach sprawia, że ich właściwe zagospodarowanie może stanowić istotny element strategii racjonalnego gospodarowania zasobami w gospodarstwach rolnych. W kontekście dążenia do wdrażania zasad gospodarki o obiegu zamkniętym oraz ograniczenia presji środowiskowej wynikającej z intensywnej produkcji roślinnej, zasadnym wydaje się poszukiwanie sposobów wtórnego wykorzystania odcieków z upraw hydroponicznych. Celem prezentowanego doświadczenia była ocena wpływu dolistnego stosowania odcieku z hydroponicznej uprawy truskawki na plonowanie i jakość pszenicy ozimej. Analizowano jednocześnie potencjalne korzyści środowiskowe i agrotechniczne wynikające z zastosowania tego typu rozwiązania.



Nie stwierdzono, aby zastosowanie odcieków pochodzących z hydroponicznej uprawy truskawki jako nawozu w uprawie pszenicy miało negatywny wpływ na jakość oraz ilość uzyskanego plonu. Choć nie zaobserwowano istotnego wzrostu plonów, aplikacja odcieku może być uzasadniona zarówno z perspektywy agronomicznej, jak i środowiskowej. Przede wszystkim, wykorzystanie zużytej pożywki nawozowej sprzyja efektywnemu gospodarowaniu zasobami i wpisuje się w założenia gospodarki cyrkularnej, redukując jednocześnie zapotrzebowanie na nawozy mineralne, których produkcja wiąże się ze znacznym zużyciem energii oraz surowców naturalnych.

Pomimo braku bezpośredniego wpływu na intensyfikację produkcji, odciek nadal stanowi źródło istotnych składników odżywczych, takich jak azot, fosfor, potas, wapń oraz mikroelementy. Mogą one wspierać bilans składników pokarmowych w glebie, przyczyniając się do utrzymania jej długofalowej żyzności. Co więcej, regularne stosowanie tego typu materiału może wpływać pozytywnie na strukturę gleby oraz aktywność mikrobiologiczną, szczególnie w dłuższej perspektywie czasowej (Gondek i in., 2014)³.

Z punktu widzenia prowadzenia produkcji roślinnej, kluczowe jest również ograniczanie kosztów oraz optymalizacja zużycia nawozów i wody. Zagospodarowanie odcieku jako nawozu dolistnego pozwala zminimalizować jego niekontrolowane odprowadzanie do środowiska, co zmniejsza ryzyko eutrofizacji zbiorników wodnych i degradacji ekosystemów wodnych. Wykorzystanie takiego materiału w rolnictwie gruntowym umożliwia częściowy odzysk cennych pierwiastków, ograniczając tym samym presję na zasoby naturalne i redukując emisję substancji biogennych do środowiska.

W kontekście zrównoważonego rozwoju oraz strategii rolnictwa regeneratywnego, takie praktyki należy uznać za pożądane i zgodne z aktualnymi trendami proekologicznymi. Ich wdrażanie może przyczynić się do zmniejszenia zużycia nawozów syntetycznych, a tym samym wpłynąć na poprawę bilansu ekologicznego gospodarstw.

W literaturze naukowej wskazuje się również na potencjał wykorzystania odcieków oraz ścieków pochodzących z upraw hydroponicznych jako alternatywy dla tradycyjnych nawozów mineralnych. Przykładowo, Badillo-Amador i in. (2020)⁴ opisali możliwość zastosowania odcieków po uprawie pomidora w systemach bezglebowych jako źródła składników

³ Gondek, K., Kopeć, M., Baran, A. (2014). Wpływ stosowania materiałów odpadowych na właściwości chemiczne gleby oraz plonowanie pszenicy. *Acta Agrophysica*, 21(1), 43–56

⁴ Badillo-Amador, L., Medina, L.A., García-Barragán, J.C., & Hernández-Rodríguez, A. (2020). Nutrient reuse from hydroponic tomato drain water for cereal crop irrigation. *Agricultural Water Management*, 241, 106338. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106338>



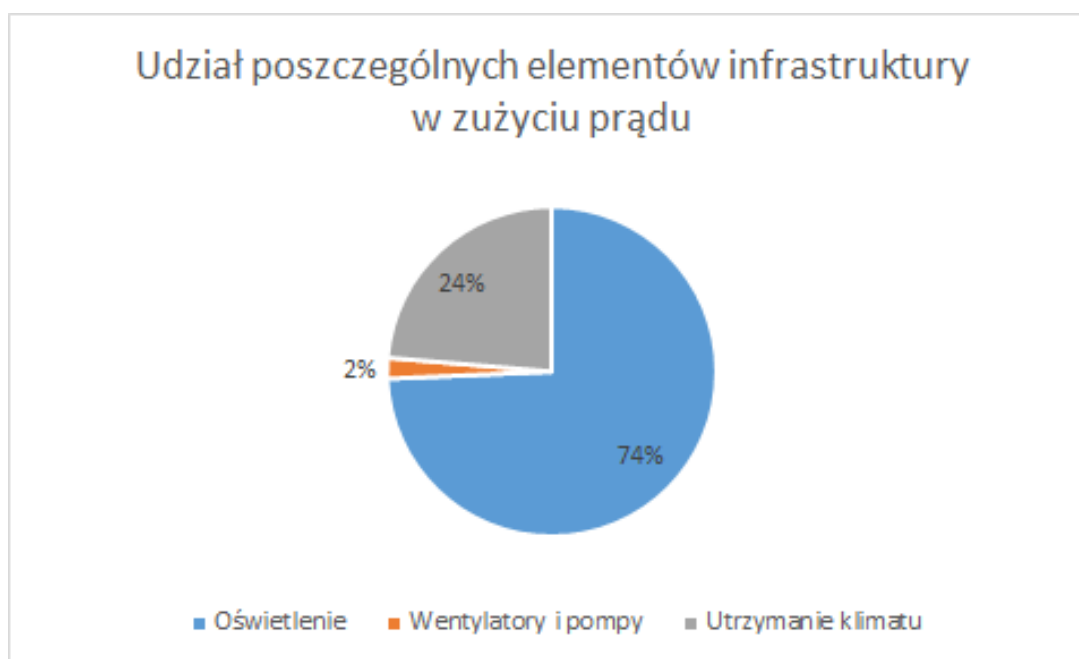
pokarmowych w uprawach roślin zbożowych. Z kolei Khalid i in. (2022)⁵, potwierdzili, że ponowne wykorzystanie odcieków z systemów bezglebowych w uprawie glebowej może być efektywnym sposobem zagospodarowania tych roztworów, bez negatywnego oddziaływania na środowisko. W świetle dostępnych danych, zastosowanie odcieku jako nawozu należy traktować jako rozwiązanie zgodne z zasadami zrównoważonego rolnictwa, które wspiera efektywne gospodarowanie zasobami, ogranicza ilość odpadów oraz przyczynia się do ochrony jakości gleb i wód.

⁵ Khalid, A., Shah, G.M., & Hussain, M. (2022). Recycling of nutrient-rich drain water from soilless culture: Impacts on crop performance and environment. *Environmental Technology & Innovation*, 26, 102386. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102386>



5.6. Wpływ oświetlenia na ekonomię uprawy

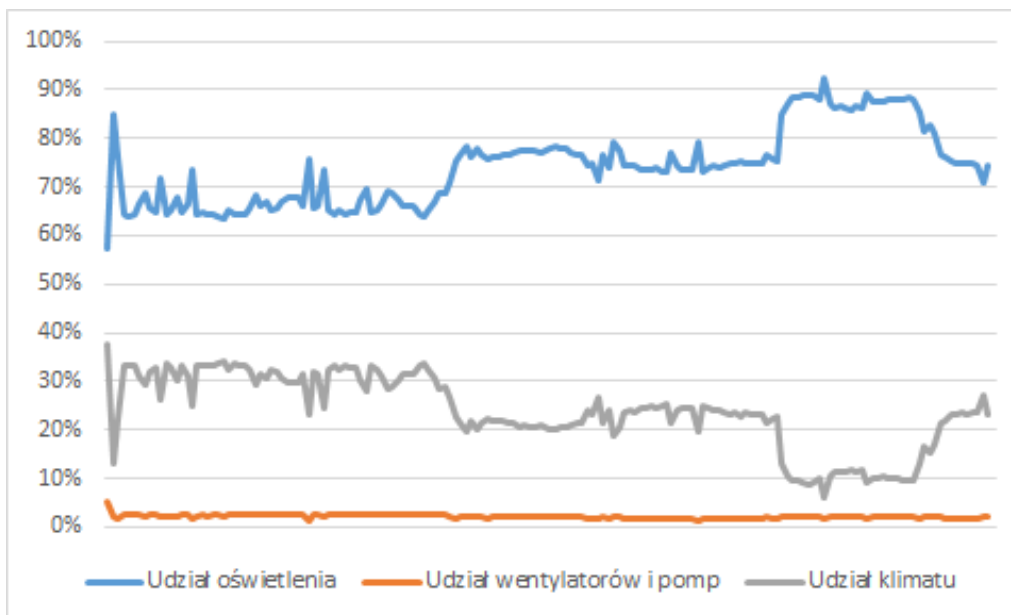
W ramach realizacji projektu przeprowadzono szczegółową analizę struktury zużycia energii elektrycznej w środowisku kontrolowanym, typowym dla nowoczesnych farm wertykalnych. W celu uzyskania precyzyjnych danych, na etapie wdrożenia innowacji technologicznej zainstalowano szereg liczników umożliwiających niezależny pomiar poboru prądu przez poszczególne elementy infrastruktury. Każdy z kluczowych komponentów – zarówno związanych z procesem produkcyjnym, jak i utrzymaniem optymalnych warunków wegetacji – został objęty monitoringiem energetycznym, co pozwoliło na rzetelną ocenę udziału poszczególnych systemów w całkowitym zużyciu energii.



Na podstawie zebranych danych, dla całego okresu badań, wyodrębniono trzy główne kategorie odpowiadające za konsumpcję energii elektrycznej. Największy udział, wynoszący aż 74%, przypisano do systemu oświetlenia, co jednoznacznie potwierdza, że źródła światła (w tym moduły LED o zmiennym spektrum) stanowią kluczowy komponent kosztotwórczy w uprawach wertykalnych prowadzonych w środowisku kontrolowanym. Drugim istotnym obszarem, choć znacząco mniejszym pod względem udziału energetycznego, jest system utrzymywania klimatu (m.in. systemy grzewcze, chłodzące, osuszające), który odpowiadał za 24% całkowitego zużycia prądu. Natomiast najmniejszy udział odnotowano w przypadku zintegrowanego systemu pomp, wentylatorów oraz urządzeń dozujących nawozy, którego udział w strukturze zużycia energii wyniósł zaledwie 2%. Tak wyraźna dysproporcja wskazuje, że działania optymalizacyjne w zakresie efektywności energetycznej farm wertykalnych powinny koncentrować się przede wszystkim na technologiach związanych z oświetleniem



oraz zarządzaniem klimatem, jako elementach o największym potencjale redukcji kosztów operacyjnych.



Analiza szczegółowych danych dotyczących struktury zużycia energii elektrycznej w farmie wertykalnej, uzyskanych dzięki zastosowaniu rozbudowanego systemu pomiarowego, potwierdza dominującą rolę oświetlenia jako głównego konsumenta energii. W większości zarejestrowanych okresów badawczych udział oświetlenia w całkowitym zużyciu prądu wahał się między 64% a 78%, osiągając w niektórych przypadkach nawet ponad 90%, co jednoznacznie wskazuje na jego kluczowe znaczenie w kosztach operacyjnych upraw wertykalnych. Systemy wentylacji, pomp i dozowania nawozów charakteryzowały się stabilnym, niskim poziomem zużycia, utrzymującym się na poziomie 1–3%. Natomiast udział energii przeznaczonej na utrzymanie klimatu był zmienny i zależny od warunków zewnętrznych oraz specyfiki prowadzonej uprawy, oscylując najczęściej w przedziale 20–34%, choć odnotowano również skrajne przypadki pełnego zużycia na potrzeby klimatyzacji. Dane te podkreślają potrzebę dalszej optymalizacji systemów oświetleniowych oraz zarządzania klimatem w celu redukcji kosztów energii.

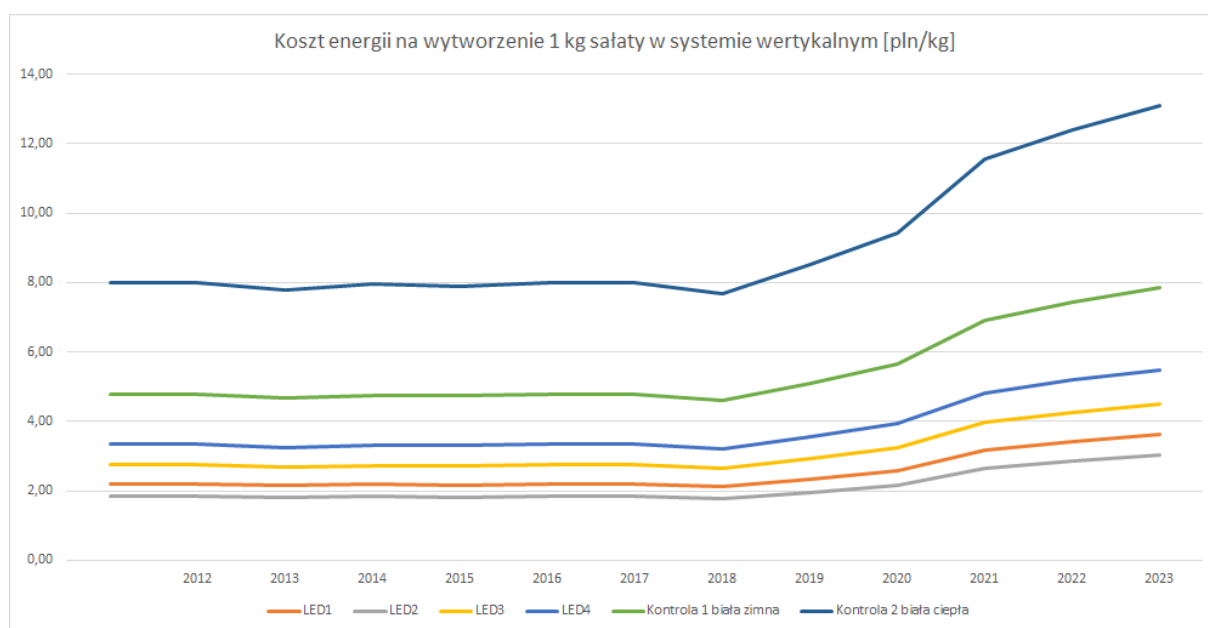
Na podstawie tej struktury, ustalono że dla obliczenia ekonomiki uprawy można założyć stały narzut na ilość energii zużywanej na pompy i klimat względem oświetlenia. Dzięki temu można przedstawić układ odpowiadający głównej zmiennej produkcyjnej, którą były różne systemy oświetlenia.

Wzór na ekonomiczność różnych rodzajów oświetlenia wynosi:

$$\frac{[\text{ilość energii zużywana na oświetlenie m}^2 \text{ w danym systemie} \times \text{narzut na zużycie energii} \times \text{liczba dni produkcyjnych} \times \text{liczba godzin oświetlenia dziennie} \times \text{cena energii}]}{[\text{ilość sztuk sałaty na m}^2 \times \text{waga sałaty}]}$$



Tak przedstawiony wzór daje nam bardzo dobrą jednostkę do porównywania ekonomiczności różnych systemów oświetlenia farm wertykalnych – koszt energii w złotych na kilogram wyprodukowanej sałaty [zł / kg] uwzględniając zarówno efektywność energetyczną jak i efektywność przyrostów. Dla potrzeb wizualizacji graficznej przedstawiono zmienność kosztów energii elektrycznej dla wytworzenia 1 kg sałaty w systemie wertykalnym na podstawie średniorocznych cen energii prezentowanych przez Urząd Regulacji Energetyki. Wyraźnie widać, że rozwój systemu ETS związany z kosztami klimatycznymi produkcji energii może być jednym z największych wyzwań dla producentów w systemie wertykalnym w nadchodzących latach. W ciągu trwania projektu cena energii elektrycznej wzrosła o ponad 13,4%.



Wprowadzenie technologii oświetleniowych w systemach upraw wertykalnych stanowi jeden z kluczowych czynników wpływających na ekonomikę produkcji, szczególnie w kontekście rosnących cen energii elektrycznej. Dane przedstawiające koszty energii przypadające na wytworzenie 1 kg sałaty w latach 2012–2024 dla różnych typów oświetlenia LED oraz tradycyjnych źródeł światła (kontrola biała zimna i ciepła) pozwalają na szczegółową ocenę efektywności poszczególnych rozwiązań technologicznych.

Analiza wykazuje, że technologie LED, niezależnie od zastosowanego wariantu, znacząco przewyższają tradycyjne systemy oświetleniowe pod względem efektywności energetycznej. Spośród wszystkich badanych wariantów, najniższe koszty eksploatacyjne generował system oznaczony jako LED2, którego koszt wytworzenia 1 kg sałaty w początkowych latach oscylował wokół 1,84 PLN/kg, a w 2024 roku wyniósł 3,02 PLN/kg. W całym analizowanym okresie LED2 konsekwentnie utrzymywał pozycję najbardziej ekonomicznego rozwiązania, co



wskazuje na jego optymalny balans pomiędzy zużyciem energii a efektywnością fotosyntetyczną dla uprawianej sałaty.

Technologie LED1 i LED3 również charakteryzowały się relatywnie korzystnym poziomem kosztów w porównaniu do tradycyjnych źródeł światła, choć ich wartości były wyższe niż w przypadku LED2. W 2024 roku koszt energii dla LED1 wyniósł 3,61 PLN/kg, a dla LED3 – 4,50 PLN/kg. Należy jednak zauważyć, że LED1 utrzymywał przez wiele lat stabilny poziom kosztów, co może świadczyć o jego odporności na wahania cen energii i wysoką trwałość komponentów oświetleniowych.

Z kolei LED4, mimo że nadal przewyższał opłacalnością tradycyjne systemy oświetlenia, generował wyraźnie wyższe koszty – w 2024 roku osiągając poziom 5,47 PLN/kg. Może to sugerować, że LED4, choć potencjalnie korzystny pod względem innych parametrów (np. jakości plonu, zawartości substancji bioaktywnych), wymaga większych nakładów energetycznych, co ogranicza jego konkurencyjność w kontekście stricte ekonomicznym.

Porównując technologie LED do systemów kontrolnych opartych na tradycyjnych źródłach światła, różnice stają się jeszcze bardziej wyraźne. Kontrola 1 (biała zimna) oraz Kontrola 2 (biała ciepła) od początku okresu analizy cechowały się znacząco wyższymi kosztami energii. W 2012 roku koszt wytworzenia 1 kg sałaty przy użyciu białego zimnego światła wynosił 4,79 PLN/kg, natomiast dla światła białego ciepłego było to aż 7,99 PLN/kg. Wraz ze wzrostem cen energii elektrycznej, do 2024 roku wartości te wzrosły odpowiednio do 7,86 PLN/kg oraz 13,11 PLN/kg. Wzrost ten wyraźnie przewyższa dynamikę kosztów obserwowaną w technologiach LED, co potwierdza ich przewagę pod względem energooszczędności.

Wnioski płynące z analizy są jednoznaczne – inwestycja w systemy oświetlenia LED, szczególnie w warianty zoptymalizowane pod kątem efektywności energetycznej, takie jak LED2, mogłaby stanowić kluczowy czynnik poprawiający rentowność produkcji w farmach wertykalnych. Przy obecnych trendach rynkowych oraz polityce energetycznej, technologie LED nie tylko pozwalają na redukcję kosztów operacyjnych, ale również wpisują się w strategię zrównoważonego rozwoju poprzez zmniejszenie śladu węglowego.

Dodatkowo, warto zauważyć, że choć różnice pomiędzy poszczególnymi wariantami LED są istotne z punktu widzenia kosztów energii, wybór odpowiedniego systemu powinien uwzględniać także inne aspekty, takie jak wpływ na tempo wzrostu roślin, jakość plonu czy zawartość składników odżywczych. W niektórych przypadkach, technologie o nieco wyższych kosztach energetycznych (np. LED3 czy LED4) mogą oferować dodatkowe korzyści jakościowe, które zrekompensują wyższe nakłady poprzez lepszą cenę rynkową produktu końcowego.



Na podstawie przeprowadzonych badań można jednoznacznie stwierdzić, że technologie oświetleniowe LED1 i LED2 nie tylko znacząco obniżały koszty energii elektrycznej w produkcji sałaty w systemie wertykalnym, ale również zapewniały lepsze parametry jakościowe uzyskanego produktu, który może potencjalnie przyczynić się do wyższej wartości rynkowej:

1. Świeża masa i kondycja roślin: Wariant LED1 (RW) wykazał wzrost masy liści aż o 46% w porównaniu do kontroli. Dodatkowo odnotowano poprawę sztywności, wyrównania oraz ogólnej kondycji roślin, co świadczy o wyższej jakości handlowej i lepszej trwałości pozbiorczej produktu

2. Zawartość suchej masy: W przypadku LED1 – RW zanotowano wzrost suchej masy o 18,9% względem kontroli, co oznacza większe nagromadzenie substancji organicznych, takich jak białka, cukry i związki bioaktywne. To przekłada się na lepszą wartość odżywczą oraz dłuższą trwałość przechowalniczą sałaty

3. Cechy sensoryczne: Oświetlenie LED1 znacząco poprawiało również walory smakowe – zwiększając intensywność smaku słodkiego o 67,5% oraz poprawiając ogólną pożądalność produktu o 48,1%. Tego typu zmiany wpływają bezpośrednio na akceptację konsumencką i konkurencyjność rynkową. Wariant LED2 (RWFR) również wykazał korzystne właściwości:

Poprawa struktury liści, w tym ich kruchości i twardości, co zwiększało wartość użytkową sałaty.

Ogólna ocena sensoryczna wzrosła o 43,4% w porównaniu do kontroli, co wskazuje na wysoką jakość organoleptyczną produktu. Podsumowując proponowane rozwiązania wykazały się względem kontroli zarówno mniejszym zapotrzebowaniem na energię elektryczną jak i lepszymi walorami konsumenckimi.



6. Wytworzenie innowacji

Wpływ wytworzonej innowacji na wzrost i jakość produktu

Innowacja organizacyjna: brak wpływu negatywnego na jakość i plon pszenicy po zastosowaniu odcieku na 2 poziomach dawek. Wpływ odcieku na glebę został wykazany w badaniach glebowych po zakończonym sezonie uprawowym. Niewielkie różnice w pH i zalecenia wapnowania nie wskazują na istotne pogorszenie stanu i właściwości fizykochemicznych gleby.

6.1. Innowacja organizacyjna: Stworzenie aplikacji umożliwiającej symulację i analizę optymalnego oświetlenia dla danej uprawy z uwzględnieniem różnego spektrum barw

6.1.1. Opis ogólny

W ramach realizacji projektu utworzona została aplikacja z modułem Lampy wyposażonym w funkcje umożliwiające symulację i analizę optymalnego oświetlenia dla wybranej uprawy. Narzędzie to wspiera planowanie, zarządzanie i kontrolowanie parametrów oświetleniowych w uprawach prowadzonych na obszarach zamkniętych.

Użytkownik aplikacji może wygenerować szacunkową estymację oszczędności energetycznych, przeprowadzić symulację wpływu różnych zestawów lamp na rozwój roślin, a także ocenić efektywność zastosowanych rozwiązań świetlnych. Dzięki temu możliwe jest podjęcie racjonalnych decyzji dotyczących doboru oświetlenia pod kątem ekonomicznym i środowiskowym.

Aplikacja działa w trybie online i posiada nowoczesny, interaktywny interfejs, który ułatwia poruszanie się po systemie i korzystanie z dostępnych funkcji.

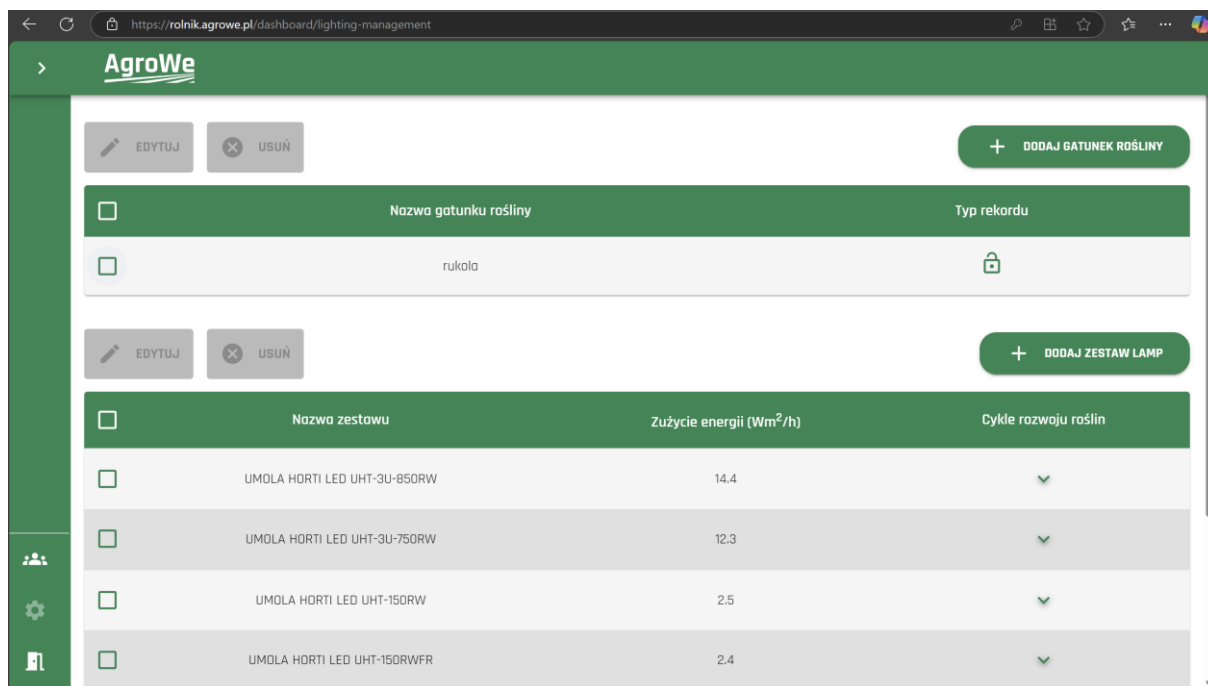
Aplikacja dostępna online

Aplikacja dostępna jest online. Każdy użytkownik może założyć indywidualne konto, które umożliwia pełny dostęp do wszystkich modułów i funkcji systemu.

Po zalogowaniu użytkownik trafia na główny ekran aplikacji (Rysunek 98). Moduł Lampy, przeznaczony do analizy i symulacji oświetlenia dla danej uprawy (Rysunek 99).



Rysunek 98. Główny widok aplikacji AgroWe App. Odnośnik do modułu Lampy widoczny w pasku po lewej stronie.



Rysunek 99. Widok modułu Lampy w aplikacji AgroWe.



6.1.2. Dane dotyczące oświetlenia

W module „Lampy” zaimplementowano funkcję umożliwiającą użytkownikowi wprowadzanie danych dotyczących możliwych do stosowania źródeł oświetlenia. Użytkownik może określić gatunki roślin, przy których wykorzystywane są poszczególne lampy, a także podać nazwy zestawów oświetleniowych i ich zużycie energii. Dzięki temu możliwe jest tworzenie spersonalizowanych konfiguracji oświetlenia dopasowanych do konkretnych upraw. Widok modułu z wprowadzonymi danymi (Rysunek 100). Użytkownik definiuje również cykl rozwoju rośliny dla każdego zestawu lamp, poprzez określenie wagi roślin w kolejnych dniach uprawy (Rysunek 101).

The screenshot shows the 'Lampy' module in the AgroWe application. The interface is divided into a sidebar on the left with navigation icons, a top bar with the AgroWe logo, and a main content area. The main content area contains two tables. The first table, titled 'Nazwa gatunku rośliny', lists two plant species: 'rukola' and 'papryka'. Each row has a checkbox on the left and a 'Typ rekordu' column on the right. Above this table are buttons for 'EDYTUJ' (Edit) and 'USUŃ' (Delete), and a '+ DODAJ GATUNEK ROŚLINY' (Add plant species) button. The second table, titled 'Nazwa zestawu', lists three lamp sets: 'UMOLA HORTI LED UHT-3U-850RW', 'UMOLA HORTI LED UHT-3U-750RW', and 'UMOLA HORTI LED UHT-150RW'. Each row has a checkbox on the left, a 'Zużycie energii (Wm²/h)' column with values 14.4, 12.3, and 2.5 respectively, and a 'Cykle rozwoju roślin' column with dropdown arrows. Above this table are buttons for 'EDYTUJ' (Edit) and 'USUŃ' (Delete), and a '+ DODAJ ZESTAW LAMP' (Add lamp set) button.

Nazwa gatunku rośliny	Typ rekordu
☐ rukola	
☐ papryka	

Nazwa zestawu	Zużycie energii (Wm²/h)	Cykle rozwoju roślin
☐ UMOLA HORTI LED UHT-3U-850RW	14.4	
☐ UMOLA HORTI LED UHT-3U-750RW	12.3	
☐ UMOLA HORTI LED UHT-150RW	2.5	

Rysunek 100. Widok modułu Lampy w aplikacji AgroWe.



Rysunek 101. Widok modułu Lampy w aplikacji AgroWe po zdefiniowaniu cyklu rozwoju roślin.

6.1.3. Symulacja - porównywanie zestawów oświetlenia

Wybór zestawów do porównania

Dzięki aplikacji użytkownik ma możliwość przeprowadzenia symulacji, która wspiera wybór optymalnego oświetlenia dla konkretnej uprawy. Funkcjonalność ta umożliwia dobór odpowiednich warunków świetlnych sprzyjających rozwojowi roślin oraz zaprojektowanie systemu oświetleniowego w sposób minimalizujący zużycie energii, koszty środowiskowe i finansowe. Aplikacja działa w trybie online, co pozwala na wygodne korzystanie z niej w dowolnym miejscu i czasie.

Zespół programistyczny wdrożył funkcję umożliwiającą porównywanie zestawów oświetleniowych spośród wcześniej zapisanych pozycji. Rysunek 102 przedstawia widok modułu „Lampy” w aplikacji AgroWe po dodaniu wybranych lamp do porównania – w przykładzie pokazano zestawy możliwe do zastosowania w uprawie papryki.



AgroWe

Porównanie

Uprawa: papryka

Wczytaj

Eksport do CSV

Usuń

Zestaw lamp: UMOLA HORTI LED UHT-3U-850RW

Stosowana uprawa: papryka

Zużycie energii (W/h): 14.4

Powierzchnia (m²): 2.8

☒	Nazwa zestawu	Zużycie energii (Wm²/h)	Koszt inwestycji na m²	Cykle rozwoju roślin
☒	UMOLA HORTI LED UHT-3U-750RW	12.3	Koszt w zł/m²: 496	▼
☒	UMOLA HORTI LED UHT-150RW	2.5	Koszt w zł/m²: 380	▼

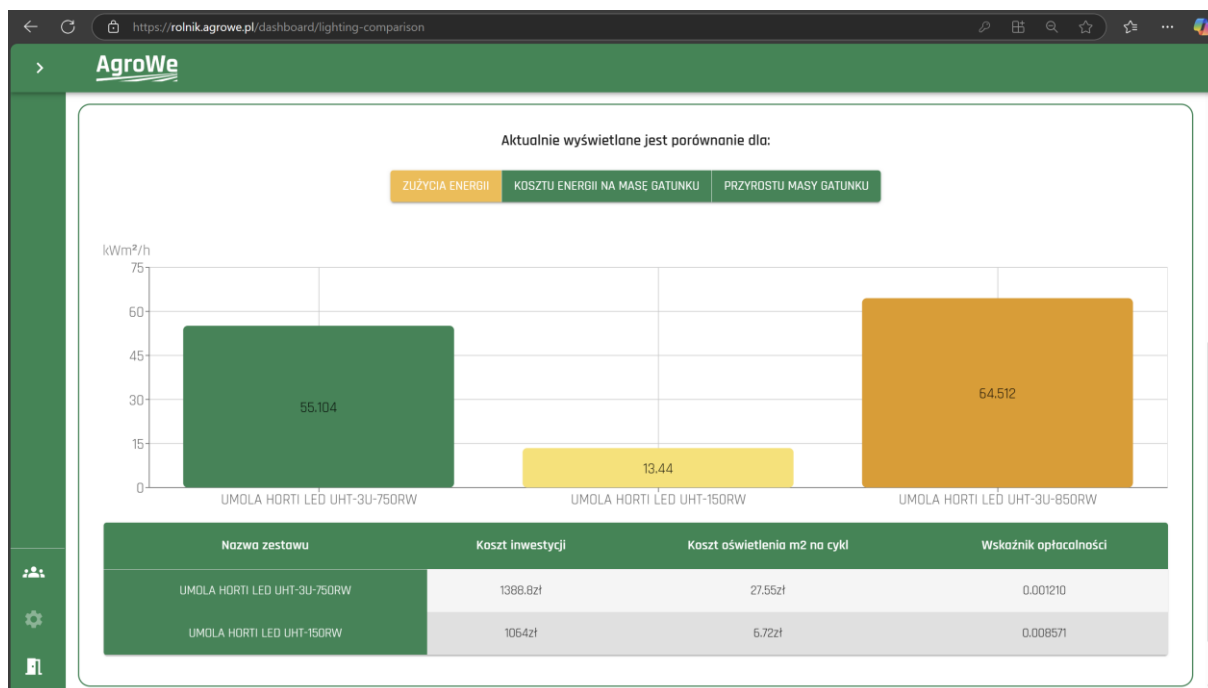
Aktualny koszt energii (kW/h): 0.50

GENERUJ PORÓWNANIE

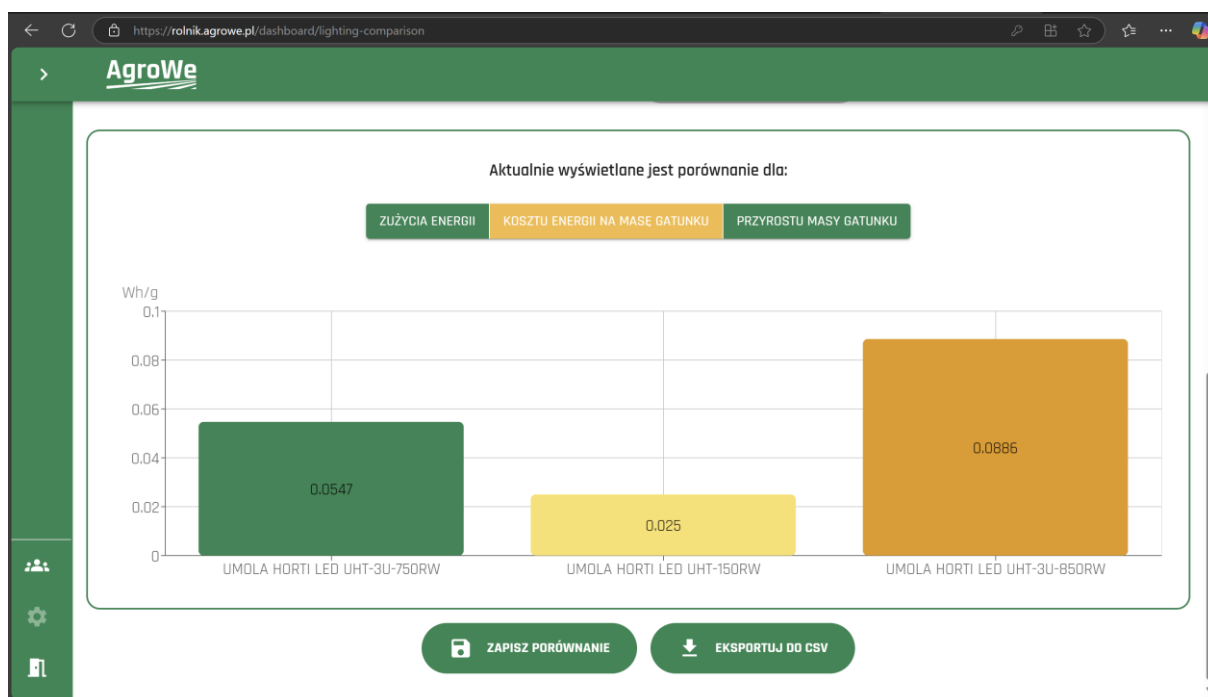
Rysunek 102. Widok modułu Lampy w aplikacji AgroWe po dodaniu zestawów lamp do porównania.

Estymacja możliwych oszczędności

Aplikacja, po przetworzeniu wprowadzonych danych, prezentuje m.in. informacje dotyczące zużycia energii oraz powiązanych z tym kosztów dla różnych zestawów lamp. Generowany jest wykres zużycia energii ogółem (Rysunek 103) oraz zużycia energii w stosunku do 1g przyrostu masy rośliny (Rysunek 104) dla wszystkich porównywanych lamp. Dzięki temu użytkownik może łatwo zidentyfikować potencjalne oszczędności energetyczne wynikające z zastosowania konkretnego rozwiązania oświetleniowego. Funkcja ta umożliwia rolnikowi ocenę opłacalności danej technologii w kontekście jego indywidualnych warunków uprawowych. Dane prezentowane są w formie przejrzystych i intuicyjnych wykresów, co ułatwia ich interpretację i wspiera proces podejmowania decyzji.



Rysunek 103. Widok wykresu zużycia energii ogółem dla trzech porównywanych lamp.



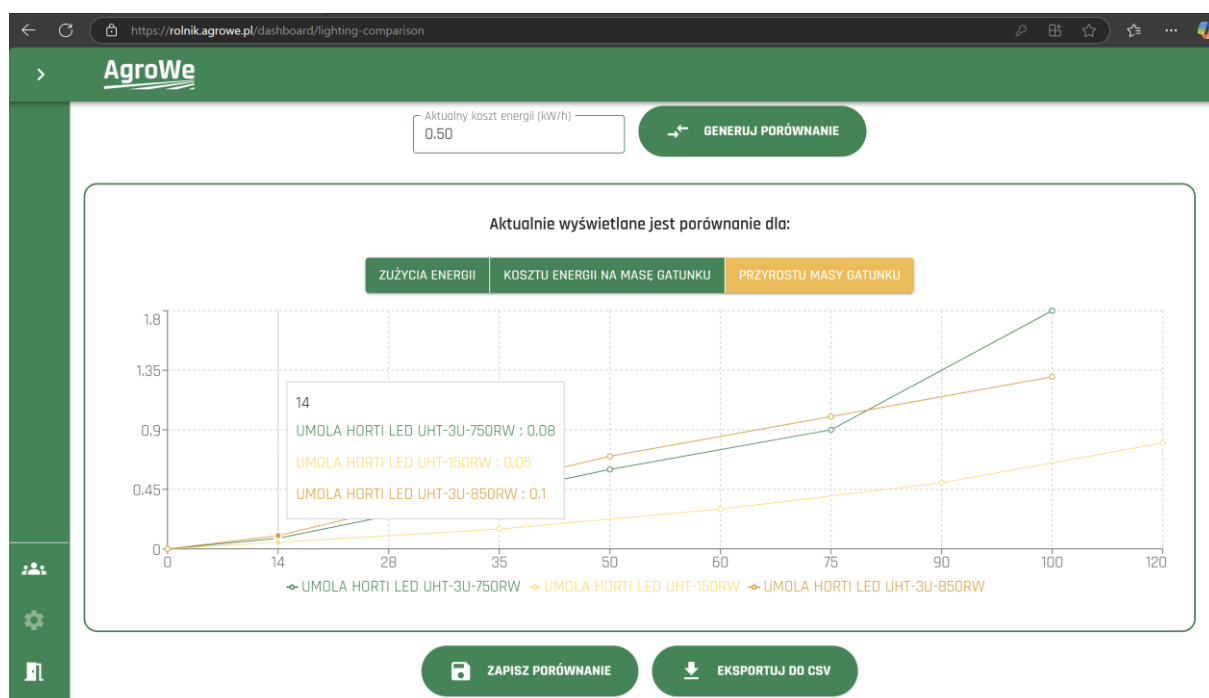
Rysunek 104. Widok wykresu zużycia energii na 1g masy rośliny dla trzech porównywanych lamp.



Analiza efektywności oświetlenia

Aplikacja umożliwia również porównywanie efektywności różnych zestawów oświetleniowych oraz ocenę ich wpływu na tempo rozwoju roślin. Jedną z kluczowych funkcjonalności jest możliwość analizy przyrostu masy danego gatunku (wyrażonego w kg/dzień) w zależności od zastosowanego źródła światła.

Wyniki porównania prezentowane są w formie czytelnego wykresu, przykład porównania efektywności oświetlenia w odniesieniu do przyrostu masy rośliny (Rysunek 105).



Rysunek 105. Widok porównania źródeł światła wygenerowanego na podstawie tempa przyrostu masy.

6.2. Innowacja technologiczna w zakresie doboru światła do wspomagania rozwoju roślin

Wytworzenie ulepszonej innowacji technologicznej w zakresie optymalizacji spektrum światła dla upraw w środowisku kontrolowanym było efektem kompleksowych badań prowadzonych w ramach projektu, którego celem było zwiększenie efektywności produkcji roślinnej poprzez precyzyjne dostosowanie warunków świetlnych do potrzeb fizjologicznych roślin. W odpowiedzi na rosnące wymagania rynku oraz wyzwania związane z ograniczoną dostępnością światła naturalnego w uprawach pod osłonami, opracowano nowatorską metodologię doświetlania roślin, opartą na zmiennym widmie światła generowanego przez lampy LED.

Założono, że każda roślina posiada unikalne wymagania fotosyntetyczne, a odpowiednio dobrane spektrum światła może nie tylko wspierać wzrost biomasy, ale również poprawiać



cechy jakościowe plonów, takie jak zawartość suchej masy, intensywność barwy, smak czy trwałość pozbiorną. W ramach projektu przeprowadzono szerokie badania na sałacie, rukoli, truskawce oraz różnych sadzonkach, wykorzystując cztery warianty lamp LED o zróżnicowanym składzie spektralnym (LED1 – RW, LED2 – RWFR, LED3 – RB, LED4 – BW) oraz dwa warianty kontrolne.

Badania obejmowały zarówno etap laboratoryjny, jak i testy w warunkach rzeczywistych na farmach wertykalnych oraz w tunelach foliowych. Analizowano wpływ różnych konfiguracji światła na tempo wzrostu, liczbę cykli produkcyjnych, jakość plonów i efektywność energetyczną. Szczególną uwagę zwrócono na znaczenie światła czerwonego i niebieskiego w procesach fotosyntezy i fotomorfogenezy. Zastosowanie wariantu LED1, z przewagą czerwieni, umożliwiło uzyskanie wzrostu masy liści sałaty o 46% oraz poprawę cech sensorycznych.

Wariant LED2, wzbogacony o daleką czerwień, okazał się najkorzystniejszy w produkcji truskawek, wspierając kwitnienie oraz zwiększając zawartość cukrów w owocach. W przypadku rukoli, odpowiednio dobrane widmo światła pozwoliło osiągnąć pożądany aromat i strukturę liści w krótszym czasie wegetacji.

Istotnym elementem innowacji było opracowanie dynamicznej metodologii zarządzania światłem, umożliwiającej dostosowanie parametrów oświetlenia. W trakcie badań wykazano, że odpowiednie wykorzystanie widma LED pozwalało na skrócenie cyklu uprawy sałaty nawet o kilka dni do osiągnięcia porządkanych zbiorów, co w skali rocznej umożliwiało uzyskanie dodatkowych zbiorów.

Podsumowując, wytworzona innowacja technologiczna w zakresie wykorzystania optymalnego spektrum światła stanowi kompleksowe rozwiązanie łączące wiedzę z zakresu fizjologii roślin, technologii LED oraz zarządzania środowiskiem kontrolowanym. Wyniki badań potwierdziły, że innowacja ta przyczynia się do zwiększenia plonów, poprawy jakości produktów oraz obniżenia kosztów energetycznych. Dzięki swojej uniwersalności może być z powodzeniem stosowana w gospodarstwach ogrodniczych, farmach wertykalnych oraz w produkcji sadzonek, zapewniając wymierne korzyści ekonomiczne i środowiskowe.

6.3. Innowacja technologiczna w zakresie wytworzenia systemu oświetlenia

Wytworzenie innowacyjnego systemu oświetlania stanowiło kluczowy element projektu, będący kontynuacją prac nad optymalizacją spektrum światła wspomagającego wzrost roślin w środowisku kontrolowanym. W przeciwieństwie do wcześniejszych działań skupiających się na doborze parametrów świetlnych, ta innowacja technologiczna koncentrowała się na stworzeniu kompleksowego systemu infrastrukturalnego, umożliwiającego efektywne i ekonomiczne wdrożenie wypracowanych rozwiązań w praktyce produkcyjnej.



Punktem wyjścia była analiza ograniczeń stosowanych dotychczas technologii oświetleniowych w uprawach pod osłonami i farmach wertykalnych. Tradycyjne systemy, nie zapewniały wystarczającej elastyczności w dynamicznej regulacji widma światła, a ich konstrukcja generowała wysokie koszty instalacji i eksploatacji. Celem konsorcjum było opracowanie systemu dostarczającego światło o precyzyjnie dobranych parametrach przy jednoczesnej minimalizacji zużycia energii i kosztów infrastrukturalnych.

Proces tworzenia innowacji rozpoczął się od zaprojektowania modułowych paneli LED, wyposażonych w diody emitujące światło w zakresach fal dostosowanych do wymagań różnych gatunków roślin. Technologia sterowania spektrum pozwoliła na dynamiczne dostosowywanie proporcji fal świetlnych w trakcie cyklu wzrostu, co umożliwiało pełne dopasowanie systemu do potrzeb roślin.

Kluczowym elementem było wdrożenie inteligentnego systemu zarządzania oświetleniem, pozwalającego na dostosowanie pracy lamp w zależności od potrzeb użytkownika. Stworzony system został zintegrowany z aplikacją mobilną, umożliwiającą zdalne sterowanie i monitorowanie zużycia energii w czasie rzeczywistym. Dzięki zastosowaniu czujników i sterowników, zoptymalizowano czas pracy lamp oraz ich natężenie, co przyczyniło się do istotnej redukcji kosztów energetycznych w porównaniu do standardowych rozwiązań.

Podczas testów przeprowadzonych w różnych warunkach badawczych potwierdzono, że nowy system umożliwia osiągnięcie wysokich parametrów produkcji roślinnej przy jednoczesnym ograniczeniu zapotrzebowania na energię. W przypadku sałaty uprawianej pod systemem opartym na panelach LED1 i LED2 odnotowano zwiększenie masy liści, poprawę cech sensorycznych oraz obniżenie jednostkowego zużycia energii na kilogram plonu, co potwierdziło efektywność ekonomiczną opracowanego rozwiązania.

Istotnym aspektem technicznym było również zoptymalizowanie konstrukcji systemu poprzez zastosowanie lekkich, modułowych elementów, które umożliwiają łatwą adaptację do różnych typów upraw, takich jak regały wertykalne, tunele foliowe czy szklarnie. Elastyczność tego rozwiązania sprawia, że może być ono wdrażane zarówno w dużych gospodarstwach, jak i mniejszych jednostkach produkcyjnych, co zwiększa jego potencjał komercjalizacji.

Podsumowując, wytworzony innowacyjny system infrastruktury oświetleniowej stanowi kompleksowe i nowoczesne rozwiązanie, które łączy wyniki badań z praktycznymi potrzebami producentów rolnych. System zapewnia nie tylko optymalne warunki świetlne dla wzrostu roślin, ale również wysoką efektywność energetyczną oraz niskie koszty eksploatacji. Dzięki inteligentnym mechanizmom sterowania i modularnej budowie, innowacja wpisuje się w



założenia rolnictwa precyzyjnego i zrównoważonego, oferując wymierne korzyści ekonomiczne i środowiskowe.

Konsorcjum projektowe potwierdziło wytworzenie systemu, który może być wdrażany jako nowy standard w nowoczesnych uprawach prowadzonych w środowisku kontrolowanym. Rozwiązanie to umożliwia producentom zwiększenie konkurencyjności poprzez obniżenie kosztów operacyjnych oraz podniesienie jakości finalnych produktów.

6.4. Ulepszona innowacja technologiczna w zakresie zagospodarowania odcieku z produkcji truskawek tunelowych

W ramach projektu została wytworzona ulepszona innowacja technologiczna, której celem było opracowanie skutecznej metody zagospodarowania wody odpływającej z procesów fertygacji w uprawach prowadzonych w środowisku kontrolowanym. Woda ta, bogata w makro- i mikroelementy, stanowiła dotychczas produkt uboczny, który w praktyce rolniczej najczęściej był traktowany jako odpad. Projekt skoncentrował się na przekształceniu tego odpływu w pełnowartościowy surowiec wspierający nawożenie upraw polowych, zgodnie z ideą gospodarki o obiegu zamkniętym.

Punktem wyjścia dla opracowania innowacji była obserwacja, że w nowoczesnych systemach upraw pod osłonami, zwłaszcza w przypadku truskawki, proces precyzyjnego nawadniania generuje znaczne ilości przelewu pożywki nawozowej. Pożywka ta, mimo że nie nadawała się do ponownego wykorzystania w zamkniętych systemach uprawowych ze względu na ryzyko kumulacji soli i patogenów, zawierała cenne składniki odżywcze, takie jak azot, fosfor, potas, wapń oraz mikroelementy. W związku z tym podjęto działania zmierzające do przetestowania różnych metod wykorzystania tego odpływu w produkcji rolniczej.

W ramach badań przeprowadzono serię doświadczeń polowych, w których odciek z fertygacji został zastosowany jako nawóz dolistny oraz doglebowy w uprawach gruntowych, m.in. w pszenicy ozimej. Testowano różne dawki aplikacyjne, analizując wpływ tego rozwiązania na plonowanie oraz jakość uzyskanych roślin. Wyniki potwierdziły, że choć zastosowanie odcieku nie powodowało istotnego wzrostu plonów w krótkim okresie, to przynosiło szereg korzyści agronomicznych i środowiskowych. Innowacja technologiczna objęła również opracowanie procedur monitorowania wegetacji roślin na których stosowano odciek.

Dzięki wytworzonej innowacji możliwe stało się ograniczenie marnotrawstwa zasobów oraz zmniejszenie zapotrzebowania na nawozy mineralne, co bezpośrednio przekłada się na obniżenie kosztów produkcji oraz redukcję negatywnego wpływu na środowisko. Wykorzystanie odcieku pozwoliło także na ograniczenie ryzyka związanego z niekontrolowanym odprowadzaniem pozostałości nawozowych do wód gruntowych i



powierzchniowych, co wpisuje się w założenia zrównoważonego rolnictwa i ochrony ekosystemów wodnych.

Podsumowując, wytworzona w ramach projektu ulepszona innowacja technologiczna potwierdziła swoją skuteczność jako rozwiązanie wspierające efektywne gospodarowanie produktami ubocznymi z upraw w środowisku kontrolowanym. Opracowana technologia umożliwia rolnikom racjonalne wykorzystanie zasobów, zwiększając jednocześnie bezpieczeństwo środowiskowe prowadzonej działalności rolniczej. Innowacja ta ma wysoki potencjał wdrożeniowy, zarówno w gospodarstwach specjalizujących się w uprawach pod osłonami, jak i w produkcji polowej, stanowiąc przykład praktycznego zastosowania zasad gospodarki cyrkularnej w rolnictwie.



7. Perspektywa dalszego rozwoju i rekomendacja działań:

Na podstawie wyników operacji oraz zgromadzonych doświadczeń, możliwe jest wskazanie szeregu obszarów, w których uzyskana wiedza oraz technologie opracowane w ramach projektu mogłyby zostać skutecznie wykorzystane lub stanowić punkt wyjścia dla kolejnych działań badawczo-rozwojowych i wdrożeniowych. Pierwszym z takich obszarów jest produkowanie rozsady w środowisku kontrolowanym – coraz dynamiczniej rozwijający się sektor upraw tunelowych, w tym zwłaszcza rosnące zapotrzebowanie na uprawy owoców jagodowych, będzie wymagał zabezpieczenia dostępu do wysokojakościowych sadzonek. Zastosowanie optymalnych warunków świetlnych, identyfikowanych w niniejszym projekcie, w produkcji rozsady może pozwolić nie tylko na skrócenie okresu produkcyjnego, ale także na uzyskanie materiału roślinnego o lepszej kondycji fizjologicznej, mniejszej podatności na stres oraz wyższej skuteczności przyjęć w uprawach docelowych. W perspektywie gospodarczej może to stanowić jeden z bardziej opłacalnych i przyszłościowych kierunków działalności gospodarstw oraz firm sektora agrotechnicznego.

Drugim obszarem, który wyłania się z doświadczeń operacji, jest rozwój mniejszych jednostek środowiska kontrolowanego wykorzystujących sztuczną inteligencję (AI). Dzięki wdrożeniu algorytmów zarządzających parametrami oświetlenia, wilgotności, temperatury czy fertygacji, możliwe byłoby tworzenie autonomicznych mikrojednostek testowych – pełniących funkcję symulacyjnych środowisk badawczych. Ich celem byłoby odwzorowanie konkretnych warunków stresowych (susza, zasolenie, ograniczona dostępność składników pokarmowych) lub wspomagających (zróżnicowane spektrum światła, aplikacja biostymulantów) w niewielkiej skali, bez konieczności ponoszenia wysokich nakładów inwestycyjnych typowych dla pełnowymiarowych szklarni. Takie podejście pozwoliłoby na znaczące przyspieszenie prac rozwojowych, wdrażanie innowacji "proof of concept" oraz prowadzenie analiz porównawczych na potrzeby gospodarstw, jednostek doradczych czy uczelni wyższych.

Trzecim identyfikowanym kierunkiem jest rozwój systemów fertygacji polowej, opartych na zagospodarowaniu odpływów pożywki (odcieku) pochodzącej z upraw prowadzonych w środowisku kontrolowanym. W ramach projektu wykazano możliwość wykorzystania tej pożywki – bogatej w mikro- i makroskładniki – do nawożenia innych gatunków roślin uprawianych w warunkach polowych. Może to dotyczyć zarówno upraw warzywniczych, jak i zbożowych, a sam odciek, przy odpowiednim monitorowaniu składu chemicznego, może pełnić funkcję elementu gospodarki cyrkularnej. Tego typu rozwiązania, integrowane z mobilnymi aplikacjami oraz systemami optycznego nadzoru roślin (NIR/VIS), mogłyby stać się elementem technologii precyzyjnego rolnictwa w obszarze zarządzania składnikami pokarmowymi.



Czwartym istotnym obszarem, w którym zauważalny jest potencjał dalszego rozwoju, jest kontynuacja badań nad truskawką jako gatunkiem do uprawy całorocznej w środowisku kontrolowanym. Truskawka, jako owoc o wysokiej wartości rynkowej i silnej sezonowości, może – przy odpowiednim doświetlaniu i precyzyjnej fertygacji – stać się produktem klasy „premium”, oferowanym poza sezonem krajowym. Możliwość przedłużenia okresu podaży do miesięcy jesienno-zimowych, przy zachowaniu wysokich parametrów sensorycznych (smak, jędrność, zawartość cukrów), pozwalałaby na uzyskanie wyższych cen zbytu oraz dywersyfikację przychodów gospodarstw ogrodniczych. Co więcej, produkcja wysokomarżowych truskawek w modelu wertykalnym lub szklarniowym może być interesującym rozwiązaniem dla rolnictwa miejskiego.

Ostatnim, lecz nie mniej istotnym kierunkiem, jest rozwój upraw ziół pod kątem zawartości substancji biologicznie czynnych, takich jak olejki eteryczne czy polifenole. Zastosowanie odpowiedniego widma światła LED może znacząco wpływać na poziom i skład tych związków, co otwiera drogę do produkcji ziół funkcjonalnych o określonym profilu biochemicznym – skierowanych np. do przemysłu farmaceutycznego, kosmetycznego czy spożywczego (żywność funkcjonalna). Precyzyjne sterowanie parametrami środowiskowymi w warunkach kontrolowanych może pozwolić na standaryzację jakości produkowanych surowców zielarskich, co zwiększa ich wartość handlową i potencjalne rynki zbytu.



8. Upowszechnianie

wyników

Aktywnie angażowano się w kreowanie i wdrażanie innowacyjnych rozwiązań dla sektora rolno-spożywczego. W ramach prowadzonego projektu badawczo-rozwojowego szczególną wagę przykładano nie tylko do wysokiej jakości opracowywanych technologii, ale również do skutecznego upowszechniania ich rezultatów. Kluczowe znaczenie miały systematyczne prowadzenie działań informacyjnych i promocyjnych, które zapewniały szerokie dotarcie do interesariuszy i zwiększały szanse na rzeczywiste wdrożenia innowacji.

Działania te wpisywały się w szerszy kontekst potrzeby transformacji rolnictwa – jego cyfryzacji, zrównoważonego rozwoju, ograniczenia śladu środowiskowego oraz zwiększenia opłacalności produkcji rolnej. Komunikacja była traktowana nie tylko jako narzędzie promocji, lecz także jako środek edukacji, budowania relacji i inicjowania partnerstw między światem nauki, praktyki rolniczej i sektorem technologicznym.

8.1. Strategia informacyjna– cele i grupy docelowe

Głównym celem strategii informacyjno-promocyjnej była prezentacja osiągnięć projektowych oraz transfer wiedzy i technologii do praktyki rolniczej i otoczenia naukowego. Komunikacja skierowana była do różnych grup docelowych:

- **Rolnicy** – jako bezpośredni odbiorcy technologii,
- **Doradcy rolniczy i instytucje wspierające rolnictwo** – jako multiplikatorzy wiedzy,
- **Studenci i uczniowie szkół branżowych** – jako przyszli użytkownicy i liderzy zmiany,
- **Naukowcy i uczelnie** – jako partnerzy merytoryczni,
- **Przedsiębiorstwa sektora agro i ICT** – jako potencjalni współtwórcy innowacji.

W zależności od grupy docelowej, stosowane były odpowiednio dobrane narzędzia i kanały komunikacji – od klasycznych materiałów informacyjnych, przez nowoczesne formy multimedialne, po działania edukacyjne i sieciujące.

8.2. Obecność na targach i wystawach rolniczych

Jednym z najważniejszych filarów działań promocyjnych był aktywny udział w dwóch największych targach rolniczych w Polsce: AGRO SHOW w Bednarach oraz AGROTECH w Kielcach. Oba wydarzenia zgromadziły szerokie grono profesjonalistów z branży rolnej, oferując wyjątkową przestrzeń do bezpośredniej prezentacji nowoczesnych rozwiązań, wymiany doświadczeń oraz budowania relacji z praktykami, doradcami i partnerami technologicznymi.



AGROTECH – Kielce 2025

Na Targach AGROTECH w Kielcach, prezentowano się tworząc stoisko, które przyciągało rolników zainteresowanych innowacyjnym podejściem do zarządzania gospodarstwem. Na stoisku demonstrowano możliwości wykorzystania lamp LED oraz narzędzi rolnictwa precyzyjnego.

Duże zainteresowanie wzbudziły m.in.:

- Uprawy wertykalne z wykorzystaniem doświetlania LED,
- rozwiązania z zakresu cyfrowego monitoringu upraw,
- prezentacje działania aplikacji wspierającej planowanie nawożenia.

AGRO SHOW – Bednary 2024

Podczas AGRO SHOW w Bednarach, zaprezentowano swoją ofertę w ramach stoiska poświęconego technologiom cyfrowym w rolnictwie. Była to doskonała okazja do zaprezentowania:

- innowacyjnych aplikacji webowych i mobilnych dla rolników,
- efektów wdrożeń realizowanego projektu we współpracy z partnerami naukowymi i gospodarstwami pokazowymi,
- rozwiązań wspierających zrównoważone zarządzanie zasobami, optymalizację nawożenia i redukcję emisji.

Odwiedzający mieli możliwość bezpośredniego skonsultowania potencjalnych wdrożeń w ich własnych gospodarstwach.

8.3. Udział w konferencjach i forach eksperckich

Aktywnie uczestniczono w konferencjach naukowych, biznesowych oraz doradczych, zarówno krajowych, jak i międzynarodowych. Reprezentanci organizacji byli zapraszani jako prelegenci, paneliści i eksperci w dziedzinach takich jak: cyfryzacja rolnictwa, rolnictwo precyzyjne, ochrona środowiska, optymalizacja produkcji zwierzęcej i roślinnej, edukacja rolnicza i rozwój kompetencji zawodowych.

Szczególne znaczenie miały wystąpienia w ramach Forum Finansowania Agrobiznesu oraz Europejskiego Forum Rolniczego w Jasionce, które stanowią jedne z kluczowych platform debaty o przyszłości polskiego rolnictwa i polityki rolnej UE.

Europejskie Forum Rolnicze – Jasionka



Obecność na dwóch edycjach Europejskiego Forum Rolniczego w Jasionce:

- W 2024 roku Łukasz Czech – wystąpił w panelu „Success Story – jak odnieść sukces w rolnictwie”, dzieląc się doświadczeniem związanym z wdrażaniem innowacji cyfrowych i budowaniem pozycji jako lidera sektora doradztwa cyfrowego. Debata oparta była na konkretnych przykładach zrealizowanych projektów, ich wpływie na efektywność gospodarstw oraz sposobach skutecznego transferu wiedzy do praktyki.
- W 2025 roku nie tylko prezentowano się na własnym stoisku, ale również wzięło aktywny udział w dwóch strategicznych panelach:
 - „Doradztwo dla rolnictwa: rola państwa i rozwój usług komercyjnych we wspieraniu nowoczesnego sektora rolnego” – gdzie omawiano współistnienie doradztwa publicznego i prywatnego oraz znaczenie cyfrowych narzędzi wspierających decyzje rolników.
 - „Rolnictwo 4.0: cyfrowe innowacje napędzające przyszłość” – panel poświęcony wpływowi nowoczesnych technologii na zrównoważony rozwój i efektywność gospodarstw.

Wystąpienia te nie tylko wzmacniały pozycję jako kompetentnego partnera w zakresie cyfryzacji rolnictwa, ale też umożliwiły budowanie relacji z przedstawicielami administracji, instytucji wdrażających oraz środowisk akademickich.

Forum Finansowania Agrobiznesu

Brano udział w dwóch kolejnych edycjach tego prestiżowego wydarzenia, organizowanego przez Związek Banków Polskich i partnerów sektora rolnego:

- W 2024 roku zaprezentowano wystąpienie pt. „Płodzmian danych. Cztery rzeczy, które musisz wiedzieć o cyfryzacji finansowania rolnictwa”. W prezentacji omówiono praktyczne aspekty łączenia danych środowiskowych, produkcyjnych i finansowych, które mogą wspierać banki i instytucje finansowe w ocenie ryzyka i planowaniu oferty produktowej dla gospodarstw.
- W 2025 roku, w ramach Bloku II „Badania, Innowacje, Cyfryzacja i OZE – strategiczne wyzwania sektora agro”, Łukasz Czech wygłosił prelekcję pt. „Czego potrzebuje nowoczesny rolnik?”, w której zaprezentowano wyniki badań oraz oczekiwania odbiorców wobec narzędzi cyfrowych, aplikacji doradczych i systemów automatyzacji zarządzania gospodarstwem.

Obecność na forum umożliwiła nawiązanie kontaktów z przedstawicielami sektora finansowego, bankami rolniczymi oraz jednostkami wspierającymi rozwój rolnictwa poprzez



instrumenty

finansowe

i

doradztwo



inwestycyjne.

IX Forum Wiedzy i Innowacji w Rolnictwie

Aktywnie uczestniczono w IX Forum Wiedzy i Innowacji w Rolnictwie, będącym jednym z najważniejszych corocznych spotkań krajowej sieci doradztwa rolniczego i sektora naukowo-badawczego. Forum gromadzi ekspertów, praktyków i liderów innowacji, którzy wspólnie analizują bieżące wyzwania stojące przed polskim rolnictwem, a także wymieniają się doświadczeniami w zakresie wdrażania innowacji.

Udział obejmował:

- prezentację wybranych rozwiązań cyfrowych wspierających rolnictwo precyzyjne
- wymianę wiedzy z instytucjami doradczymi oraz organizacjami badawczo-rozwojowymi,
- aktywne uczestnictwo w dyskusjach nt. efektywnego transferu wiedzy do praktyki.



IV Szczyt Polskich Grup Operacyjnych EPI

Brano udział w IV Szczycie Polskich Grup Operacyjnych EPI, który miał na celu integrację środowiska innowacyjnych grup operacyjnych oraz prezentację osiągnięć i dobrych praktyk w realizacji projektów współpracy w ramach działania „Współpraca” PROW 2014–2020 i nowej perspektywy.

Podczas wydarzenia:



- prezentowano doświadczenia z realizacji projektów demonstracyjnych i badawczo-wdrożeniowych,
- uczestniczono w dyskusjach poświęconych komercjalizacji wyników projektów i budowaniu trwałych modeli współpracy w ramach konsorcjów innowacji,
- nawiązywano kontakty z innymi grupami operacyjnymi i instytucjami wdrażającymi.

Szczyt był okazją do zaprezentowania jako organizacji aktywnie uczestniczącej w programach EPI-AGRI, a także do wymiany wiedzy na temat skutecznych mechanizmów zarządzania projektami i transferu wiedzy między sektorem nauki a praktyką.

8.4. Współpraca z uczelniami i szkołami branżowymi

Dostrzeżono kluczowe znaczenie edukacji rolniczej jako fundamentu dla przyszłości sektora agro. Dlatego jednym z filarów działań upowszechniających rezultaty projektów był systematyczna współpraca z uczelniami wyższymi, szkołami branżowymi i technicznymi. Celem tych działań jest nie tylko przekazywanie wiedzy o nowoczesnych technologiach rolniczych, ale przede wszystkim kształtowanie kompetencji przyszłych liderów transformacji sektora agro.

Wieloletnia współpraca ze środowiskiem akademickim (2022–2024)

W latach 2022, 2023 i 2024 prowadzono cykliczne lekcje, wykłady i spotkania projektowe z studentami kierunków rolniczych, m.in. w ramach współpracy z uczelniami i organizacjami studenckimi. Tematyka zajęć obejmowała m.in.:

- technologie rolnictwa precyzyjnego,
- cyfrowe narzędzia wspomagające zarządzanie gospodarstwem,
- modele biznesowe w projektach zrównoważonego rolnictwa,
- zastosowanie AI i IoT w środowisku wiejskim.

Dzięki tym spotkaniom studenci mieli okazję zapoznać się z przykładami realnych wdrożeń innowacji w gospodarstwach rolnych, a także poznać kulisy prowadzenia projektów we współpracy z partnerami badawczymi, przemysłem i samorządami.

Wykład inauguracyjny na SGGW – 2023

Szczególnym wyróżnieniem i potwierdzeniem roli jako eksperta w dziedzinie innowacji rolniczych był wykład inauguracyjny wygłoszony przez Łukasza Czecha w 2023 roku podczas



uroczystej inauguracji roku akademickiego Wydziału Rolnictwa i Ekologii Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie [źródło: wrie.sggw.edu.pl].

Wykład koncentrował się na współczesnych wyzwaniach rolnictwa, roli doradztwa cyfrowego oraz potencjale innowacji środowiskowych i klimatycznych na przykładzie grup operacyjnych, w tym Umola. Został bardzo pozytywnie odebrany przez społeczność akademicką jako inspirujące otwarcie roku akademickiego i przykład skutecznego łączenia nauki z praktyką.

Udział w ScienceWeek SGGW – 2025

W ramach działań wspierających popularyzację nauki i wdrażanie innowacji, brano aktywny udział w wydarzeniu ScienceWeek 2025, organizowanym przez Szkołę Główną Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Podczas wydarzenia Łukasz Czech – został zaproszony do udziału w panelu eksperckim pt. „Działanie Współpraca – doświadczenie i perspektywa”.

Dyskusja panelowa koncentrowała się na:

- roli współpracy w tworzeniu i wdrażaniu innowacji rolniczych,
- dobrych praktykach i wyzwaniach związanych z realizacją projektów w ramach działania „Współpraca”,
- znaczeniu relacji między rolnikami, doradcami, nauką i przemysłem w budowaniu nowoczesnego sektora agro.

Wydarzenie zgromadziło studentów, naukowców, przedstawicieli administracji i instytucji wdrażających, a udział był okazją do pokazania praktycznego wymiaru działalności grup operacyjnych oraz budowania świadomości o roli innowacyjnych partnerstw w rolnictwie.

Udział w Trilliadzie 2024 – Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

W maju 2024 roku aktywnie uczestniczono w wydarzeniu Trilliada 2024, organizowanym przez Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu pod hasłem „Wyzwania nowoczesnego rolnictwa”. Wydarzenie to zgromadziło społeczność akademicką, uczniów szkół średnich, studentów, rolników, przedstawicieli administracji i innowacyjnych firm technologicznych.

W ramach wydarzenia:

- uczestniczono w sesjach i prezentacjach poświęconych innowacjom w rolnictwie precyzyjnym,
- zaprezentowało cyfrowe rozwiązania doradcze,
- dzieliło się doświadczeniami z realizacji projektów w ramach działania „Współpraca”,



- prowadziło rozmowy z nauczycielami, studentami i uczniami, inspirując ich do dalszego kształcenia i wdrażania nowoczesnych narzędzi w praktyce.

Stoisko cieszyło się dużym zainteresowaniem – zwłaszcza wśród młodzieży i nauczycieli poszukujących praktycznych narzędzi edukacyjnych oraz inspiracji do modernizacji nauczania przedmiotów rolniczych i przyrodniczych. Udział w Trilliadzie pozwolił na budowanie sieci kontaktów edukacyjnych i promocję projektów realizowanych w nowoczesnym, interaktywnym formacie.

Wizyta na Uniwersytecie Rolniczym w Krakowie – Współpraca Grup Operacyjnych EPI (2025)

W 2025 roku brano udział w spotkaniu organizowanym na Uniwersytecie Rolniczym w Krakowie. Wydarzenie miało na celu integrację środowiska naukowego z praktyką rolniczą i firmami technologicznymi, które realizowały oraz planują projekty innowacyjnych w ramach nowej perspektywy WPR.

W trakcie spotkania:

- zaprezentowano zakresie wdrażania i testowania innowacji rolniczych,
- odpowiadali na pytania naukowców, studentów i przedstawicieli innych grup operacyjnych,
- przeprowadzili rozmowy brokerskie mające na celu identyfikację wspólnych obszarów badawczo-wdrożeniowych.

Szczególnym punktem programu było zwiedzanie nowoczesnych laboratoriów Centrum Innowacji oraz Badań Prozdrowotnej i Bezpiecznej Żywności, gdzie omówiono potencjał infrastruktury badawczej do wsparcia projektów z obszarów takich jak:

- jakość żywności i surowców,
- technologie przetwórstwa,
- bezpieczeństwo biologiczne i środowiskowe innowacje w agrobiznesie.

Spotkanie stanowiło doskonałą okazję do nawiązania relacji z zespołami naukowymi Uniwersytetu Rolniczego, a także do zaprezentowania dotychczasowych doświadczeń w realizacji projektów w ramach działania „Współpraca” i przygotowania do nowych wspólnych inicjatyw w ramach EPI.

8.5. Obecność w mediach branżowych i społecznościowych

Systematycznie prowadzono działania promocyjne w mediach, zarówno tradycyjnych (branżowe czasopisma rolnicze) jak i cyfrowych (portale tematyczne, platformy mediów społecznościowych). Dzięki obecności w tych kanałach organizacja może dotrzeć do



szerokiego grona odbiorców i promować projekty nie tylko w środowisku bezpośrednich użytkowników technologii, ale również wśród ekspertów, doradców i decydentów.

Wśród najczęściej stosowanych form medialnych znajdują się:

- Artykuły eksperckie i wywiady, w których prezentowane są założenia i rezultaty projektów, nowości technologiczne oraz praktyczne przykłady ich wdrażania;
- Notatki prasowe zapowiadające wydarzenia, premiery narzędzi czy uruchomienie nowych projektów;
- Wpisy w mediach społecznościowych, takie jak Facebook, LinkedIn, YouTube – promujące wydarzenia, webinaria, efekty wdrożeń oraz działania edukacyjne;
- Relacje z wydarzeń branżowych w formie postów, relacji fotograficznych i krótkich materiałów wideo.



8.6. Rozwój narzędzi cyfrowych do komunikacji projektowej

Inwestowano również w rozwój narzędzi cyfrowych i platform, które wspierają komunikację i dostęp do wiedzy:

- Newslettery branżowe, które dostarczają zainteresowanym partnerom i użytkownikom bieżących informacji o realizowanych projektach,
- Webinaria i szkolenia online, pozwalające na dotarcie do odbiorców w różnych regionach Polski bez konieczności fizycznej obecności.



Dzięki cyfryzacji komunikacji, można było budować trwałe relacje z użytkownikami swoich innowacji, dostarczać im aktualizacji, zbierać opinie i wspierać ich we wdrażaniu nowych technologii.

8.7. Efekty i zasięg działań promocyjnych

Wieloletnie i systematyczne działania w obszarze informacji, promocji i edukacji przynoszą zauważalne rezultaty. Wśród najważniejszych efektów należy wskazać:

- Wzrost rozpoznawalności projektów w środowisku rolniczym, doradczym, edukacyjnym i naukowym – jako organizacji specjalizującej się w praktycznym wdrażaniu innowacji,
- Dotarcie do tysięcy odbiorców poprzez uczestnictwo w targach, konferencjach, forach i szkoleniach,
- Pozyskanie partnerów do współpracy projektowej – w tym firm technologicznych, instytutów badawczych, uczelni i szkół,
- Rozbudowę bazy kontaktów z użytkownikami końcowymi – co umożliwia realne testowanie i doskonalenie tworzonych rozwiązań,
- Zwiększenie liczby cytowań i odniesień do projektów w mediach branżowych i publikacjach naukowych.

Dzięki obecności na kluczowych wydarzeniach oraz wysokiej jakości materiałom promocyjnym i edukacyjnym, realizowane projekty zyskują szansę na trwałe zakorzenienie się w praktyce rolniczej, a opracowywane narzędzia są dostosowane do realnych potrzeb użytkowników.

8.8. Wzmocnienie systemu upowszechniania wiedzy

Systematycznie wzmacnia własne kompetencje i narzędzia w zakresie komunikacji i upowszechniania wiedzy. Obejmuje to:

- profesjonalizację działań graficznych, redakcyjnych i medialnych,
- rozwój relacji z mediami branżowymi i akademickimi,
- tworzenie materiałów multimedialnych (video, podcasty, e-learning),
- budowanie zasobów edukacyjnych dla szkół i uczelni,
- cyfrową archiwizację i udostępnianie wyników badań oraz analiz w otwartych repozytoriach.

Wszystkie te działania są realizowane zgodnie z zasadami dostępności, otwartości nauki i efektywnego transferu wiedzy.



8.9. Plany rozwoju działań komunikacyjnych

W kolejnych latach planowany jest dalszy rozwój działań informacyjno-promocyjnych. Strategia zakłada:

- Zwiększenie obecności międzynarodowej, poprzez udział w targach i forach UE,
- Budowę interaktywnych platform wymiany wiedzy dla rolników, doradców i naukowców,
- Wprowadzenie szkoleń certyfikowanych z zakresu wykorzystania narzędzi rolnictwa precyzyjnego i cyfrowego,
- Dalszą współpracę z uczelniami, w tym rozwój programów stażowych i projektów dyplomowych powiązanych z tematyką innowacji rolniczych,
- Rozbudowę kanałów wizualnych i filmowych, które zwiększą przystępność i zrozumiałość przekazywanych treści.

Komunikacja jest traktowana jako inwestycja w rozwój sektora rolnego – dzięki niej innowacje nie tylko powstają, ale także trafiają do praktyki i zmieniają oblicze nowoczesnego rolnictwa.





9. Spis tabel, fotografii i rysunków

9.1. Spis tabel

Tabela 1. Parametry fotometryczne, wytworzonego oświetlenia LED	26
Tabela 2. Przykładowa tabela oceny jakości sałaty, rukoli i sadzonek sałaty	49
Tabela 3. Skład makro i mikroelementów w zastosowanych dawkach nawożenia dolistnego	62
Tabela 4. Średnie wyniki oceny plonu i jakości sałaty	64
Tabela 5. Średnie wyniki oceny konsumenckiej sałaty	72
Tabela 6. Średnie wyniki oceny konsumenckiej rukoli	94
Tabela 7. Wartości ilorazów, średnich wartości oceny sensorycznej ocenianych cech*	136
Tabela 8. Średnie dla plonu, składowych plonu i cech jakościowych ziarna.	155
Tabela 9. Średnie wartości NDVI obliczonego na podstawie zdjęć satelitarnych z satelitów Sentinel-2 dla poszczególnych wariantów w poszczególnych terminach	157

9.2. Spis fotografii

Fotografia 1. Rafty w basenach wodnych oraz system korzeniowy uprawianej sałaty	16
Fotografia 2. Uprawa sałaty w oświetleniu LED (4 widma) oraz kontrolnym	17
Fotografia 3. System uprawy sałaty w basenach na półkach z oświetleniem LED oraz stałym obiegiem pożywki	18
Fotografia 4. Uprawa rukoli w warunkach kontrolowanych oświetlana LED (4 widma) oraz kontrolnym – badanie śródkresowe	19
Fotografia 5. Uprawa rozsady sałaty w warunkach kontrolowanych oświetlana LED (4 widma) oraz kontrolnym – badanie śródkresowe	20
Fotografia 6. Uprawa truskawek w tunelach foliowych w rynnach na podłożu substratowym	21
Fotografia 7. System fertygacji w uprawie truskawki na podłożu substratowym	22
Fotografia 8. Podłoże substratowe do uprawy truskawki	22
Fotografia 9. Widmo RW (LED 1) dzień w uprawie truskawki w tunelu foliowym	46
Fotografia 10. Widmo RW (LED 1) i BW (LED 4) noc w uprawie truskawki w tunelu foliowym	46
Fotografia 11. Widmo BW (LED 4) dzień w uprawie truskawki w tunelu foliowym	47
Fotografia 12. Widmo RB (LED 3) noc w uprawie truskawki w tunelu foliowym	47
Fotografia 13. Widmo RWFR (LED 2) i RB (LED 3) dzień w uprawie truskawki w tunelu foliowym	48
Fotografia 14. Widmo RWFR (LED 2) i RB (LED 3) noc w uprawie truskawki w tunelu foliowym	48



Fotografia 15. Przykładowe rośliny sałaty wybrane do oceny eksperckiej	50
Fotografia 16. Przykładowe pomiary masy liści rukoli	50
Fotografia 17. Przykładowe pomiary rozsady sałaty – widok rozety liściowej z kostką.....	50
Fotografia 18. Przykładowe pomiary masy liści dla rozsady sałaty	51
Fotografia 19. Przykładowe pomiary masy owoców	52
Fotografia 20 Widok stanowiska do oceny konsumenckiej jakości owoców truskawki.	55
Fotografia 21. Ocena stanu wegetacyjnego roślin pszenicy przy pomocy ScanSpectrum v460	

9.3. Spis rysunków

Rysunek 1. Mapa Polski przedstawiająca lokalizację doświadczenia w miejscowości Jerownice.....	24
Rysunek 2. Mapa przedstawiająca lokalizację poletek doświadczalnych na tle mapy glebowo-rolniczej z typami gleb i kompleksami przydatności (Bw - gleby brunatne wylugowane i brunatne kwaśne; Dz czarne ziemie zdegradowane i gleby szare).	24
Rysunek 3. Rozkład widmowy dla lamp w układzie czynnikowym – LED 1 - RW.....	27
Rysunek 4. Rozkład widmowy dla lamp w układzie czynnikowym – LED 2 - RWFR.....	27
Rysunek 5. Rozkład widmowy dla lamp w układzie czynnikowym – LED 3 - RB.....	27
Rysunek 6. Rozkład widmowy dla lamp w układzie czynnikowym – LED 4 – BW	28
Rysunek 7. Wykres chromatyczności (trójkąt barw) dla lamp w układzie czynnikowym – LED 1 - RW	28
Rysunek 8. Wykres chromatyczności (trójkąt barw) dla lamp w układzie czynnikowym – LED 2 - RWFR	29
Rysunek 9. Wykres chromatyczności (trójkąt barw) dla lamp w układzie czynnikowym – LED 3 - RB.....	30
Rysunek 10. Wykres chromatyczności (trójkąt barw) dla lamp w układzie czynnikowym – LED 4 – BW	30
Rysunek 11. Wschody i zachody słońca dla szerokość geograficzna N 51° 46' 14.66" i długość geograficzna E 19° 7' 48.993" oraz układ doświetlania doświadczenia roślin truskawki w okresie września i października.	45
Rysunek 12. Przykład szukania próbek odstających	57
Rysunek 13. Porównanie uśrednionych widm odbiciowych dla poszczególnych powtórzeń eksperymentu w zależności od zastosowanego typu oświetlenia.	57
Rysunek 14. Urządzenie ScanSpectrum v4.....	58
Rysunek 15. Oznaczenie układów doświadczeń z pszenicą na ortofotomapie. (stan sprzed założenia doświadczenia).....	61



Rysunek 16. Ocena (skala od 0 do 5) jakości plonu sałaty w podziale na zastosowane oświetlenie	66
Rysunek 17. Ocena (skala od 0 do 5) jakości plonu sałaty w podziale na zastosowane oświetlenie	67
Rysunek 18. Średnie wartości plonu sałaty w podziale na zastosowane oświetlenie	68
Rysunek 19. Wskaźniki ilorazu wartości plonu i jakości sałaty doświetlanych do kontroli w podziale na zastosowane oświetlenie	70
Rysunek 20. Wskaźniki ilorazu wartości plonu i jakości sałaty doświetlanych do kontroli	70
Rysunek 21. Średnie wartości oceny konsumenckiej cech sensorycznych sałaty w skali od 0 do 5	73
Rysunek 22. Ilorazy wartości oceny konsumenckiej cech sensorycznych sałaty z podziałem na rodzaj oświetlenia	75
Rysunek 23. Ilorazy wartości oceny konsumenckiej cech sensorycznych sałaty	75
Rysunek 24. Wartości ilorazów zawartości mikro i makro pierwiastków w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1) dla roślin sałaty	78
Rysunek 25. Wartości ilorazów zawartości mikro i makro pierwiastków w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1) dla roślin sałaty	79
Rysunek 26. Wartości ilorazów zawartości azotanów, azotynów i azotu ogólnego w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1) dla roślin sałaty	80
Rysunek 27. Wartości ilorazów zawartości substancji chemicznych w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1) dla roślin sałaty	83
Rysunek 28. Wartości ilorazów zawartości substancji chemicznych w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1) dla roślin sałaty	84
Rysunek 29. Analiza uśrednionych obrazów spektralnych z podziałem na grupy badawcze	85
Rysunek 30. Wskaźniki wegetatywne dla roślin sałaty z podziałem na grupy badawcze	86
Rysunek 31. Relacje grup doświadczalnych oraz cech plonotwórczych na podstawie pomiarów widma spektralnego na liściach sałaty	87
Rysunek 32. Ocena (skala od 0 do 5) jakości plonu rukoli w podziale na zastosowane oświetlenie	91
Rysunek 33. Ocena (skala od 0 do 5) jakości plonu rukoli w podziale na zastosowane oświetlenie	92
Rysunek 34. Wskaźniki ilorazu wartości jakości plonu rukoli doświetlanych do kontroli w podziale na zastosowane oświetlenie	92
Rysunek 35. Średnie wartości plonu rukoli w podziale na zastosowane oświetlenie	93
Rysunek 36. Wskaźniki ilorazu wartości plonu i jakości rukoli doświetlanych do kontroli	94
Rysunek 37. Średnie wartości oceny konsumenckiej cech sensorycznych rukoli w skali od 0 do 5	96



Rysunek 38. Ilorazy wartości oceny konsumenckiej cech sensorycznych rukoli z podziałem na rodzaj oświetlenia.....	97
Rysunek 39. Ilorazy wartości oceny konsumenckiej cech sensorycznych rukoli.	97
Rysunek 40. Wartości ilorazów zawartości substancji chemicznych w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1)	101
Rysunek 41. Wartości ilorazów zawartości substancji chemicznych w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1)	101
Rysunek 42. Wartości ilorazów zawartości mikro i makro pierwiastków w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1)	104
Rysunek 43. Wartości ilorazów zawartości mikro i makro pierwiastków w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1)	105
Rysunek 44. Wartości ilorazów zawartości azotanów, azotynów i azotu ogólnego w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1)	106
Rysunek 45. Analiza obrazów spektralnych w kampanii 1 dla rukoli	107
Rysunek 46. Analiza obrazów spektralnych w kampanii 2 dla rukoli	108
Rysunek 47. Analiza obrazów spektralnych w kampanii 3 dla rukoli	108
Rysunek 48. Analiza obrazów spektralnych w kampanii 4 dla rukoli	109
Rysunek 49. Analiza obrazów spektralnych w kampanii 5 dla rukoli	109
Rysunek 50. Analiza uśrednionych obrazów spektralnych dla rukoli.....	110
Rysunek 51. Wskaźniki wegetatywne dla roślin rukoli uszeregowane po kampaniach pomiarowych (powtórzeniach).	111
Rysunek 52. Wskaźniki wegetatywne dla roślin rukoli uszeregowane po rodzajach widm światła LED.	111
Rysunek 53. Relacje grup doświadczalnych oraz cech plonotwórczych na podstawie pomiarów widma spektralnego na liściach rukoli.....	112
Rysunek 54. Ocena (skala od 0 do 5) jakości siewek sałaty w podziale na zastosowane oświetlenie	115
Rysunek 55. Ocena (skala od 0 do 5) jakości siewek sałaty w podziale na zastosowane oświetlenie	116
Rysunek 56. Wskaźniki ilorazu wartości jakości siewek sałaty doświetlanych do kontroli w podziale na zastosowane oświetlenie.....	117
Rysunek 57. Średnie wartości świeżej masy i liczby liści siewek sałaty doświetlanych do kontroli	118
Rysunek 58. Wskaźniki ilorazu wartości świeżej masy i liczby liści siewek sałaty doświetlanych do kontroli.....	119
Rysunek 59. Wartości ilorazów zawartości substancji chemicznych w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1) dla siewki rozsady sałaty	121



Rysunek 60. Wartości ilorazów zawartości substancji chemicznych w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1) dla siewki rozsady sałaty	122
Rysunek 61. Analiza obrazów spektralnych dla siewek rozsady sałaty.....	123
Rysunek 62. Relacje grup doświadczalnych oraz cech plonotwórczych na podstawie pomiarów widma spektralnego siewek rozsady sałaty	125
Rysunek 63. Plon owoców (waga oraz liczba) w podziale na terminy i zastosowane oświetlenie	127
Rysunek 64. Jakość owoców (średnia wielkość owocu oraz średnia liczba owoców na roślinie) w podziale na terminy i zastosowane oświetlenie	128
Rysunek 65. Kondycja i dojrzałość owoców (skala od 0 do 9) w podziale na terminy i zastosowane oświetlenie	129
Rysunek 66. Wskaźniki ilorazu wartości plonu i jakości truskawek doświetlanych do kontroli dla terminu 2024-09-19 w podziale na zastosowane oświetlenie	130
Rysunek 67. Wskaźniki ilorazu wartości plonu i jakości truskawek doświetlanych do kontroli dla terminu 2024-10-01 w podziale na zastosowane oświetlenie	131
Rysunek 68. Wskaźniki ilorazu wartości plonu i jakości truskawek doświetlanych do kontroli dla terminu 2024-10-11 w podziale na zastosowane oświetlenie	132
Rysunek 69. Wskaźniki ilorazu wartości plonu i jakości truskawek doświetlanych do kontroli dla terminu 2024-10-25 w podziale na zastosowane oświetlenie	133
Rysunek 70. Średnie wartości oceny konsumenckiej cech (z pominięciem nietypowego aromatu, gdzie średnia wartość cechy była zbliżona do 0 i wynosiła 0,02) sensorycznych owoców truskawki w skali od 0 do 9.	135
Rysunek 71. Średnie wartości oceny konsumenckiej badanych układów doświadczeń w rozbiciu na cechy (z pominięciem nietypowego aromatu, gdzie wartość dla wszystkich układów wynosiła 0 z wyjątkiem układu LED4-BW, gdzie średnia wartość wynosiła 0,11) sensorycznych owoców truskawki w skali od 0 do 9.	136
Rysunek 72. Wartości ilorazów zawartości substancji chemicznych w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1) dla owoców truskawki	139
Rysunek 73. Wartości ilorazów zawartości substancji chemicznych w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1) dla owoców truskawki	140
Rysunek 74. Wartości ilorazów zawartości mikro i makro pierwiastków w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1) dla owoców truskawki	143
Rysunek 75. Wartości ilorazów zawartości mikro i makro pierwiastków w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1) dla owoców truskawki	144
Rysunek 76. Wartości ilorazów zawartości azotanów, azotynów i azotu w grupach oświetlanych światłem LED względem kontroli (kontrola =1) dla owoców truskawki	145
Rysunek 77. Analiza uśrednionych obrazów spektralnych dla owoców truskawki.....	147



Rysunek 78. Pochodne pierwszego rzędu wyznaczone na podstawie analizy spektralnej dla owocu truskawki.	148
Rysunek 79. Analiza uśrednionych obrazów spektralnych dla liści roślin truskawki	149
Rysunek 80. Relacje grup doświadczalnych oraz cech plonotwórczych na podstawie pomiarów widma spektralnego na owocach truskawki	150
Rysunek 81. Relacje grup doświadczalnych oraz cech plonotwórczych na podstawie pomiarów widma spektralnego na liściach truskawki	153
Rysunek 82. Mapka z granicami poletek i opisem poszczególnych wariantów	156
Rysunek 83. Mapki z średnim NDVI dla poszczególnych poletek oraz mapki z NDVI nieuśrednionym (dla pikseli 10x10 metrów – po prawej) w dniu 30.03.2024 r.	158
Rysunek 84. Mapki z średnim NDVI dla poszczególnych poletek oraz mapki z NDVI nieuśrednionym (dla pikseli 10x10 metrów – po prawej) w dniu 29.04.2024 r.	159
Rysunek 85. Mapki z średnim NDVI dla poszczególnych poletek oraz mapki z NDVI nieuśrednionym (dla pikseli 10x10 metrów – po prawej) w dniu 04.05.2024 r.	160
Rysunek 86. Mapki z średnim NDVI dla poszczególnych poletek oraz mapki z NDVI nieuśrednionym (dla pikseli 10x10 metrów – po prawej) w dniu 14.05.2024 r.	161
Rysunek 87. Mapki z średnim NDVI dla poszczególnych poletek oraz mapki z NDVI nieuśrednionym (dla pikseli 10x10 metrów – po prawej) w dniu 26.05.2024 r.	162
Rysunek 88. Mapki z średnim NDVI dla poszczególnych poletek oraz mapki z NDVI nieuśrednionym (dla pikseli 10x10 metrów – po prawej) w dniu 15.06.2024 r.	163
Rysunek 89. Współczynniki korelacji przedstawiające zależności pomiędzy wskaźnikami NDVI (dla 6 terminów) a parametrami plonu i jakości ziarna pszenicy.	165
Rysunek 90. Wykresy przedstawiające wyniki PCA, tj. powiązania między badanymi cechami oraz wielocechowe zróżnicowanie obiektów w układzie dwóch pierwszych składowych głównych.	167
Rysunek 91. Uśrednione spektra obrazu pszenicy dla wszystkich badanych punktów.	169
Rysunek 92. Mapa NDVI	170
Rysunek 93. Mapa PRI	171
Rysunek 94. Mapa WSI	172
Rysunek 95. Mapa red-edge stress	173
Rysunek 96. Mapa CI-green	173
Rysunek 97. Mapa MCARI	174
Rysunek 98. Główny widok aplikacji AgroWe App. Odnośnik do modułu Lampy widoczny w pasku po lewej stronie.	183
Rysunek 99. Widok modułu Lampy w aplikacji AgroWe	183
Rysunek 100. Widok modułu Lampy w aplikacji AgroWe	184



Rysunek 101. Widok modułu Lampy w aplikacji AgroWe po zdefiniowaniu cyklu rozwoju roślin.	185
Rysunek 102. Widok modułu Lampy w aplikacji AgroWe po dodaniu zestawów lamp do porównania.....	186
Rysunek 103. Widok wykresu zużycia energii ogółem dla trzech porównywanych lamp.....	187
Rysunek 104. Widok wykresu zużycia energii na 1g masy rośliny dla trzech porównywanych lamp.	187
Rysunek 105. Widok porównania źródeł światła wygenerowanego na podstawie tempa przyrostu masy.....	188