



Kauno technologijos universitetas

Cheminės technologijos fakultetas

**Kietakūnio apšvietimo biologinis ir ekonominis efektyvumas,
auginant plunksnines kalankes (lot. *Kalanchoe pinnata* Lam.)
kontroliuojamoje aplinkoje**

Baigiamasis magistro projektas

Gytis Balaika

Projekto autorius

dr. Ilona Jonuškienė

Vadovė

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Cheminės technologijos fakultetas

**Kietakūnio apšvietimo biologinis ir ekonominis efektyvumas,
auginant plunksnines kalankes (lot. *Kalanchoe pinnata* Lam.)
kontroliuojamoje aplinkoje**

Baigiamasis magistro projektas

Pramoninė biotechnologija (6211FX010)

Gytis Balaika

Projekto autorius

dr. Ilona Jonuškienė

Vadovė

lekt. Kazimieras Anusevičius

Recenzentas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Cheminės technologijos fakultetas

Gytis Balaika

**Kietakūnio apšvietimo biologinis ir ekonominis efektyvumas,
auginant plunksnines kalankes (lot. *Kalanchoe pinnata* Lam.)
kontroliuojamoje aplinkoje**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Gyčio Balaikos, baigiamasis projektas tema „Kietakūnio apšvietimo biologinis ir ekonominis efektyvumas, auginant plunksnines kalankes (lot. *Kalanchoe pinnata* Lam.) kontroliuojamoje aplinkoje“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

TURINYS

Santrauka	5
Summary.....	6
Santrumpų ir terminų sąrašas	7
ĮVADAS	8
1. LITERATŪROS APŽVALGA	10
1.1 Kontroliuojamos aplinkos auginimo sistemos.....	10
1.1.1 Samprata	10
1.1.2 Perspektyvos	10
1.1.3 Pagrindiniai komponentai.....	11
1.1.4 Ekonominiai aspektai	11
1.2 Plunksninė kalankė (lot. <i>Kalanchoe pinnata</i>)	13
1.2.1 Storlapinių (lot. <i>Crassulaceae</i>) šeimos augalai. <i>Kalanchoe</i> gentis	13
1.2.2 Plunksninės kalankės (lot. <i>Kalchoe pinnata</i>) pagrindinės charakteristikos	14
1.3 Šviesos įtaka augalų augimui	16
1.3.1 Kietakūnio (LED) apšvietimo potencialas	17
1.3.2 Pagrindiniai apšvietimo parametrai	17
1.3.3 Spektro įtaka augalo fiziologiniams procesams	18
1.3.4 Šviesą emituojančių diodų (LED) apšvietimo poveikis vaistiniams augalams.....	19
2. MEDŽIAGOS IR TYRIMŲ METODAI	21
2.1 Auginimo sąlygos	21
2.2 Apšvietimo srauto ir trukmės įtaka.....	22
2.3 Apšvietimo spektro įtaka	23
2.3.1 Pagrindinių apšvietimo spektro komponentų efektas	23
2.3.2 Papildomų apšvietimo spektro komponentų įtaka	23

2.3.3 Baltos šviesos derinių efektai	24
2.4 Analizės ir matavimai	24
2.4.1 Biometriniai matavimai	24
2.4.2 Antioksidacinių plunksninės kalankės savybių nustatymas	25
2.5 Duomenų apdorojimas ir statistinė analizė.....	29
2.6 Išlaidų – naudos analizė.....	29
3. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS	31
3.1 Apšvietimo srauto ir trukmės įtakos įvertinimas.....	31
3.2 Pagrindinių apšvietimo spektro komponentių efektų įvertinimas	35
3.3 Papildomų apšvietimo spektro komponentių efekto įvertinimas.....	40
3.4 Baltos šviesos derinių efektai	44
3.5 Apšvietimo parametrų taikymo ekonominiai aspektai	47
3.5.1 Fotoperiodo ir srauto taikymo ekonominiai aspektai	47
3.5.2 Apšvietimo spektro taikymo ekonominiai aspektai.....	48
REKOMENDACIJŲ DALIS	51
IŠVADOS.....	54
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	55

Balaika, Gytis. Kietakūnio apšvietimo biologinis ir ekonominis efektyvumas, auginant plunksnines kalankes (lot. *Kalanchoe pinnata* Lam.) kontroliuojamoje aplinkoje. Magistro baigiamasis projektas / vadovė dr. Ilona Jonuškienė; Kauno technologijos universitetas, Cheminės technologijos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis: Biotechnologija, technologijos mokslai

Reikšminiai žodžiai: Kietakūnis apšvietimas, plunksninė kalankė, kontroliuojamos aplinkos daržininkystės sistemos.

Kaunas, 2019. 61 p.

Santrauka

Tiriamąjį darbo metu įvertinti šviesos parametrų efektai potencialiems vaistiniams augalams – plunksninėms kalankėms (lot. *Kalanchoe pinnata* Lam.), užaugintoms kontroliuojamo klimato kameroje po kietakūniu (LED) apšvietimu. Skirtingo fotoperiodo, apšvietimo srauto ir spektro poveikyje nustatyta, kad augalų antioksidacinėms savybėms ir sukaupiamo bufadienolido kiekiui optimalios apšvietimo sąlygos yra 18 valandų $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ raudonos šviesos srautas. Reikšmingų šviesos efektų plunksninių kalankių antioksidacinėms savybėms ir bufadienolido koncentracijai pasiekta jaunuose lapuose, kurie sudaro tik nedidelę bendros augalo biomasės dalį. Didinant fotoperiodą, ar pridėjus papildomų spektro komponentių (žalios ar tolimosios raudonos šviesos) gauti kalankių antioksidacinių savybių pagerėjimai ir bufadienolido koncentracijos pokyčiai nėra pakankamai reikšmingi, kad atsvertų elektros energijos sąnaudų padidėjimą. Baltos šviesos derinys su tolimesne raudona taip pat pagerino antioksidacines savybes, tačiau, remiantis skaičiavimais, ši apšvietimo komponentė energetiškai yra nuostolinga.

Balaika, Gytis. Economical and biological efficiency of solid–state lighting cultivating *Kalanchoe pinnata* in controlled environment. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. Ilona Jonuškienė; The Faculty of Chemical Technology, Kaunas University of Technology.

Study field and area: Biotechnology, technological sciences

Keywords: Solid–state lighting, *Kalanchoe pinnata* Lam., Controlled environment agriculture

Kaunas, 2019. 61 p.

Summary

The effects of light parameters were determined on *Kalanchoe pinnata* Lam., grown in a controlled environment under solid–state (LED) lighting. By changing the photoperiod, photon flux density and spectrum, the optimal conditions were determined for antioxidant activity and bufadienolide quantity – 18 hours of $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ red lighting. Significant light effects on the antioxidant properties and bufadienolide concentrations were achieved in young leaves, which make up only a small fraction of the total plant biomass. Improvements in the antioxidant activity and bufadienolide concentration achieved by increasing the photoperiod and adding additional spectral components (green or far–red) are not significant enough to counterbalance the increase in electricity consumption. The combination of white and far–red LED lighting also improved antioxidant properties, but these lighting components are not profitable, based on calculations.

Santrumpų ir terminų sąrašas

ABTS – 2,2-azino-bis-3-etilbenziazolin-6-sulfono rūgštis;

BA-135-Ac – bersaldegenin-1,3,5-acetatas;

DPPH – 2,2-difenilpikrilhidrazilas;

LED – šviesą emituojantys diodai (angl. *Light-emitting diodes*);

MTEP – mokslo, technologijų ir eksperimentinė plėtra;

PPFD – fotosintetiškai aktyvios spinduliuotės tankis (angl. *Photosynthetic photon flux density*);

TPTZ – 2,4,6-tripiridil-s-triazinas.

IVADAS

Didėjant žmonių skaičiui neabejojama, kad pasaulis susidurs su daugybe iššūkių, susijusių su maisto tiekimu. Tikėtina, kad įpusėjus šiam amžiui miestų gyventojų skaičius susilygins su viso pasaulio populiacija, užfiksuota 2002 metais [1]. Dėl šios priežasties ir dėl nuolat mažėjančių išteklių bei dirbamos žemės plotų, bus vis sunkiau užtikrinti šviežio ir kokybiško maisto tiekimą. Žvelgiant į šią perspektyvą, šiandien intensyviai vystoma augalų auginimo kontroliuojamos aplinkos daržininkystės sistemos (angl. *Controlled environment agriculture*) idėja ir moksliniai tyrimai. Didžiąją dalį augalų rūšių, auginamų kontroliuojamos aplinkos sistemose sudaro įvairios lapinės daržovės [2]. Deja, dėl taikomų technologijų, auginimo kaštai uždaroje patalpose vis dar yra per dideli, kad daržovės būtų auginamos ne tik greitam suvartojimui, bet ir kaip žaliavos, todėl ieškoma būdų, kaip padidinti užauginamos augalinės produkcijos vertę.

Viena iš idėjų galėtų būti vaistinių augalų auginimas. Juos galima auginti ištisus metus, nepriklausomai nuo metų laiko, o dėl galimybės kontroliuoti auginimo aplinkos sąlygas, tikimasi išauginti aukštos kokybės vaistinę žaliavą. Keičiant aplinkos temperatūrą, drėgnį, apšvietimo ir mineralinės mitybos sąlygas, įgalinama augalų augimo, vystymosi ir metabolizmo aspektų kontrolė, siekiant išskirtinės kokybės galutinio produkto. Šie produktai, gaunami alternatyviu selekcijai ir genetinei inžinerijai biotechnologiniu metodu, buvo pavadinti „aplinkos sąlygomis modifikuotais organizmais“ (angl. *Environmentally modified organisms, EMO*) [3]. Pasitelkiant šį auginimo būdą, siekiama ne tik optimalaus augalo produktyvumo, bet ir, keičiant augalo metabolizmo kryptingumą, padidinti tikslinio fitocheminio komponento kiekį audiniuose, kuris galėtų būti naudingas tiek kasdinei mitybai, tiek farmacijai, medicinai ar kosmetikos pramonei.

Šviesa – vienas pagrindinių aplinkos parametru, veikiantis augalų gyvybinius procesus. Tai vienintelė energija fotosintezai – jos srautas, spektras, trukmė ir kryptingumas veikia augalus kaip universalus informacijos signalas, reguliuojantis gyvybinių procesų kryptingumą ir intensyvumą. Kontroliuojamos aplinkos daržininkystės sistemose dirbtinis apšvietimas yra vienas iš pagrindinių kaštų, lemiančių aukštą produkcijos savikainą. Čia naudojama šviesą emituojančių diodų (angl. *Light emitting diodes, LED*) technologija, pasižyminti ekonomišku ir ekologišku. Tuo pačiu, dėl galimybės reguliuoti emisijos srautą bei iš įvairių spalvų diodų sudaryti skirtingas apšvietimo spektro kombinacijas, tai yra patogus įrankis tiek fotobiologiniams tyrimams, tiek EMO idėjos realizavimui. Atlikta nemažai mokslinių tyrimų, siekiant detalizuoti šviesos parametru efektus augalams [4] [5] [6], kurių metu nustatyta, kad šviesos efektai yra saviti augalo genotipui, augimo tarpsniui ir priklauso nuo kitų auginimo aplinkos parametru, todėl parenkant apšvietimo sąlygas kontroliuojamos aplinkos daržininkystei, svarbu individualizuoti jas augalo rūšiai.

Šiame darbe siekiama parinkti optimalias LED apšvietimo sąlygas plunksninės kalankės, kaip potencialaus vaistinio augalo, kokybiškos žaliavos auginimui kontroliuojamos aplinkos daržininkystės sistemoje, bei galimam kalankių kaupiamų ir biologiniu aktyvumu pasižyminčių bufadienolidų koncentracijos audiniuose padidinimui. Mokslinėje literatūroje nėra kompleksiška išnagrinėtų bufadienolidų – augalinių sterolių – metabolizmo galimų sąsajų su apšvietimo parametrais. Todėl šiame darbe nagrinėjama tyrimų problema – tiesiogiai ir netiesiogiai šviesos įtakojami plunksninių kalankių produktyvumo ir metabolizmo aspektai jų auginimui kontroliuojamos aplinkos daržininkystės sistemose, atsižvelgiant į ekonominius ir technologinius aspektus.

Darbo tikslas – įvertinti galimybes valdyti bioaktyvių komponentų kiekį plunksninės kalankės (lot. *Kalanchoe pinnata* Lam.) audiniuose, keičiant apšvietimo sąlygas (šviesą emituojančių diodų apšvietimo spektrą, intensyvumą ir trukmę), siekiant išauginti aukštos vertės augalinę žaliavą kontroliuojamo klimato auginimo sistemose.

Darbo uždaviniai:

1. ištirti apšvietimo intensyvumo ir trukmės įtaką bioaktyvių komponentų kiekiui ir antioksidacinėms savybėms plunksninės kalankės audiniuose.
2. ištirti apšvietimo spektro įtaką bioaktyvių komponentų kiekybinei sudėčiai ir augalų antioksidacinėms savybėms.
3. įvertinti galimybes valdyti bioaktyvių komponentų sudėtį plunksninės kalankės audiniuose, atsižvelgiant į tirtų parametrų įtaką augalų produktyvumui ir fiziologinei būklei.
4. parengti ekonominiais aspektais grįstą plunksninės kalankės, auginamos kontroliuojamos aplinkos auginimo sistemose, augalinės žaliavos kokybės valdymo šviesos parametrų pagalba modelį.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1 Kontroliuojamos aplinkos auginimo sistemos

1.1.1 Samprata

Kontroliuojamos aplinkos auginimo sistemos (angl. *Controlled environment agriculture*), dar kitaip vadinamos kaip augalų fabrikai (angl. *Plant factory*), yra uždaros patalpos, kuriose siekiama užauginti aukštos kokybės derlių, kontroliuojant aplinkos parametrus: temperatūrą, drėgmę, anglies dioksido koncentraciją bei kitus faktorius. Tokiose patalpose augalų derlingumas gali būti apie 2–4 kartus didesnis, lyginant su tradiciniu lauko ūkininkavimu, taip pat, realizacija galima nedidelėse patalpose, nes yra naudojamos kelių aukštų lentynos [7]. Kontroliuojamos aplinkos auginimo sistemose gaunamas pastovus daržovių ar kitų augalų derlius, nepriklausomai nuo metų laiko bei kitų išorinės aplinkos sąlygų poveikio. Reguluojant aplinkos parametrus, sukuriama augalų rūšiai savitos sąlygos, kurių dėka išgaunama išskirtinės kokybės augalinė produkcija. Augalų fabrikai svarbūs ir ekologiniu požiūriu, kadangi sumažina neigiamą žemdirbystės poveikį aplinkai bei išteklių naudojimą [8]. Šiuo metu uždarytų patalpų žemdirbystė urbanizuotose teritorijose išgyvena proveržį, kurį lėmė technologinė pažanga duomenų apdorojimo, išmaniųjų sprendimų bei precizinės (tiksliosios) žemdirbystės srityse. Paprasti šiltnamiai keičiami aukšto technologinio lygmens augalų fabrikais, kuriuose optimizuojamas augalų produktyvumas bei žmogaus darbas. Sistemose yra naudojama natūrali arba dirbtinė šviesa. Keičiant dirbtinio apšvietimo parametrus, gali būti valdomi augalų augimo, metabolizmo procesai [9].

1.1.2 Perspektyvos

Šiltnamiai visais laikais buvo ir išlieka vienas svarbiausių priedangų tipų, siekiant sukurti palankų mikroklimatą augalams. Pirmieji šiltnamiai buvo naudojami jau antikos laikais kai įvairios moliūginių (lot. *Cucurbitaceae*) rūšys buvo auginamos skirtingiems tikslams – maistui, vaistams, žvejybos įrankiams, aprangai. Pirmasis žinomas šiltnamio apibūdinimas rašytiniuose šaltiniuose yra beveik dviejų tūkstančių metų senumo, kai senovės romėnų imperatorius Tiberijus reikalavo šviežių agurkų ne sezono metu. Jie būdavo sodinami didelėse talpose ant ratų ir uždengiami talko ar žėručio „langais“ tam, kad dienomis lauke gautų šviesos, o naktimis ar esant ypač šaltam ar lietingam orui būtų įvežami į patalpas [10]. Naujaisiais laikais, didėjant maisto poreikiui, pradėta ieškoti kitų būdų, kaip kuo efektyviau užtikrinti stabilų šviežių vaisių ir daržovių tiekimą ištisius metus. Nemažiau svarbus buvo ir efektyvus augalų užauginimas moksliniams tyrimams, norint išsiaiškinti įvairių parametrų įtaką augimui. Šiam tikslui įgyvendinti 1949 metais Pasadenoje, Kalifornijoje buvo sukurtas pirmasis fitotronas – patalpa su kontroliuojamu apšvietimu, temperatūra, drėgme, anglies dioksido kiekiu. Praėjusio amžiaus šeštajame dešimtmetyje fitotronai buvo įrengiami įvairiuose Japonijos universitetuose ir tyrimų institutuose, o jau aštuntajame dešimtmetyje Hitachi korporacijos mokslininkai pirmieji pradėjo vykdyti testus su augalų fabrikais. Bėgant metams stengtasi pritaikyti naujas technologijas, tokias kaip fluorescencinis apšvietimas, efektyvus augalų išdėstymas keliais aukštais, robotų panaudojimas. 2012 metų apklausos duomenimis, Japonijoje veikė 106 augalų fabrikai naudojantys dirbtinį apšvietimą, 21 naudoja tiek dirbtinę, tiek natūralią šviesą, o 84 – tik natūralų apšvietimą [11].

Ateinančiais metais prognozuojamos augalų fabrikų rinkos augimas. Numatoma, kad LED apšvietimo modelių agrokultūrai rinka išaugs nuo 342 mln. Eur 2013 metais iki 3,1 mlrd. Eur 2020 metais (kasmetinis augimas virš 37 %) [12]. Šiltnamių rinkoje dirbantys verslininkai ieško būdų, kaip padidinti augalų ir daržovių auginimo mastą, tuo pačiu sumažinant vandens bei energijos sąnaudas. Šiuo metu, ši rinka užima daugiau nei 13 milijardų hektarų žemės ploto ir yra atvira naujoms žemės ūkio technologijoms, kurios leistų augalus bei grūdines kultūras auginti be saulės šviesos, uždaroje auginimo sistemose miestuose arba netoli jų. Rinkos augimą turėtų spartinti ir vis didėjantis ekologiško maisto poreikis, kuris užauginamas be įvairių pesticidų, sintetinių trąšų ar augimo reguliatorių. Tai ypač pastebima šiaurės Amerikoje, kur per kelis pastaruosius metus ypač padidėjo ekologiško maisto pardavimai [13].

1.1.3 Pagrindiniai komponentai

Pagrindiniai kontroliuojamos aplinkos auginimo sistemų komponentai yra:

1. patalpa arba sandėlis, kuri yra termiškai izoliuota nuo išorės;
2. daugiaaukštės lentynos, ant kurių dedami augalai;
3. oro kondicionieriai, skirti patalpos oro cirkuliacijai, vėsinimui;
4. fluorescencinis arba LED apšvietimas, sumontuotas kiekvienoje lentynoje;
5. valdymo, anglies dioksido ir maisto medžiagų tiekimo blokai [14].

1.1.4 Ekonominiai aspektai

Šiuo metu pasaulis susiduria su trilema kurią sudaro trys lygiavertės sąlygos: maisto trūkumas ir/arba nestabilus jo tiekimas, resursų trūkumas ir poveikis aplinkai [8]. Jungtinės Tautos prognozuoja, kad iki 2050 metų daugiau nei du trečdaliai (apie 6,3 milijardo) pasaulio gyventojų gyvens miestuose [1], todėl šviežių vaisių ir daržovių tiekimas pareikalaus vis daugiau pastangų [PF1]. Resursų trūkumą sudaro ariamosios žemės plotai, vanduo, trąšos ir iškastinio kuro naudojimas bei ūkininkavimo apimčių mažėjimas. Neigiamą poveikį aplinkai sudaro atmosferos, vandens ir dirvožemio tarša, dykumėjimas, karščio ir šalčio bangos, sausra, smarkios liūtys, potvyniai, stripūrės vėjai ir kt. [8]

Tinkamai suprojektuotos ir valdomos auginimo sistemos gali stipriai prisidėti prie vieno iš svarbiausių tikslų – užtikrinti šviežių vaisių ir daržovių tiekimą miestų vietovėms visus metus [9] dėl šių pagrindinių privalumų:

- didelis resursų naudojimo efektyvumas;
- didelis metinis produktyvumas ploto vienetui;
- aukštos kokybės augalų užauginimas nenaudojant pesticidų [8].

Resursų, tokių kaip šviesos energija, vanduo ir maisto medžiagos, naudojimas gali būti nuolat kontroliuojamas, norint pasiekti didesnę efektyvumą. Taip pat, palyginus su auginimu atvirose laukuose, augalų fabrikuose pasiekiamas didelis metinis produktyvumas ploto vienetui, nes auginimo erdvės yra išnaudojamos ištisus metus. Augalai užauginami greičiau, jie nėra pažeidžiami blogų oro sąlygų ar kenkėjų. Kiti privalumai aptariami 1.1 lentelėje [8]:

1.1 lentelė. Kontroliuojamos aplinkos auginimo sistemų privalumai

Privalumas	Apibūdinimas
Auginimo aplinkos kontrolė	Oro temperatūra, anglies dioksido, apšvietimo kokybė ir periodiškumas, oro cirkuliacijos greitis ir kiti parametrai yra reguliuojami viso proceso metu.
Didelis atkuriamumas ir derliaus kiekio bei kokybės nuspėjamumas	Galimybė planuoti ir numatyti gamybą, nepaisant oro sąlygų.
Atsekamumas	Rizikų valdymas, taikant naujausias technologijas.
Pritaikymas vietai	Sistemos gali būti įrengtos mažai apšviestose, užterštose, mažai derlingose vietovėse, apleistuose namuose, taip pat labai šaltose, karštose vietose.
Augalų švara	Nereikalingas augalų plovimas ar terminis apdorojimas prieš patiekiant, jei augalai supakuojami toje pačioje patalpoje. Tai sumažina vandens, elektros ar dujų kaštus vartojimo išlaidas.
Saugi ir patogi darbo aplinka	Aplinkoje palaikoma komfortiška temperatūra ir vidutinė oro cirkuliacija.
Galiojimo laikas	Salotos galiojimo laikas yra maždaug 2 kartus ilgesnis, lyginant su užaugintomis lauke, dėl mažesnės bakterinės taršos.
Mažas plotas	Fabrikai gali užimti nedidelį plotą, nes augalai auginami kelių aukštų lentynose, o iki 10 m ² plotą užimančios sistemos yra tinkamos įvairiems tyrimams ir mokymo tikslams namuose, mokyklose ar instituteuose.
Augalų įvairovė	Gali būti auginami įvairūs augalai, tokie kaip salotos, špinatai, bazilikas, mėta ir kt.
Tarša	Aukštas išteklių panaudojimo efektyvumas pasiekiamas su minimalia išorinės aplinkos tarša.

Vienas iš didžiausių kontroliuojamų aplinkos sistemų trūkumų ir tobulintinių aspektų yra didelės išlaidos. Tai apima aukštas diegimo ir gamybos kainas. Apskaičiuota, kad išorinių konstrukcijų statybų kaštai yra tokie pat dideli, kaip ir vidaus sistemų įrengimo. Nustatyta, jog didžioji dalis – elektros išlaidos, kurių net 70–80 procentų sudaro apšvietimas, likusi dalis – oro kondicionavimas, siurbiai, ventiliatoriai [8]. Kitos išlaidos – medžiagos (sėklos, trąšos, substratas), pakavimas, transportavimas ir darbuotojų atlyginimai bei įrangos nuvertėjimas. Teoriškai, elektros energijos suvartojimas vienam kilogramui augalų išauginti galėtų būti sumažinamas apie 50–80 procentų, atsižvelgiant į šiuos veiksnius:

1. naudoti technologiškai pažangesnį LED apšvietimą, kad pagerinti elektros energijos virsmą šviesos energija;
2. tobulinti apšvietimo sistemą su gerai suprojektuotais atšvaitais (reflektoriais), tokiu būdu padidinant santykį tarp lempų skleidžiamos ir lapų absorbuojamos šviesos energijos;
3. pagerinti šviesos kokybę, kad padidinti augalų produktyvumą;
4. optimaliai kontroliuoti temperatūrą, anglies dioksido koncentraciją, drėgmę ir kitus aplinkos faktorius;
5. atitinkamai parinkti augalų kultūras, kad didžioji užaugusių augalų masės dalis būtų maksimaliai naudinga [8].

Kad būtų pelningi, augalų fabrikai šiuo metu yra apriboti lapinių daržovių auginimu. Jau praėjusio amžiaus devintajame dešimtmetyje buvo užaugintos pirmosios daržovės – sviestinės ir lapinės salotos [2]. Jos, kaip ir kitų rūšių salotos, yra dažniausiai pasirenkamos dėl kelių priežasčių: didžiąją dalį šių

augalų biomasės sudaro valgomi lapai, didelė paklausa ištisus metus, aukštas produktyvumas per trumpą ciklą ir nedidelis aukštis. Taip pat, energijos kaštai yra sąlyginai mažesni, kadangi lapinės daržovės gali augti, esant mažesniai šviesos intensyvumui [7]. Taip pat auginamos ir kitos lapinės daržovės: smidrinė salota (*Lactuca sativa* var. *angustana*), tamsusis kopūstas (*Brassica rapa* var. *perviridis*), sareptinis bastutis (*B. juncea*), gražgarstė (*Eruca vesicaria*), ilgavaisis džiuotas (*Courchorus olerius*), kvapusis bazilikas (*Ocimum basilicum* L.) ir krištolinė pluoštagėlė (*Mesembryanthemum crystallinum* L.) [2]. Nukritus gamybos kaštams, padidėtų užauginamų augalų įvairovė. Keletas potencialių augalų – ropės, morkos, ridikėliai, kurie užauginami per kelias savaites po sėjos. Jei kontroliuojamos aplinkos sistemose su dirbtiniu apšvietimu daržovės būtų užauginamos ne tik šviežioms salotoms, bet ir kaip žaliavos, jų rinkos vertė drastiškai pakiltų ir galėtų susiformuoti nauja miesto žemės ūkio šaka [8]. Dar daugiau potencialo turi įvairūs vaistiniai augalai, kurie kontroliuojamose sistemose galėtų būti auginami dėl tikslinių metabolitų [15] [16].

Augalų fabrikuose galėtų būti auginami įvairūs vaistiniai, didesnę vertę turintys, augalai. Dėl galimybės kontroliuoti auginimo sąlygas, galima auginti žaliavas dėl tikslinio metabolito ir standartizuoti jų kokybės parametrus [17]. Atliekama aibė tyrimų, norint nustatyti įvairių parametru įtaką augalų augimui bei gebėjimui sukaupti didesnes koncentracijas fitocheminių medžiagų. Tyrimų objektai dažniausiai yra įvairūs vaistinėmis savybėmis pasižymintys augalai, kaupiantys biologiškai aktyvias medžiagas. Vienas iš tokių – vaistinis arūtras (lot. *Fagonia indica*), žinomas dėl aukštos fenolinių junginių koncentracijos audiniuose [18]. Kitas svarbus medicininis augalas – vaistinė guostė (lot. *Cnidium officinale*), laikomas turtingu polifenolių, ftalidų ir flavonoidų šaltiniu [19]. Tyrėjams taip pat įdomi peruvinė tevecija (lot. *Thevetia peruviana*) – dėl antioksidantų kaupimo [20], kininis ženšenis (lot. *Panax ginseng*) – dėl didėjančio ginsenzidų kiekio [21], veikiant LED apšvietimu, krūminė perilė (lot. *Perilla frutescens*) – dėl sukauptamų antocianų [22] ir daug kitų. Vaistinių augalų, auginamų kontroliuojamoje aplinkoje, plėtrai reikalingi tolesni tyrimai su įvairiais, gydančiu poveikiu pasižyminčiais augalais, siekiant kontroliuoti aktualių fitocheminių medžiagų koncentracijas [23].

1.2 Plunksninė kalankė (lot. *Kalanchoe pinnata*)

1.2.1 Storlapinių (lot. *Crassulaceae*) šeimos augalai. *Kalanchoe* gentis

Storlapinių (lot. *Crassulaceae*) augalų šeimą sudaro maždaug 1400–1500 rūšių, suskirstytų į 33 gentis. Didžioji dalis – daugiametės žolės, įvairūs krūmai, o kartais ir medžius primenantys augalai, turintys sukulentinius lapus, stiebus ar šaknis [24]. Sukulentais vadinama augalų grupė, turinti audinį, kuriame sukauptas maisto medžiagų ir vandens atsargos per trumpą laiką. Dėl šios priežasties, augalai yra gerai prisitaikę prie itin sausų, ekstremalių aplinkos sąlygų [25]. Storlapinių atstovai dažniausiai randami sausose ir kalnuotose vietovėse, subtropiniuose regionuose – Meksikoje, Makaronezijoje, Viduržemio regione, Himalajuose ir pietų Afrikoje, kur, manoma, yra šių augalų kilmės centras [24]. Europoje kai kurios storlapinių rūšys yra auginamos kaip kambariniai dekoratyviniai augalai (lot. *Kalanchoe pinnata*, lot. *Kalanchoe daigremontiana*) [26]. Pagrindiniai augalų bruožai – stori, sultingi, mėsingi lapai, padengti vaško sluoksniu, taisyklingai išsidėstę žiedai (skėčio, šluotelės arba varpos pavidalo žiedynuose), vegetatyvinis dauginimasis (pridėtiniai pumpurai ant lapų nukritę iššaknija) [27]. Šios šeimos augalai nėra laikomi tokiais svarbiais, lyginant su kitomis plačiai auginamomis kultūromis, tačiau yra naudojami daržininkystėje. Dauguma narių pasižymi neįprastai patrauklia išvaizda, yra tvirti, reikalaujantys tik minimalios priežiūros. Augalai

ilgą laiką buvo ir tebėra naudojami mediciniais tikslais, gydant žaizdas, uždegimą, kosulį, odos bei kitas ligas [28].

Kalanchoe gentis, priklausanti storlapinių (lot. *Crassulaceae*) šeimai, pasižymi įvairiomis gydomosiomis savybėmis. Gentis turi apie 125 rūšis, daugiausiai Madagaskare, Afrikoje, Brazilijoje ir kelias – tropinėse klimato zonose. Augalai pasižymi storais stiebais ir ovalo formos lapais, pritaikytais vandeniui ir rūgštims kaupti [27]. Tokia struktūra yra svarbi įvairių junginių kaupimui, kurie gali būti suskirstyti į kelias grupes: flavonoidų glikozidai, antocianinai, kumarinai, bufadienolidai, triterpenoidai, fenantrenai, steroliai bei riebiosios rūgštys [28]. Dėl daugybės sukauptų junginių, šios genties augalai pasižymi gydomosiomis savybėmis ir yra naudojami skirtinguose pasaulio regionuose gydant įvairias infekcijas, inkstų akmenis, skrandžio opas ir kt. (1.2 lentelė) [26]. Plunksninė kalankės pritaikymas, lyginant su kitomis rūšimis, yra plačiausias [26].

1.2 lentelė. Kalanchoe genties augalų panaudojimas medicinoje

Rūšis	Geografinis regionas arba šalis	Naudojimas
<i>Kalanchoe crenata</i>	Dramblio kaulo krantas, Uganda	Medicininis augalas, naudojamas nėštumo metu. Augalo lapai rekomenduojami gydyti naujagimių virkštelių žaizdas.
<i>Kalanchoe daigremontiana</i>	Tyrimai atlikti Vokietijoje	Dažnai skiriamas vaistas fizinio susijaudinimo, nerimo mažinimui.
<i>Kalanchoe densiflora</i> Rolfe	Kenija	Žaizdų gydymui.
<i>Kalanchoe glaucescens</i> Britten	Uganda	Lapai naudojami gydymui nuo kosulio
<i>Kalanchoe gracilis</i>	Taivanas	Traumų, uždegimo gydymui, vaistas nuo skausmo
<i>Kalanchoe laciniata</i> L.	Pietinis Indijos regionas, Malaizija, Filipinai, Kambodža, Laosas	Lapų sultys naudojamos išoriniam sąnarių skausmo gydymui. Iš augalo lapų pagaminti milteliai – vaistas nuo kosulio, peršalimo, uždegimo, galvos skausmo. Sutrinti lapai uždedami ant kūno, kad sumažinti temperatūrą ir gydyti opas.
<i>Kalanchoe pinnata</i> Lam. arba <i>Bryophyllum pinnatum</i> Lam.	Indija, Trinidadas ir Tobagas, Himalajai, Vietnamas, Nigerija, Uganda, Bangladešas	Dizenterijos, kosulio, odos problemų, astmos gydymui. Naudojamas vabzdžių įkandimų, nubrodinimų, žaizdų, uždegimo, auglių gydymui. Lapų pasta užtepama ant odos po skorpionų įkandimo. Žoliniai preparatai iš šaknų ir lapų rekomenduojami moterims atsistatymui po gimdymo. Išmirkytų lapų pasta – išoriniam raumenų ir sąnarių skausmo mažinimui. Neapdoroti lapai kramtomi su cukrumi gydant viduriavimą.

1.2.2 Plunksninės kalankės (lot. *Kalanchoe pinnata*) pagrindinės charakteristikos

Plunksninė kalankė (lot. *Kalanchoe pinnata* arba *Bryophyllum pinnatum*) – sukulentinis, daugiametis, storlapinių šeimai priklausantis augalas, augantis vidutinio klimato regionuose Azijoje, Australijoje, Naujojoje Zelandijoje, Makaronezijoje, Polinezijoje ir Havajuose. Pastaruosiuose kalankė laikoma kaip invazinis augalas, o Prancūzijos Polinezijoje – kaip grėsmė biologinei įvairovei. Pagrindinės charakteristikos pateikiamos 1.2 lentelėje [29]:

1.2 lentelė. Plunksninės kalankės charakteristikos

Aukštis	0,3–1,2 metro.
Stiebas	kampuotas; jaunesnės dalys raudonos spalvos, senesnės – šviesios spalvos.
Lapai	išsidėstę poromis, 8–12 cm ilgio, ovalo ar elipsės formos, sultingi, mėsingi, padengti vaškiniu sluoksniu; pumpurai išsidėstę aplink lapą, nukritę lengvai sudygsta; rūgštaus skonio.
Žiedai	raudonai violetiniai.
Sėklos	mažos, lygios, pailgos (elipsės formos).
Savybės	žinomas kaip gydomųjų savybių turintis augalas, dažnai naudojamas liaudies medicinoje įvairiems susirgimams gydyti.

Nuo senų laikų plunksninė kalankė (1.1 pav) yra žinoma kaip gyvybės augalas. Šis daugiametis žolinis augalas yra naudingas tiek liaudies, tiek šiuolaikinėje medicinoje dėl įvairių gydomųjų savybių. Augale randama daugybė fitocheminių medžiagų, tokių kaip flavonoidai, saponinai, taninai ir alkaloidai. Taip pat nustatyta vitaminų (askorbo rūgštis, riboflavinai, tiaminas, niacinas) ir mineralų (kalcis, cinkas, fosforas). Tyrimai rodo, kad augalų lapai pasižymi antimikrobinu, priešgrybiniu, antihipertenziniu, antidiabetiniu, priešūždegiminiu, analgetiniu ir žaizdas gydančiu poveikiu. Yra duomenų, kad lapai turi įtakos auglių formavimosi mažinimui ir suteikia relaksacinį efektą raumenims. Žolininkai įvairiose Afrikos vietose naudoja vandeninį ekstraktą kosuliui gydyti, o Nigerijoje, Benino mieste, augalo lapai yra užverdami, filtruojami per švarų audinį ir naudojami astmos gydymui. Seniau Afrikoje kalankė buvo naudojama gimdymui palengvinti, opoms ir įvairioms odos ligoms gydyti [30].

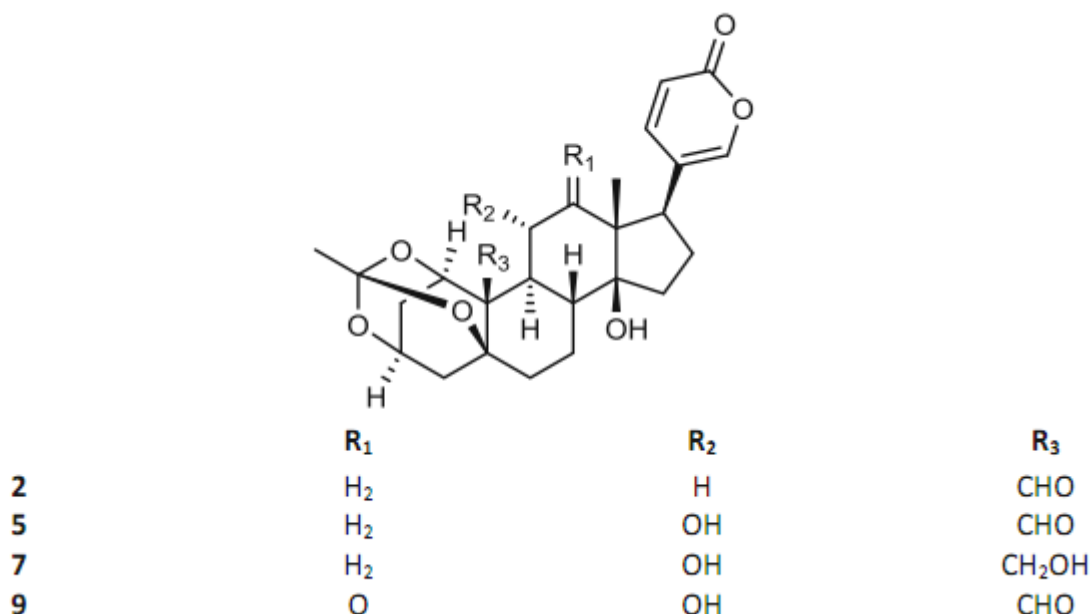


1.1 pav. Plunksninė kalankė (lot. *Kalanchoe pinnata*)

Platus gydomasis poveikis pasireiškia dėl daugybės augalo lapuose ir žievėje esančių flavonoidų, alkaloidų, vitaminų, mineralų ir kitų medžiagų. Kalankės ekstraktas etanolyje parodė reikšmingą žaizdų gijimo poveikį, sumažindamas pažeistos vietos plotą. Didelis kiekis lapuose esančių fenolių ir flavonoidų siejama su aukštu antioksidaciniu aktyvumu, kuris pasireiškia laisvųjų radikalų ir mikroorganizmų inhibicija. Atlikus tyrimus su žiurkėmis nustatytas antivėžinis potencialas panaudojus augalo chloroformo ekstraktą – buvo sumažintas auglio augimo ir kai kurių vėžinių

ląstelių susidarymo greitis dėl tam tikrų fitokomponentų poveikio [31]. Lapų sultys pasižymi ir reikšmingu antibakteriniu poveikiu *in vitro* prieš *Staphylococcus*, *E. coli*, *Shigella*, *Bacillus* ir *Pseudomonas* genties bakterijas. Kiti *in vivo* tyrimai patvirtina augalo gebėjimą mažinti karščiavimą, skausmą, uždegimą [32].

Plunksninė kalankė yra vienas iš nedaugelio storlapinių ir hiacintinių šeimos augalų, kurie geba sintetinti bufadienolidus. Tai grupė polihidroksilių (C–24) steroidų ir jų glikozidų. Jų struktūra susideda iš šešianario laktono (alfa–pyrono) žiedo, prijungto 17 anglies atomo beta pozicijoje. Didelė dalis literatūroje aprašytų tyrimų buvo atliekami naudojant gyvūninės kilmės bufadienolidus, o šių junginių, išskirtų iš plunksninės kalankės, cheminės ir biologinės savybės yra mažiau žinomos. Skirtingos tyrėjų grupės nustatė, kad iš plunksninės kalankės išskirti bufadienolidai siejami su antivėžiniu, priešuždegiminiu, antivirusiniu poveikiu. Kai kurie junginiai yra izoliuoti iš *Kalanchoe* genties augalų, o jų struktūros nustatytos spektriniais metodais. Vieni pirmųjų identifikuotų junginių buvo briofilinas A (1.2 pav., 5), ir briofilinas C (1.2 pav., 7), o po metų – dar penki: bersaldegin-3-acetatas, bersaldegin-1,3,5-acetatas (BA–135–Ac), daigremontianinas, bersaldegin-1-acetatas ir metildaigremontinas [26].



1.2 pav. Briofilino A (5) ir C (7) struktūra

1.3 Šviesos įtaka augalų augimui

Šviesa yra mūsų planetos biologinės istorijos centras ir fotosintezės varomoji jėga. Saulės šviesa suteikė energijos gyvybei, kurios liekanos yra dabartinis žmonijos energijos šaltinis, ir kurią šiandien stengiamasi kuo efektyviau išnaudoti. Šviesa suteikia informaciją gyvybėms formoms, kad jos galėtų prisitaikyti prie jas supančios aplinkos, taip pat ir reguliuoja žmonių vidinį laikrodį bei fiziologiją. Augalams šviesa turi dar daugiau įtakos nei žmonėms dėl didesnio kiekio jų fotoreceptorių ir jautrumo ultravioletiniams ir infraraudoniesiems spinduliams [33].

Apšvietimas yra vienas svarbiausių faktorių augalo vystymuisi, morfogenezei, metabolizmui ir genų ekspresijai. Poveikis augalams charakterizuojamas dvejopai – šviesa suteikia energiją, reikalingą fotosintezės procesui ir kartu veikia kaip reguliuojantis augimą bei metabolizmą šviesos signalais. Keičiant spektrą, yra galimybė ne tik skatinti augimą ar kontroliuoti žiedų ir lapų formą, bet ir padidinti naudingų fitocheminių medžiagų koncentraciją. Augalai gali būti apšviečiami tiek natūralia, tiek dirbtine šviesa, kurios abi gali būti naudojamos skirtingiems tikslams pasiekti [34].

1.3.1 Kietakūnio (LED) apšvietimo potencialas

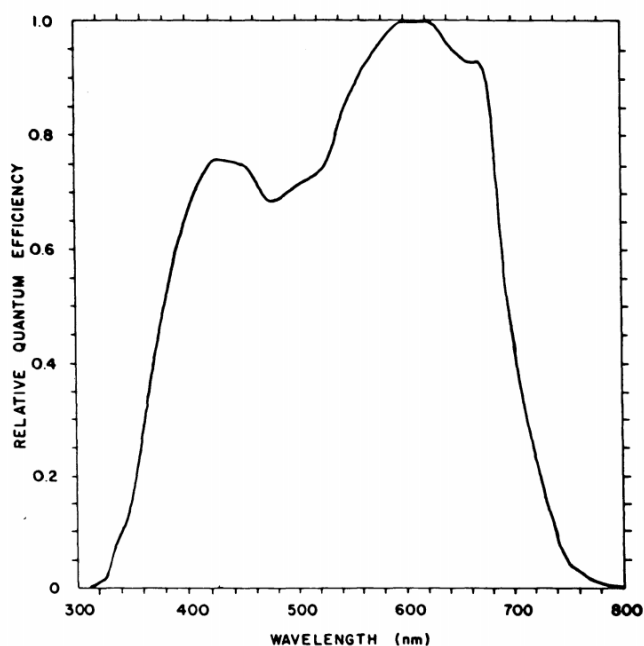
Evoliucionuojant apšvietimui, vis didesnis dėmesys buvo skiriamas į tai, kokį efektą tai daro augalams. Prieš maždaug 200 metų buvo pradėti tirti augalų stiebų pokyčiai, veikiant juos primityviais šviesos šaltiniais ir spalvotais filtrais. Prieš aštuoniasdešimt metų mokslininkai išsiaiškino, kad fotosintezei reikalingas panašus bangos ilgio diapazonas kaip ir žmogaus matymui, tačiau su didesniu jautrumu mėlynai ir raudonai šviesai. Dar po 30 metų, 1971–iais, senieji tyrimai buvo atnaujinti ir išsiaiškinta, kad augalų lapų derlius po raudona šviesa (600–700 nm) buvo 25–35 % procentais didesnis nei augusių po mėlyna šviesa (400–500 nm) ir 5–30 % didesnis nei augusių po žalia šviesa (500–600 nm). Deja, tyrimus lėtino ribotos galimybės reguliuoti šviesos sąlygas – buvo naudojama gana silpna ir tik monochromatinė šviesa atskiriems lapams. Fluorescencinių ir aukšto slėgio natrio lempų sukūrimas praplėtė galimybes, leidžiančias auginti augalus be saulės šviesos, tačiau jų intensyvumo ir spektro kontroliavimas vis dar išliko ribojantis veiksnys [33].

Kietakūnio apšvietimo sukūrimas iškart atrado savo vietą ne tik kasdienybėje, bet ir augalų tyrimuose. Šviesos šaltiniai, pagaminti iš neorganinių puslaidininkių, vadinami šviesą emituojančiais diodais (LED). Po jų pristatymo 1962 metais, gana greitai LED apšvietimas tapo neatsiejama kasdienybės dalis dėl gausybės privalumų, lyginant su kitomis apšvietimo rūšimis [35]. Visų pirma, vienos LED lemputės gyvavimo laikas siekia 25000–100000 valandų, jos sunaudoja mažiau energijos, spinduliuoja mažiau šilumos, yra mažesnės, tvirtos, greičiau įsijungiančios. Siauras LED spinduliuojamų dažnių plotis ir nesudėtingas reguliavimas yra itin svarbios savybės, taikant šį apšvietimą augalų tyrimuose. Tinkamai valdant LED apšvietimo sistemą galima sekti augalų augimą, užtikrinant optimalias sąlygas viso auginimo proceso metu. Tendencijos rodo, kad metalų halidai ir kitos dirbtinio apšvietimo rūšys palaipsniui bus pakeistos technologiškai pažangesniais ir ekonomiškai naudingesniais šviesą emituojančiais diodais [34].

1.3.2 Pagrindiniai apšvietimo parametrai

Pagrindiniais šviesos parametrais, reguliuojančiais augalų vystymąsi, yra laikomi intensyvumas, kokybė (spektras) ir trukmė. Realus eksperimento sąlygomis įtaką augimui daro ir kiti, sudėtingiau reguliuojami faktoriai, tokie kaip šviesos poliarizacija, tolygumas bei spektro paskirstymas [34]. Šviesos intensyvumo svarba yra ne kartą patvirtinta tyrimais. Daržininkystėje šviesos intensyvumas apibūdinamas fotosintetiškai aktyvios spinduliuotės tankiu (angl. *photosynthetic photon flux density*, *PPFD*) ir matuojamas $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Šio parametro didinimas lemia didesnę augalų derlių [36]. Paminėtina, kad tarp augale vykstančio fotosintezės proceso ir viduląstelinio kvėpavimo turi būti išlaikytas balansas. Didinant šviesos intensyvumą, fotosintezės procesas spartinamas iki tam tikro prisotinimo taško, po kurio viduląstelinis kvėpavimas vyksta sparčiau ir fotosintezė atitinkamai lėtėja. [34]. Trukmė arba fotoperiodas yra ne mažiau svarbus faktorius augalų tyrimuose, nes apšvietimo

laikas gali reguliuoti augalo morfologiją, biomasės kiekį ir maisto medžiagų pasisavinimą [37]. Tyrimai parodė, kad apšvietimo trukmės prailginimas padidina špinatų stiebo ilgį bei skatina fitohormono giberelo rūgšties sintezę [38]. Šviesą emituojančių diodų sukūrimas atvėrė galimybes plačiau tirti tam tikro ilgio bangų poveikį, veikiant augalus raudona, mėlyna, žalia ar kitomis šviesomis. Pirmieji tyrimai buvo atliekami naudojant daugiausiai raudoną šviesą, nes pagal McCree kreivę (1.3 pav) 660 nm ilgio bangos geriausiai absorbuojamos chlorofilo, tačiau greitai pasidarė aišku, kad mėlyna šviesa taip pat reikalinga normaliam augimui ir vystymuisi [39]. Mėlynos šviesos efektas buvo tiriamas auginant kviečius, naudojant raudonas LED lempas su mėlynomis fluorescencinėmis lempomis. Rezultatai parodė, kad pridėta mėlyna šviesa lėmė stambesnius augalus su didesniu skaičiumi sėklų, taip pat, šaknų sausoji masė didėjo, didinant mėlynos šviesos kiekį [40].



1.3 pav. McCree kreivė [41]

1.3.3 Spektro įtaka augalo fiziologiniams procesams

Skirtingi apšvietimo bangos ilgiai lemia įvairius efektus augalams. Šviesa – ne tik energijos šaltinis fotosintezės procesui, bet ir signalų nešėja, kontroliuojanti augimą, žydėjimo laiką, formą ir aukštį. Šiuos signalus priima ir atitinkamą augalo reakciją sukelia ląstelėse esantys fotoreceptoriai – fitochromai (PHY), kriptochromai (CRY) ir fototropinai (PHOT) [38] (1.4 pav). Raudoną ir tolimąją raudoną absorbuojantys PHY yra atsakingi už daugumą augalo fiziologinių procesų, tokių kaip žydėjimas, daigumas, šakojimasis ir kt. Kai PHY absorbuoja šviesą, jie persikelia iš citoplazmos į branduolį, kur reguliuoja fotomorfogenezę skatinančius genus. CRY yra aktyvuojami, kai absorbuoja UV ir mėlyną šviesą. Jie yra atsakingi už stiebo ilgėjimą, lapų plėtimąsi, žydėjimą ir kt. PHOT reguliuoja fototropizmą, lapų morfologiją, [LED7] skatina šaknų formavimąsi, fotosintezės proceso produktų transportavimą iš lapų į kaupimo organus [42].

Šviesa	Fotosintezės pigmentai	Morfogenetiniai fotoreceptoriai	Efektai augalams
Tolimoji raudona 700–740 nm		Fitochromas (350–800 nm) F _{TR} maks. 730 nm	<ul style="list-style-type: none"> Lemia morfogenetinius procesus
Raudona 620–700 nm	Chlorofilas a (662; 430 nm) Chlorofilas b (642; 453 nm)	F _R maks. 660 nm	<ul style="list-style-type: none"> Pagrindinė energija fotosintezei; Dalyvauja morfogenezės procesuose; Paskatina nitratų redukciją; Lemia antioksidacinių junginių kaupimąsi – askorbo rūgšties, fenolinių junginių, antocianų, tokoferolių.
Oranžinė 585–620 nm			<ul style="list-style-type: none"> Skatina karotinoidų kaupimąsi.
Geltona 550–585 nm			<ul style="list-style-type: none"> Gali stabdyti kai kurių rūšių augalų augimą; Kvantų našumas fotosintezei mažesnis, tačiau patekus į lapijos vidų, efektyviai panaudojama fotosintezei.
Žalia 490–550 nm			<ul style="list-style-type: none"> Kvantų našumas fotosintezei mažas, tačiau efektyviau nei kitų bangos ilgių spinduliuotė patenka į lapijos vidų, kur panaudojama fotosintezei.
Mėlyna 425–490 nm	Karotinoidai (450; 480 nm)	Kriptochromas (350–520 nm) (maks. 365, 445 nm) Fotropinai ir ZEITLUPE šeimos baltymai (apie 450 nm).	<ul style="list-style-type: none"> Efektyviai panaudojama fotosintezei; Skatina chloroplastų suformavimą, antocianų kaupimą; Paskatina fotosintezės produktų transportą iš lapų į kaupiamuosius organus; Slopina augalų ūšimą, skatina šaknų suformavimą, todėl naudinga auginant daržovių daigus.
Violetinė 400–425 nm			<ul style="list-style-type: none"> Mažiau efektyvi fotosintezei nei raudona šviesa.
UV 200–400 nm		UV-B fotosensorius (280–380 nm)	<ul style="list-style-type: none"> UV-A (~380–315 nm) skatina antocianų, fenolinių junginių sintezę; Paskatina pomidorų daigų augimą, vystymąsi.

1.4 pav. Fotoreceptorių reguliuojami augalo fiziologiniai procesai [42]

1.3.4 Šviesą emituojančių diodų (LED) apšvietimo poveikis vaistiniams augalams

Raudoną šviesą emituojantys diodai pagerina vaistinių augalų savybes. Paveikus įvairius augalus raudona LED šviesa, nustatytas teigiamas biomasės pokytis ir geresnis antioksidacinis aktyvumas. *In vitro* tyrimai su viena plačiausiai tiriamų vaistinių žolelių tikroju margainiu (lot. *Silybum marianum* L.) parodė, kad raudona šviesa padidino suminį fenolių kiekį (angl. *Total phenolic content, TPC*) ir antioksidacines savybes. HPLC analizių metu nustatyta, kad silimarino kiekis (18,67 mg/g sausos masės) buvo dvigubai didesnis nei kontrolinio varianto (9,17 mg/g sausos masės), padidėjo ir silikristino, izosilikristino, silidianino, silibino A ir silibino B kiekis [43]. Raudona šviesa teigiamai veikė ir tikrosios mirtos (lot. *Myrtus communis* L.) stiebų augimą, žalią masę, flavonoidų, galo rūgšties ir suminių antrinių metabolitų kiekį [44]. Auginant vaistinę medetką (lot. *Calendula officinalis*), monochromatinė raudona šviesa sukėlė lapų epinastiją, augimas buvo spartesnis, taip pat,

augalas turėjo daugiau lapų, lyginant su augusiais po balta šviesa [45]. Raudona šviesa didina lapų skaičių ir bendrą sausą plonojo verbenkrūmio (lot. *Lippia gracilis*) masę [46] bei plėvėtosios kulkšnės (lot. *Astragalus membranaceus*) daigumą [47].

Pridėjus tam tikrą kiekį mėlynos LED šviesos prie raudonos, stebimas įvairių augalo augimo parametrų padidėjimas. Atlikus tyrimus su paprastąja rusmene (lot. *Digitalis purpurea*) nustatyta, kad augalą veikiant raudona ir mėlyna šviesa (8:2), augalas pasižymėjo didesniu lapų skaičiumi, plotu, ilgesnėmis šaknimis ir didesniu sukauptu kiekiu karotinoidų, lyginant su kontroliniais augalais, užaugintais po fluorescencine lempa [48]. Mėlyna šviesa taip pat padidino ir raktažolėje (lot. *Lachenalia*) esančių fenolinių junginių kiekį [49].

Tolimoji raudona šviesa lemia augalo morfogenetinius procesus. Nustatyta, kad šis 700–740 nm bangos ilgio apšvietimas gali paspartinti varpelinės azorinos (lot. *Azorina vidalii*), lipniosios remanijos (lot. *Rehmannia glutinosa*) ir cimbidžio (lot. *Cimbidium*) genties augalų augimą bei vystymąsi [45]. Kiti tyrimai parodė, kad tolimoji raudona šviesa padidino įvairių augalų sausąją masę, tačiau matuojant lapų plotą gauti itin skirtingi rezultatai, kuriems dar trūksta pagrindimo [50].

Balta šviesa gali turėti įvairų poveikį augalams, kadangi spektras sudarytas iš raudonos, žalios ir mėlynos šviesos, kurių kiekis ir santykis spektre priklauso nuo LED spalvinės temperatūros [39]. Tyrimuose įvairiems tikslams pasiekti naudojami baltų ir raudonų, ar mėlynų LED deriniai. Užauginus krūminę perilę (lot. *Perilla frutescens*) nustatyta, kad baltos, raudonos ir mėlynos šviesos derinys lėmė pailgėjusius stiebus ir šaknis, taip pat ir didesnę antocianinų koncentraciją [22].

Šviesa turi eilę tiesioginių ir netiesioginių poveikių augalams, kuriuos galima išnaudoti, siekiant užauginti didelės pridėtinės vertės turinčių augalų, panaudojant LED apšvietimą. Literatūroje apžvelgti tyrimai rodo, kad šviesos spektro ir srauto efektai įvairiems augalams skiriasi. Remiantis šaltiniais, pagrindinės apšvietimo spektro komponentės yra raudona ir mėlyna, kurios suteikia energiją fotosintezės procesui, tačiau dėl skirtingos augalų reakcijos. R ir M šviesos santykis spektre skirtingoms rūšims yra nevienodas. Papildomos komponentės – žalia, geltona, tolimoji raudonoji, UV sritis iširtos kaip naudingos atskiriems metabolizmo aspektams. Ne mažiau svarbus yra ir šviesos srautas bei trukmė, kurie veikia augalo augimą ir antioksidacinės sistemos reakciją.

Augalų fabrikuose būtina siekti produkcijos pelningumo ir auginimo kaštų sumažinimo. Domimasi vis platesniu spektru galimai pelningų, naujų augalų. Dėl šios priežasties tyrimo objektu pasirinkta plunksninė kalankė, kuri kaupia bufadienolidus – farmacijai potencialius fitocheminius komponentus. Remiantis tuo, darbe pasirinkta nagrinėti pagrindinių (raudonos ir mėlynos) bei papildomų (žalios, tolimosios raudonos, UV-A šviesos) efektus plunksninių kalankių augimui ir antriniam metabolizmui. Taip pat svarbu ir atsižvelgti į ekonominius taikomo apšvietimo aspektus – ar gauti efektai atsvers padidėjusias išlaidas apšvietimui dėl pasikeitusio apšvietimo spektro ir srauto.

2. MEDŽIAGOS IR TYRIMŲ METODAI

2.1 Auginimo sąlygos

Tyrimai atlikti Lietuvos agrarinių ir miškų mokslų centro Sodininkystės ir daržininkystės institute, Aūgalų fiziologijos laboratorijoje. Imituojant augalų fabriko (angl. *plant factory*) sąlygas, augalai buvo užauginti uždaroje kontroliuojamo klimato kameroje, siekiant nustatyti kietakūnio apšvietimo efektyvumą. Kameroje buvo palaikoma 18 ± 2 °C nakties ir 21 ± 2 °C dienos temperatūra, 60–70 % santykinis oro drėgnis bei 800 ppm CO₂ koncentracija.

Tyrimo objektas – plunksninė kalankė (lot. *Kalanchoe pinnata*), auginta po kietakūniu apšvietimu kontroliuojamo klimato kameroje (2.1 pav). Augalai padaugini vegetatyviškai ir auginti durpių substrate „Profī mix“ (azoto koncentracija – 115 mg/l, P₂O₅ – 55 mg/l, K₂O – 160 mg/l, su mikroelementais – Fe, Mn, Cu, B, Mo, Zn, pH – 6–6,5, Durpeta, Lietuva) 0,45 litro tūrio plastikiniuose vazonuose. Laistyta pagal poreikį. Prigijus, kartą per savaitę tręšiama trąšomis su mikroelementais (Plagron Terra grow, Olandija). Apšvietimo eksperimentams naudoti vienodo išsivystymo lygio plunksninių kalankių daigai. Apšvietimo eksperimentų trukmė – 40 dienų. Apšvietimo schemas ir naudota apšvietimo įranga pateikiama kiekvienam atliktam eksperimentui atskirai.



2.1 pav. Plunksninės kalankės auginimas, taikant LED apšvietimą

2.2 Apšvietimo srauto ir trukmės įtaka

Kontroliuojamo klimato kameroje tirta PPFd ir fotoperiodo (apšvietimo trukmės) įtaka plunksninių kalankių augimo parametrams, antioksidacinei žaliavos gebai ir alkaloidų kiekiui audiniuose. Apšvietimo šaltinis – 230 W LED lempa „HLFC 08“ (Hortiled, Lietuva), sudaryta iš raudonų, mėlynų, oranžinių, violetinių ir baltų diodų (2.1 lentelė), išdėstytų aštuoniuose LED moduliuose. Apšvietimo spektre yra 20 % procentų mėlynos šviesos.

2.1 lentelė. Šviestuvo HLFC 08 spektrinė sudėtis

Šviesa	Bangos ilgis, nm	Diodų skaičius modulyje
Violetinė	420–430	1
Mėlyna	440–470	2
Oranžinė	610–615	1
Raudona	620–630	3
Sodri raudona	660–670	7
Balta (mėlyna/raudona/žalia)	6500 K	1

Keičiant atstumą tarp augalų viršūnių ir šviestuvo, sukurtos 150 ir 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ apšvietimo srauto (PPFD) sąlygos. Šviestuvai buvo įjungti 18 valandų ir 24 valandas. Skirtingo apšvietimo PPFd ir fotoperiodo sąlygomis (2.2 lentelė) plunksninės kalankės augintos 40 dienų.

2.2 lentelė. Eksperimentinės fotoperiodo, spinduliuotės ir suminio dienos šviesos kiekio sąlygos

Fotoperiodas, val	PPFD, $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	DLI, mol m^{-2} per parą
18	150	9,72
18	250	16,2
24	150	12,96
24	250	21,6

Srauto ir trukmės eksperimentui skaičiuojamas suminis dienos šviesos kiekis (angl. *daily light integral*, DLI), pasiekiantis augalus per vieną parą. Įvertinus lempų fotonų efektyvumą, nustatomos optimalios apšvietimo srauto ir apšvietimo trukmės sąlygos.

Suminis šviesos kiekis apskaičiuojamas pagal (1) formulę:

$$DLI = a * b * 3600 * 10^{-6} \quad (1)$$

čia: a – fotoperiodas, val; b – fotosintetiškai aktyvios spinduliuotės srautas, $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

$$DLI = 18 * 150 * 3600 * 10^{-6} = 9,72 \text{ mol m}^{-2};$$

$$DLI = 18 * 250 * 3600 * 10^{-6} = 16,2 \text{ mol m}^{-2};$$

$$DLI = 24 * 150 * 3600 * 10^{-6} = 12,96 \text{ mol m}^{-2};$$

$$DLI = 24 * 250 * 3600 * 10^{-6} = 21,6 \text{ mol m}^{-2}.$$

2.3 Apšvietimo spektro įtaka

Tyrimai atliekami trimis etapais. Tiriama pagrindinių apšvietimo spektro komponentų (raudonos ir mėlynos šviesos derinių) įtaka, papildomų spektro komponentų (žalios, tolimosios raudonos) įtaka bei baltos šviesos derinių įtaka plunksninių kalankių augimui, antioksidacinėms savybėms ir alkaloidų kiekiui žaliavoje.

2.3.1 Pagrindinių apšvietimo spektro komponentų efektas

Tirtas pagrindinių, raudonos ir mėlynos LED šviesos derinių efektas kalankių augimui bei antioksidacinėms savybėms. Eksperimentams naudoti originalaus dizaino valdomo spektro LED apšvietimo įrenginiai [51]. Lygintas vien raudonų LED ($\lambda=660$ nm) ir raudonų bei mėlynų ($\lambda=660$ nm; 445 nm) LED derinio įtaka kalankių augimui ir alkaloidų kiekiui audiniuose (2.3 lentelė). Bendras PPFD srautas abiem atvejais – $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ties augalo viršūne, mėlyna šviesa antrajame derinyje sudaro 10 % nuo PPFD (raudonos srautas atitinkamai mažesnis). Fotoperiodas – 18 valandų. Kitos sąlygos – kaip 2.1 skyrelyje.

2.3 lentelė. Tyrimo apšvietimo sąlygos

Apšvietimo derinys	PPFD, $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$		
	Raudona 660 nm	Mėlyna 445 nm	Bendras
Raudona (R)	250	0	250
Raudona (R) + mėlyna (M)	225	25	250

2.3.2 Papildomų apšvietimo spektro komponentų įtaka

Eksperimento metu tirta, kaip keičiasi augalo augimas, antioksidacinės savybės ir tikslinių metabolitų kaita raudonos ir mėlynos LED šviesos spektrą ($\lambda=660$ nm; 447 nm), papildžius žalia ($\lambda=523$ nm) arba tolimąją raudona šviesa ($\lambda=740$ nm). Tyrimui naudotos valdomo apšvietimo spektro ir srauto LED lempos Hortiled HLRD (Energenas, Lietuva), skirtos moksliniams tyrimams. Bendras PPFD srautas – $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ties augalo viršūne (raudonos šviesos srautas atitinkamai sumažintas, palaikant vienodą bendrą PPFD). Fotoperiodas – 18 val. Kitos sąlygos – kaip 2.1 skyrelyje.

2.4 lentelė. Papildomos apšvietimo spektro komponentės

Apšvietimo derinys	PPFD, $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$				Bendras
	Raudona (R) 660 nm	Mėlyna (M) 445 nm	Žalia (Ž) 523 nm	Tolimoji raudona (TR) 740 nm	
R+M	200	50			250
R+M+Ž	150	50	50		250
R+M+TR	150	50		50	250

2.3.3 Baltos šviesos derinių efektai

Eksperimento metu tirtas baltos LED šviesos efektyvumas plunksninių kalankių auginimui. Apšvietimui naudotos valdomo spektro RX30 LED lempos (Heliospectra, Suomija). Augalai apšviesti šalta balta 5700 K LED šviesa arba baltos ir tolimosios raudonos ($\lambda=735$ nm) ar ultravioleto A ($\lambda=380$ nm) šviesos deriniu. Bendras PPFD srautas – $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ties augalo viršūne, fotoperiodas – 18 val.

2.5 lentelė. Baltos šviesos apšvietimo deriniai

Derinys	PPFD, $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$			Bendras
	Balta 5700 K	Tolimoji raudona 735 nm	Ultravioletas A 380 nm	
B	250			250
B+TR	225	25		250
B+UVA	247.5		2.5	250

2.4 Analizės ir matavimai

Eksperimento pabaigoje, po 40 dienų trukmės apšvietimo eksperimentų, atsitiktine tvarka parinktiems 5 augalams atlikti biometriniai matavimai, nedestrukciniai lapų optinių indeksų matavimai, nustatytos antioksidacinės žaliavos savybės bei bufadienolidų kiekybiniai skirtumai žaliavoje.

2.4.1 Biometriniai matavimai

1. Liniuote išmatuotas augalo ilgis, suskaičiuotas lapų skaičius. Lapų plotas išmatuotas automatinio matuokliu „AT Delta-T Devices“ (Jungtinė Karalystė). Daiginių žalia ir sausa masės nustatytos gravimetriniu metodu, naudojant elektronines analitines svarstykles „Mettler Toledo AG64“ (JAV). Augalai džiovinti 70°C temperatūroje, 48 val. džiovinimo spintoje „Venticell 222“ (Čekija).

2. Lapų optiniai indeksai nustatyti nedestruktyviu metodu, naudojant matuoklį „Dualect Scientific™“ (Force-A, Prancūzija). Matavimai atlikti penkių augalų pirmame ir antrame pilnai išsivysčiusiuose lapuose (brandžiuose lapuose) bei jaunuose besiformuojančiuose lapuose. Chlorofilų indekso nustatymas paremtas lapo transmisijos matavimais raudonoje ir infraraudonojoje spektro dalyse.

Flavonolių indeksas pagrįstas chlorofilų fluorescencijos matavimu raudonoje srityje. Chlorofilų fluorescencijos rodmuo yra tiesiogiai proporcingas polifenolinių junginių kiekiui lapo epidermyje. Azoto balanso indeksas (angl. *Nitrogen balance index, NBI*), išreiškiamas kaip chlorofilų ir flavonolių indeksų santykis. Pateikiamos indeksų reikšmės – dešimties matavimų vidurkis (santykiniai matavimo vienetai).

2.4.2 Antioksidacinių plunksninės kalankės savybių nustatymas

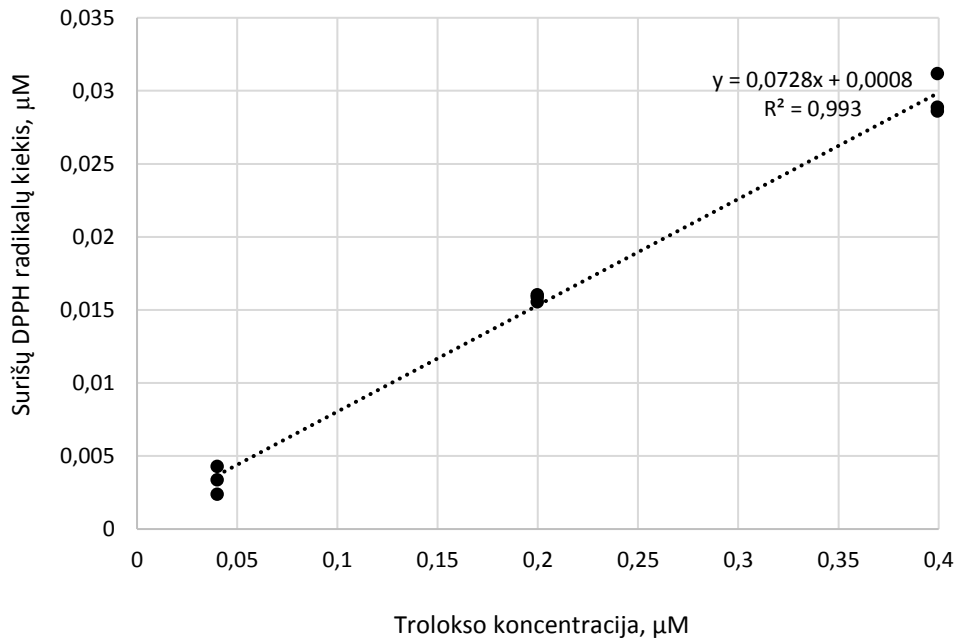
Trijų atsitiktinai parinktų augalų (trys biologiniai pakartojimai) iš kiekvieno apšvietimo varianto žaliava naudojama biocheminėms analizėms. Analizės atliekamos jaunuose ir brandžiuose augalo lapuose atskirai. Atliekami trys kiekvieno mėginio analitiniai matavimai.

Antioksidacinių žaliavos savybių nustatymui, augalinė žaliava užšaldoma ir sutrinama skystame azote, sumaišoma su 80 % metanolio vandeniniu tirpalu (1:20 m:v) ir ekstrahuojama 24 valandas tamsoje, kambario temperatūroje. Gaunamas ekstraktas, kuris vėliau centrifuguojamas 20 min 5000 aps. min⁻¹ greičiu. Supernatantas filtruojamas per celiuliozinį filtrą.

1. 2,2-difenilpikrilhidrazilo (DPPH) radikalų sujungimo geba

100 µL augalinio ekstrakto užpilama 400 µL metanolio ir 1 mL 63,4 µM koncentracijos metanolinio DPPH tirpalo. DPPH radikalams reaguojant su antioksidantais, esančiais augaliniame ekstrakto, jis „atiduoda“ vieną vandenilio atomą ir redukuojasi. Dėl šio priežasties stebimas DPPH tirpalo spalvos blukimas. Po šešiolikos minučių spektrofotometru „Spectronic Genesys 6“ (JAV) matuojama absorbcija, esant 515 nm bangos ilgiui. Palyginamasis tirpalas – metanolis [52].

Augalinės žaliavos geba surišti laisvuosius DPPH radikalus pateikiama kaip augalinės žaliavos (žalios masės) DPPH radikalų surišimo geba, ekvivalentiška trolokso antioksidacinei gebai, µM TE g⁻¹ žalios masės (TE – trolokso ekvivalentas) pagal skirtingų trolokso koncentracijų DPPH laisvųjų radikalų surišimo gebos kalibracinę kreivę (2.2 pav).

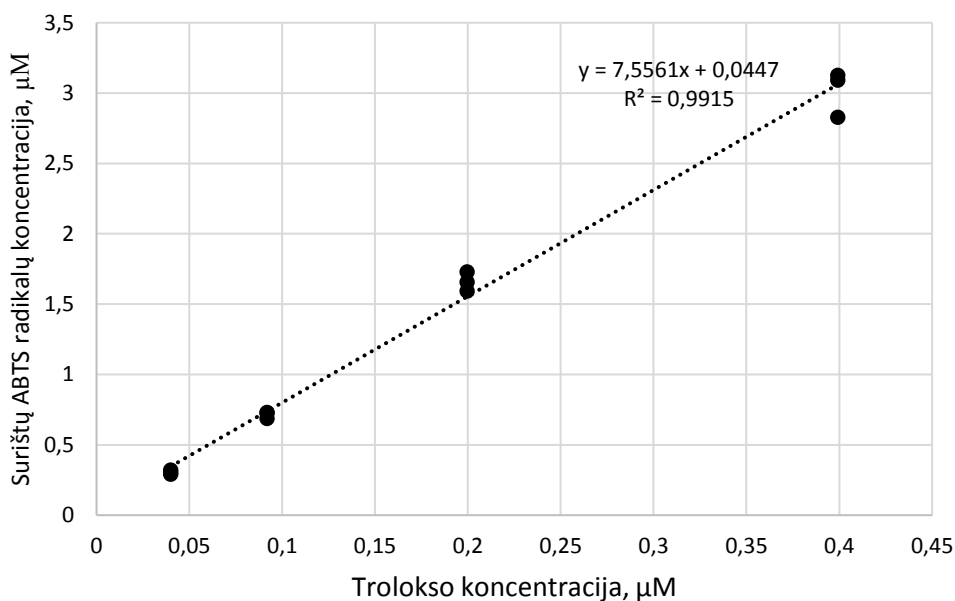


2.2 pav. DPPH laisvųjų radikalų surišimo gebos kalibracinė kreivė

2. 2,2'-azino-bis-3-etilbenziazolin-6-sulfono rūgšties (ABTS) radikalų surišimo geba

ABTS laisvųjų radikalų tirpalas paruošiamas sumaišius 50 ml 2mM ABTS su 200 μl 70 mM K₂S₂O₈. ir laikomas tamsioje patalpoje 15–16 valandų. Darbinis tirpalas paruošiamas skiedžiant šį pamatinį tirpalą, kol išmatuota sugertis, esant 734 nm bangos ilgiui yra apie 0,700. Matavimui naudojamas spektrofotometras „Genesys 6“ (JAV) [52].

50 μl augalo ekstrakto sumaišoma su 2 ml skiesto ABTS tirpalo ir po 11 minučių spektrofotometru matuojama tirpalo sugertis. Kalibracinei kreivei naudojami 0–1450 μM koncentracijų trolokso tirpalai. Troloksui ekvivalentiška antioksidacinė geba (TEAG) išreiškiama μmol TE g⁻¹ žalios masės.

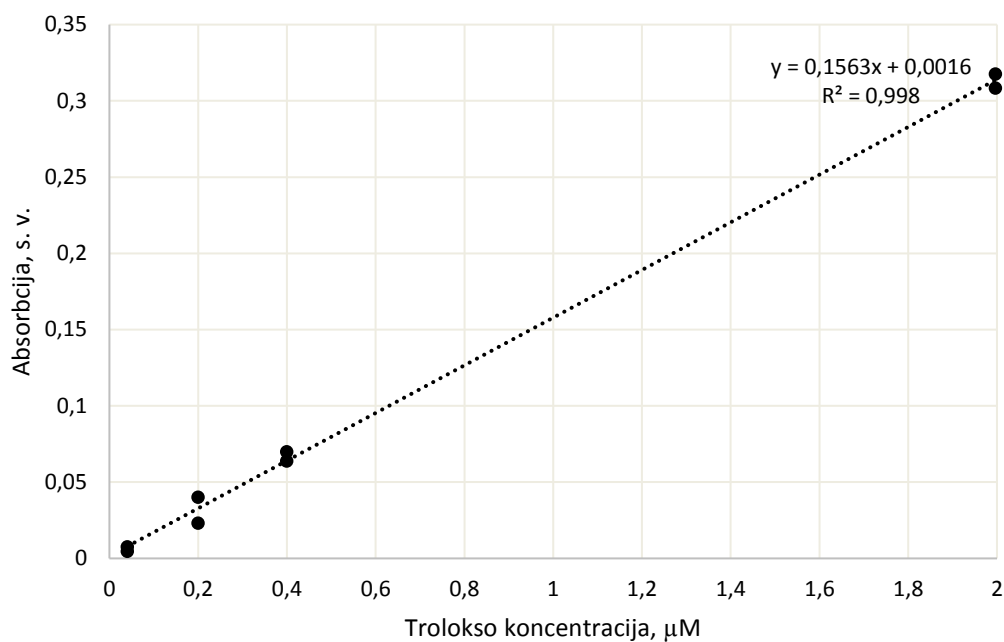


2.3 pav. ABTS laisvųjų radikalų surišimo gebos kalibracinė kreivė

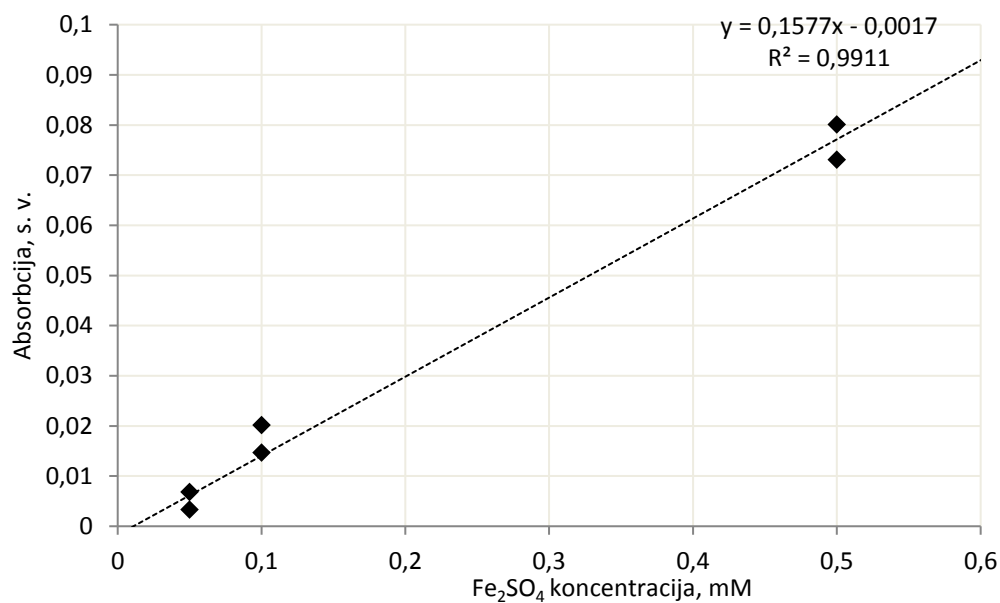
3. Geležies redukcijos antioksidacinė galia (FRAP)

Metodas paremtas trivalenčio geležies jono (Fe^{3+}) redukcija į divalentį (Fe^{2+}) geležies joną rūgštinėje (pH–3,6) aplinkoje ir Fe^{2+} bei 2,4,6-tripiridil-s-triazino (TPTZ) mėlynos spalvos kompleksu susidarymu.

Darbinis tirpalas paruošiamas sumaišius 300 mM koncentracijos acetatinį buferį (pH – 3,6), 10 mM TPTZ, ištirpintą 40 mM druskos rūgšties tirpale ir 20 mM geležies trichlorido ($\text{FeCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$) vandeninį tirpalą proporcijomis 10:1:1. 20 μl augalo ekstrakto sumaišoma su 3 ml darbinio tirpalo ir po 20 minučių spektrofotometru matuojama sugertis, esant 593 nm bangos ilgiui. Kalibracinei kreivei naudojami 0–1500 μM koncentracijų Trolokso (2.4 pav.) ir 0–1000 μM koncentracijų geležies sulfato (Fe_2SO_4) tirpalai (2.5 pav). Rezultatai pateikiami kaip Troloksui ekvivalentiška antioksidacinė galia (TEAG), $\mu\text{mol TE g}^{-1}$ žalios masės bei žaliavos Fe redukcijos antioksidacinė galia, $\mu\text{mol g}^{-1}$ [52].



2.4 pav. Kalibracinė kreivė, pagal trolokso koncentraciją



2.5 pav. Kalibracinė kreivė, pagal geležies sulfato koncentraciją

4. Bufadienolidų LC–MS analizė

Bufadienolidų LC–MS analizė atlikta 2.4.2 skyrelyje aprašytiems ekstraktams, nufiltruotiems per 0,2 µm porų skersmens nailoninį švirkštinį filtrą. Analizei naudota Shimadzu Nexera UHPLC-MS sistema (Shimadzu, Japonija) ir Kinetex XB-C18 (100x2,1 mm vidinio skersmens), 1,7 µm dalelių dydžio chromatografinė kolona (Phenomenex, JAV). Judrioji fazė: A – 10 mM amonio formatas vandenyje ir B – 0,05 % forminė rūgštis acetonitrile. Judriosios fazės gradientas: 5 % B – 1 min, per

3 min B iki 32 % B ir palaikyta 7 min, tuomet per 0,1 min B keliama iki 100 % ir palaikoma 1,9 min. Tuomet vėl 5 % B 0,9 min. Tėkmės greitis $0,4 \text{ mL min}^{-1}$ ir bendras analizės laikas – 14 min. Injekcijos tūris – $5 \mu\text{L}$. Masių spektrometrijos parametrai: N_2 dujų temperatūra ir 320°C esant tėkmės greičiui 10 L/min . Purkštovo slėgis – 30 psi; džiovavimo dujų temperatūra – 400°C esant tėkmės greičiui 11 L/min ; kapiliarinė įtampa 3500 V; purkštovo įtampa – 0 V, delta EMV 0 V. Teigiama elektropurkštuvinė jonizacija [53].

Augaliniuose ekstraktuose naudojant bufalino vidinį standartą, identifikuotas BA–135–Ac, bet tik pėdsakai bersaldegenin-1-acetato ar briofilino A. Kiekybiniai skirtumai vertinti kaip BA–135–Ac smailės ploto ir vidinio standarto santykis santykiniais vienetais.

2.5 Duomenų apdorojimas ir statistinė analizė

Rezultatuose pateikiamos reikšmės yra biologinių pakartojimų vidurkis±standartinis nuokrypis. Vidurkių tarp grupių palyginimui naudojama ANOVA analizės Dankano (angl. *Duncan*) kriterijus, kai $p=0.05$ bei principinių komponentų analizė (PCA): PCA koreliacijų ratas ryšiui tarp kintamųjų vertinti ir PCA sklaidos diagrama skirtumams tarp poveikio variantų vertinti. Duomenų apdorojimui naudota MS Excel ir Xlstat (Addinsoft, Prancūzija) duomenų apdorojimo programos.

2.6 Išlaidų – naudos analizė

Siekiant įvertinti taikyto apšvietimo ekonominius aspektus, apskaičiuotas apšvietimo fotonų bei biologinis efektyvumas, elektros energijos sąnaudos.

1. Apšvietimo fotoperiodo ir srauto taikymo ekonominiai aspektai

Nustačius augalų biometrinius ir biocheminius pokyčių rezultatus, įvertinami tam tikro fotoperiodo ir apšvietimo srauto ekonominiai aspektai. Remiantis šviestuvų techniniais parametrais, atliktame eksperimente $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ srautui sukurti reikalingas 180 W šviestuvai, kai $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ – 230 W šviestuvai (1.7 karto didesniai srautui sukurti reikia 1.28 karto daugiau galios). Vienas šviestuvai efektyviai dengia $1,5 \text{ m}^2$ plotą, tad priimama, kad 100 m^2 augalų fabrikui apšviesti bus panaudoti 67 šviestuvai. Elektros energijos kaina augintojui kainuoja 0,130 Eur/kWh (kaina gali keistis priklausomai nuo tarifo ir įmonei taikomu sąlygų) [54].

Apskaičiuojami suvartojimo skirtumai atsižvelgus į skirtingą fotoperiodą bei srauto intensyvumą. Gavus rezultatus, jie palyginami ir nustatomos optimaliausių apšvietimo sąlygų ekonominės sąnaudos.

2. Apšvietimo spektro taikymo ekonominiai aspektai

Skirtingų bangų ilgių LED šviesa pasižymi nevienodu elektros energijos konversijos į šviesos fotonų srautą efektyvumu [55]. Bendras apšvietimo įrenginio efektyvumas priklauso nuo įrenginio visuminės technologijos, tačiau remiantis spektro komponentų individualiu srautu bei jų fotonų efektyvumu galima apskaičiuoti teorines prielaidas santykiniais elektros energijos sąnaudų skirtumams, taikant skirtingą apšvietimo spektrą.

$$P(W) = \sum_{300}^{800} PPF D_{\lambda} * FE_{\lambda} \quad (2)$$

čia: P – galia, W; PPF D – fotosintetiškai aktyvios spinduliuotės srautas, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; FE – fotonų efektyvumas, $\mu\text{mol W}^{-1}$, 1...n.

Atskirų spektro komponentių (LED bangų ilgių) fotonų efektyvumas naudotas pagal pateiktus vidutinius įverčius (2.6 lentelė) [55]:

2.6 lentelė. Spektro komponentių fotonų efektyvumas

Spektro komponentė	Fotonų efektyvumas, $\mu\text{mol W}^{-1}$
Raudona (R)	1.72
Mėlyna (M)	1.87
Žalia (Ž)	0.5
Tolimoji raudona (TR)	0.8
Balta (B)	1.52
UV-A	0.6

Apšvietimo spektro efektyvumo biologiniai aspektai

Biologiniu požiūriu, skirtingų bangų ilgių šviesa yra nevienodai efektyviai įsavinama augalų lapų ir panaudojama fotosintezei. Šiuos dėsningumus apibūdina McCree kreivė, o jiems įvertinti apskaičiuotas našusis fotosintezės fotonų tankis (angl. *Yield photosynthetic photon flux density*, *YPPFD*). YPPFD apskaičiuotas šviesos spektro komponentės PPF D padauginus iš santykinės kvantų efektyvumo vertės [41].

3. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

3.1 Apšvietimo srauto ir trukmės įtakos įvertinimas

Tyrimo pradžioje įvertinta apšvietimo srauto ir fotoperiodo įtaka augalo žaliajai masei, sausajai masei, lapų skaičiui ir jų plotui bei augalo aukščiui (3.1 lentelė). Pasvėrus augalus nustatyta, kad 18 valandų fotoperiodas lėmė didesnę žaliąją masę, o srautas neturėjo žymios įtakos. Sausoji masė ir augalų lapų skaičius visais atvejais – panašūs. Akivaizdus skirtumas matomas, išmatavus augalų lapų plotą – 24 valandas apšviesti augalai pasižymėjo mažesniu lapų plotu. Didžiausias lapų plotas – 18 val ir 150 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ srautu apšviestų augalų (356,19 cm^2) nežymiai skiriasi nuo 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ srauto (349,60 cm^2). Augalų aukštis taip pat buvo didesnis, esant 18 valandų fotoperiodui, tačiau skirtumai yra nežymūs.

Panašūs rezultatai gauti tyrimuose su salotomis (lot. *Lactuca sativa* L.), kuriuose padidinus apšvietimo srautą užfiksuota didžiausia žalia masė ir aukštis. Kiti rezultatai parodė, kad aukštas apšvietimo intensyvumas kartu su trumpesniu fotoperiodu lėmė gerą augalų augimą ir vystymąsi [56]. Palyginus reikšmes, galima teigti, kad plunksninė kalankė į skirtingas sąlygas reaguoja panašiai, nes didinant fotoperiodą sumažėjo augalų žalia masė, aukštis, lapų plotas. Optimalios sąlygos – 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ šviesos srautas ir 18 val fotoperiodas.

3.1 lentelė. Apšvietimo srauto ir trukmės įtaka

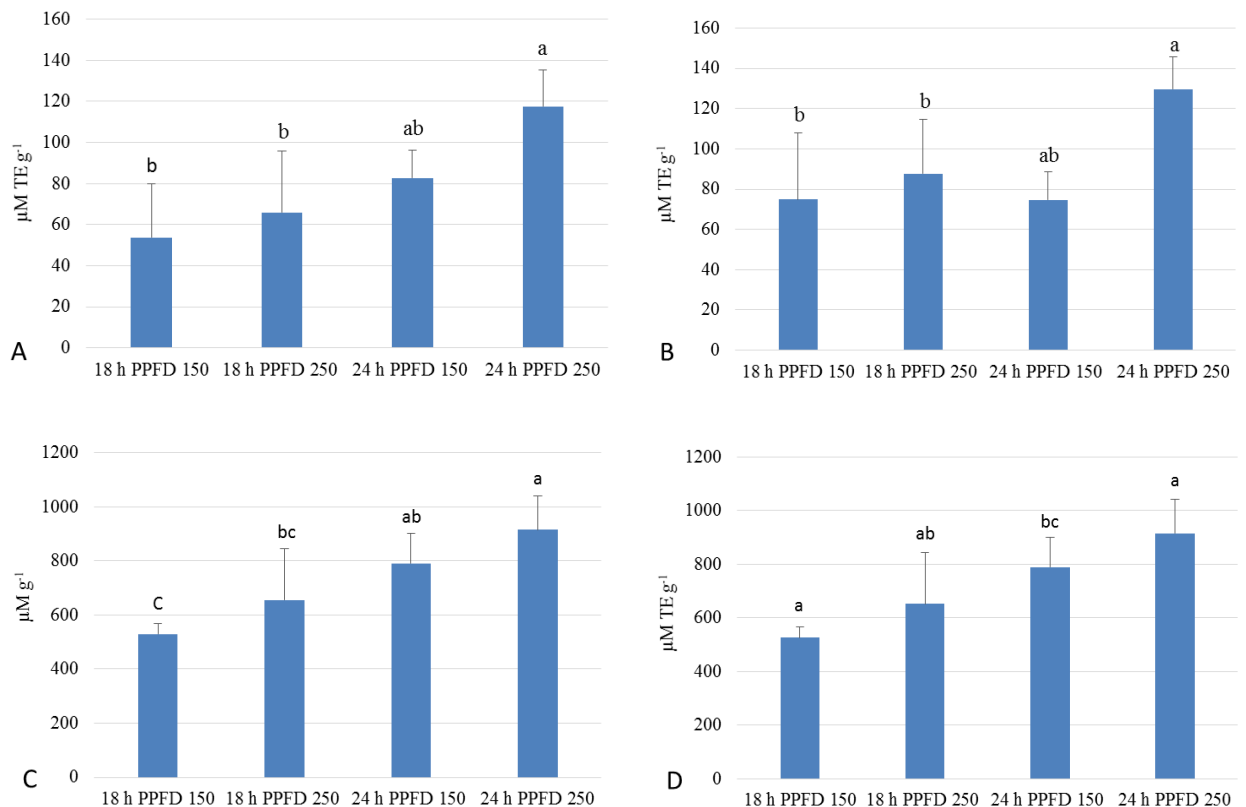
	18 val 150 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	18 val 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	24 val 150 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	24 val 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
Žalia masė, g	51,19±6,315 (A)	52,21±4,717 (A)	38,92±0,204 (AB)	45,36±3,404 (B)
Sausa masė, g	2,55±0,165 (A)	2,73±0,219 (A)	1,73±0,112 (B)	2,75±0,166 (A)
Lapų skaičius, vnt	7,67±0,577 (A)	8,00±0,000 (A)	7,67±0,577 (A)	8,33±1,528 (A)
Lapų plotas, cm^2	356,19±47,104 (A)	349,60±34,229 (A)	268,52±17,548 (B)	240,95±26,915 (B)
Aukštis, cm	11,33±1,155 (A)	11,43±0,902 (A)	10,50±0,870 (A)	9,83±0,289 (A)

Nedestruktyviu metodu nustačius jaunų ir brandžių lapų chlorofilo, flavonolių ir azoto balanso indeksą, rezultatai neišsiskyrė (3.2 lentelė). Įvertinus jaunus lapus, didžiausias chlorofilo indeksas užfiksuotas, esant 24 val trukmės ir 150 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ srauto apšvietimui (46,28 s. v.). Flavonolių indeksai taip pat nežymiai didesni, esant 24 valandų fotoperiodui. Azoto balanso indeksas didesnis, esant 18 valandų fotoperiodui. Srautas šiam indeksui beveik neturėjo įtakos. Subrendusių lapų rezultatai nežymiai skiriasi nuo jaunų. Didžiausias chlorofilo indeksas – 48,50 s. v. (24 val 150 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$). Flavonolių indeksas brandžiuose lapuose yra didesnis nei jaunuose, tačiau skirtumai yra nedideli.

3.2 lentelė. Lapų chlorofilų indeksai

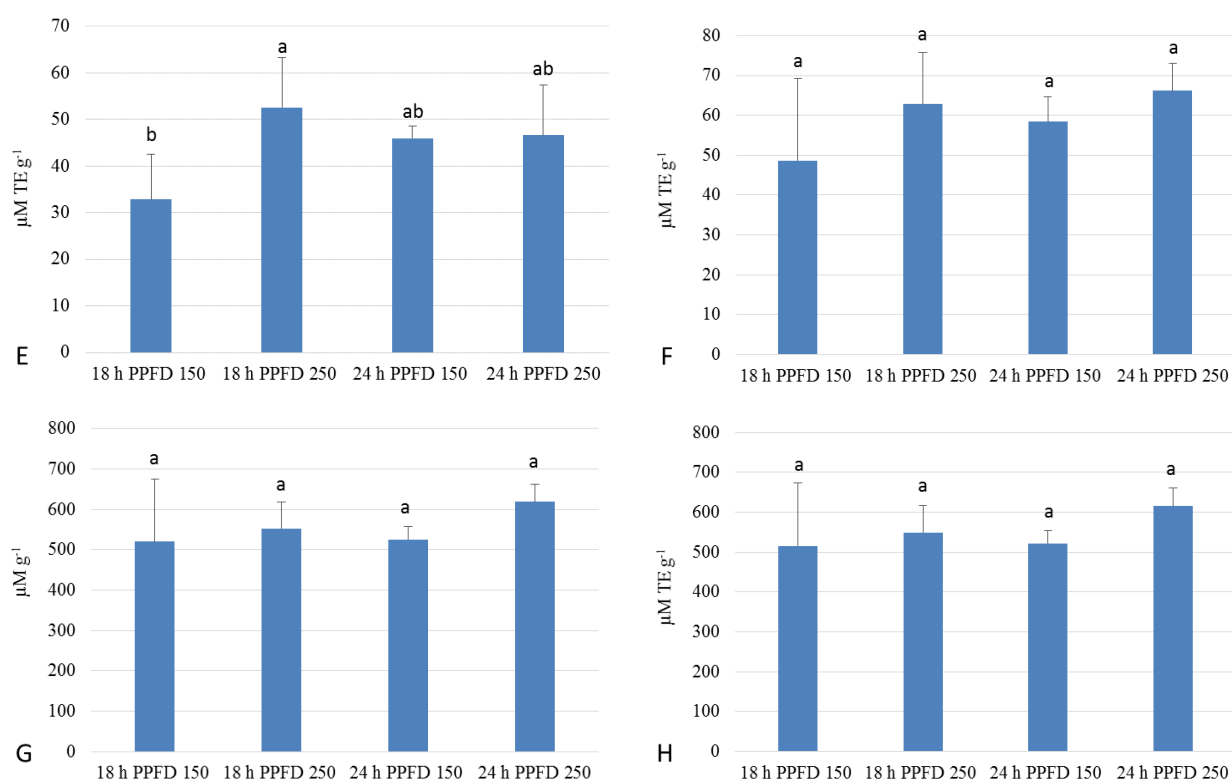
	18 val 150 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	18 val 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	24 val 150 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	24 val 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
Chlorofilo indeksas, s. v.	42,10±2,636 (A) 47,75±2,556 (A)	43,06±2,430 (A) 44,37±1,308 (A)	46,28±2,653 (A) 44,01±5,711 (A)	40,17±5,317 (A) 48,50±5,596 (A)
Flavonolių indeksas, s. v.	0,43±0,045 (B) 0,42±0,018 (C)	0,43±0,022 (B) 0,50±0,032 (BC)	0,47±0,025 (AB) 0,53±0,047 (B)	0,53±0,053 (A) 0,63±0,076 (A)
Azoto balanso indeksas, s. v.	101,48±17,092 (A) 114,38±9,746 (A)	101,68±6,067 (A) 92,41±6,778 (AB)	99,94±2,907 (A) 88,20±22,310 (AB)	79,39±4,168 (B) 82,33±13,926 (B)

Augalų lapai, užaugę veikiami 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ srauto 24 valandas, pasižymėjo geriausiomis antioksidacinėmis savybėmis. DPPH radikalų surišimo geba (3.1 pav, A) buvo didžiausia – 117,63 $\mu\text{M TE g}^{-1}$. Įvertinus ANOVA analizės pagal Dankano (angl. *Duncan*) kriterijų rezultatus matome, kad šios grupės vidurkis išsiskiria iš kitų. ABTS radikalų surišimo geba taip pat išsiskiria augalus paveikus 24 valandas 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ apšvietimo srautu (129,68 $\mu\text{M TE g}^{-1}$). Panaši tendencija užfiksuota įvertinus ir geležies redukcijos oksidacinę galią (3.1 pav, C ir D). Tai rodo, kad nuolatinis apšvietimas sąlyginai aukštu apšvietimo srautu iššaukė antioksidacinės apsauginės sistemos atsaką. Yra žinoma, kad augalo atsakas į šviesą yra augalo rūšiai ir amžiui savitas [57], o intensyvios šviesos poveikyje įvairios augalų rūšys kaupia fotoapsaugines medžiagas – karotinoidus, antocianinus, askorbo rūgštį ir kt [5].



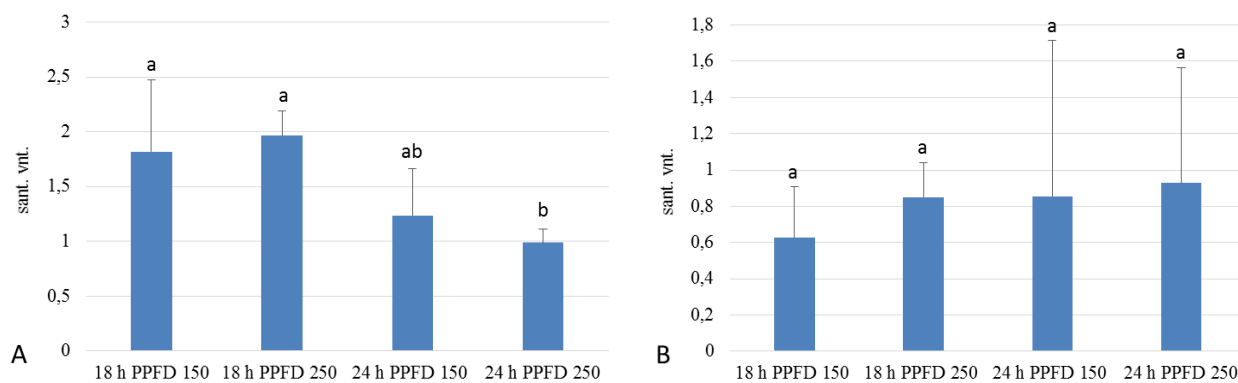
3.1 pav. Fotoperiodo ir srauto įtaka jaunų augalo lapų antioksidacinėms savybėms (A – DPPH radikalų surišimo geba, B – ABTS radikalų surišimo geba, C – Geležies redukcijos antioksidacinė galia (FRAP) pagal geležį, D – Geležies redukcijos antioksidacinė galia (FRAP) galia pagal trolokso konc.)

Brandžiuose augalų lapuose pastebimi skirtingi rezultatai, lyginant su jaunais lapais. Pagal Dankano kriterijų, tiek ABTS radikalų surišimo geba, tiek geležies redukcijos oksidacinė galia skirtingomis apšvietimo sąlygomis neišsiskyrė (3.2 pav, F, G, H). Nežymus skirtumas matyti įvertinus DPPH radikalų surišimo gebą (3.2 pav, E). ANOVA analizė reikšmingų skirtumų neparodė – visi rezultatai priklauso tai pačiai „a“ grupei. Tyrimai, atlikti su špinatais (lot. *Spinacea oleracea* L.), paprastaisiais runkeliais (lot. *Beta vulgaris* L. ssp. *cicla*), ir trispalviais burnočiais (lot. *Amaranthus tricolor* L.) skirtingų fotoperiodų poveikyje rodo, kad šių augalų audinių antioksidacinis aktyvumas buvo didžiausias apšviečiant juos 12 valandų fotoperiodu, o toliau ilgėjant antioksidacinis aktyvumas krito bei mažiausias buvo apšviečiant 24 valandų fotoperiodu [58]. Visgi, augalų atsakas į šviesos trukmę priklauso nuo apšvietimo spektro, o ypač – srauto.



3.2 pav. Fotoperiodo ir srauto įtaka brandžių augalo lapų antioksidacinėms savybėms (A – DPPH radikalų surišimo geba, B – ABTS radikalų surišimo geba, C – Geležies redukcijos antioksidacinė galia (FRAP) pagal geležį, D – Geležies redukcijos antioksidacinė galia (FRAP) galia pagal trolokso konc.)

Atlikus chromatografinę augalų ekstraktų analizę buvo nustatytas santykinis bufadienolido BA–135–Ac kiekis jaunuose ir brandžiuose lapuose. Jaunuose lapuose šio augalinio komponento rasta daugiau – didžiausias kiekis užfiksuotas, esant 18 valandų 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ srautui (3.3 pav, A). Paveikus lapus ilgesniu fotoperiodu ir to paties intensyvumo srautu, kiekis – beveik 2 kartus mažesnis. Dankano kriterijus patvirtino, kad fotoperiodas turi įtakos bufadienolido kiekiui ir kuo jis ilgesnis, tuo augalinio komponento lapuose sukaupiama mažiau. Brandžiuose lapuose, visuose apšvietimo variantuose esminių skirtumų nenustatyta (3.3 pav, B).

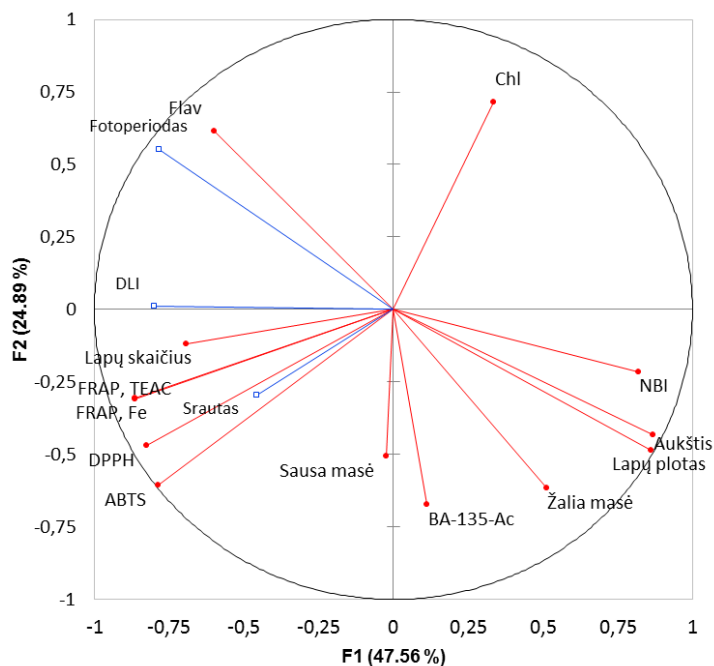


3.3 pav. Fotoperiodo ir srauto įtaka jaunų (A) ir brandžių (B) augalo lapų bufadienolido BA–135–Ac kiekiui

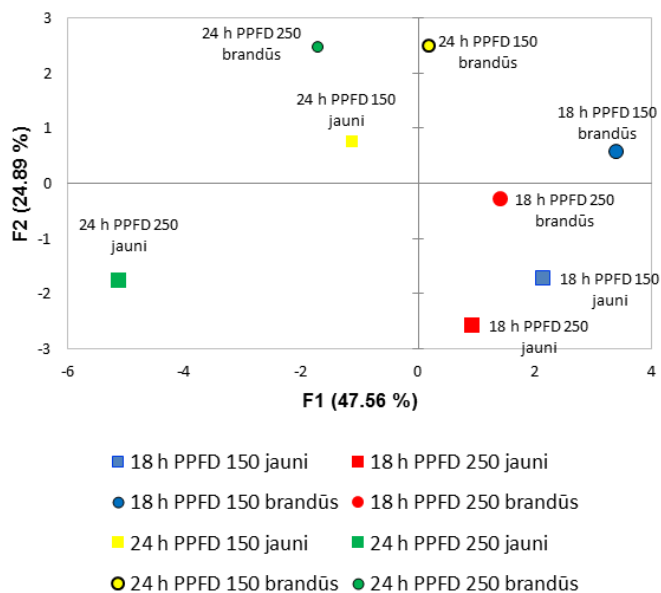
Gavus visus jaunų ir brandžių lapų rezultatus, atlikta principinių komponentų analizė, kurios dėka nustatomos tirtų faktorių tarpusavio koreliacijos (3.4 pav). Paveiksle pavaizduotos parametrų vertės koreliuoja tarpusavyje, jei kampas tarp jų yra mažiau nei 90° arba lygus 180° . Iš rezultatų galima teigti, kad flavonolių indeksas tiesiogiai koreliuoja su fotoperiodu, bet ne su srautu, todėl fenolinių junginių kiekį lapuose galima padidinti ilginant apšvietimo trukmę. Apšvietimo srauto sąsają su antioksidacine augalo sistema rodo srauto koreliacija su matuotais antioksidacinės galios rodikliais. BA–135–Ac kiekis plunksninėse kalankėse nekoreliuoja su antioksidacinės sistemos rodikliais srauto ir fotoperiodo poveikyje, todėl jo metabolizmas augale tiesiogiai nuo antioksidacinės sistemos nepriklauso.

Principinių komponentų sklaidos diagramoje (3.5 pav) įvertinami apšvietimo srauto ir trukmės skirtumai plunksninės kalankės jauniems ir brandiems lapams. Palyginus kiekvieno apšvietimo varianto poveikį jauniems ir brandiems lapams nustatyta, kad patikimai nesiskiria tik 18 valandų $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ srautu veikti plunksninės kalankės lapai. Kitų apšvietimo variantų poveikyje jaunų ir brandžių lapų augimo ir metabolizmo parametrų atsakas patikimai skyrėsi tarp jaunų ir brandžių lapų. Vertinant apšvietimo trukmės efektus, nustatyta, kad 24 ir 18 val fotoperiodo poveikis skyrėsi brandiems augalų lapams apšvietimo srautui esant $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, o esant $150 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ srautui efektas nesiskyrė.

Norint paskatinti augalo antioksidacinės sistemos atsaką yra verta didinti apšvietimo srautą, kuris taip pat silpnai koreliuoja su augalų sukauptą mase. Remiantis ANOVA analize, 24 valandų fotoperiodas lemia geresnes antioksidacines savybes jaunuose lapuose lyginant su 18 val, tačiau atkreipiamas dėmesys, kad brandiems lapams, kurie sudaro didžiąją dalį augalo, fotoperiodo pokytis neturėjo reikšmingos įtakos.



3.4 pav. Principinių komponentių koreliacijų ratas



3.5 pav. Principinių komponentių sklaidos diagrama

3.2 Pagrindinių apšvietimo spektro komponentių efektų įvertinimas

Mėlynos šviesos įvedimas neturėjo žymios įtakos augalų biometriniais rodikliais. Plunksninės kalankės, augusios tik po raudonu (660 nm) $250\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ srauto apšvietimu pasižymėjo šiek tiek didesne žalia ir sausa mase, lapų skaičiumi ir aukščiu. Raudonas (90 %) ir mėlynas (10 %) apšvietimas padidino augalų lapų plotą, lyginant su augusiais tik po raudona šviesa ($416,50\text{ cm}^2$ ir $398,74\text{ cm}^2$).

Mėlynos šviesos poveikis augalų rūšims yra skirtingas. Nors plunksninės kalankės biometrinių duomenų mėlyna šviesa nepagerino, ji gali būti naudinga, auginant daržovių daigus, nes skatina šaknų formavimąsi [42]. Tyrimų rezultatuose su japoniniu pipirkrienu (lot. *Wasabia japonica*) nustatyta panaši tendencija, lyginant su plunksnine kalanke – padidėjęs lapų plotas, veikiant augalus raudonos ir mėlynos šviesos deriniu bei didesnė sausa masė augalų, užaugusių po raudonu apšvietimu [59].

Kituose tyrimuose su plunksninėmis kalankėmis buvo įvertintas mėlyno šviesos poveikis, kurių metu taip pat nebuvo nustatyta reikšmingos mėlynos šviesos įtakos augalų biomasei, tačiau pastebėti augalo morfologiniai pokyčiai: storesni ir didesni lapai bei epidermio sluoksnis, trumpesni tarpbambliai [60].

3.3 lentelė. Raudonos ir mėlynos šviesos įtaka plunksninei kalankei

	Žalia masė, g	Sausa masė, g	Lapų skaičius, vnt	Lapų plotas, cm ²	Aukštis, cm
R	68,48±3,127 (A)	3,82±0,468 (A)	8,60±0,721 (A)	398,74±8,742 (A)	13,33±1,607 (A)
R+M	62,10±5,459 (A)	3,54±0,436 (A)	8,47±0,115 (A)	416,50±32,295 (A)	11,67±1,528 (A)

Raudonas ir mėlynas apšvietimas padidino augalų chlorofilų kiekį tiek jaunuose, tiek brandžiuose lapuose (3.4 lentelė). Chlorofilo indeksas jaunuose lapuose – apie 17 procentų, o brandžiuose – apie 14 procentų didesnis nei lapų augusių tik po raudonu apšvietimu. Flavonolių indekso padidėjimas yra nežymus – nuo 0,44 iki 0,47 s. v. jaunuose ir nuo 0,47 iki 0,50 s. v. brandžiuose lapuose. Mėlynos šviesos įvedimas turėjo teigiamos įtakos ir azoto balanso indeksui, kuris padidėjo nuo 89,94 iki 97,51 s. v. jaunuose ir nuo 68,88 iki 73,71 s. v. brandžiuose lapuose.

Yra žinoma, jog pigmentas chlorofilas turi išsiskiriantį šviesos absorbcijos piką ne tik ties 660 nm bangos ilgiu (raudona šviesa), bet ir ties 450 nm (mėlyna šviesa). Dėl šios priežasties, tiriami įvairių augalų rūšių chlorofilo kiekio pokyčiai, į apšvietimo spektrą įtraukus mėlyną šviesą. Rezultatai, panašūs į gautuosius, nustatyti, ištyrus plokščiosios vingrūnės (lot. *Spirulina platensis*) [62], lipniosios remanijos (lot. *Rehmannia glutinosa*) [63] ir cimbidžio (lot. *Cymbidium*) [3] genties augalus.

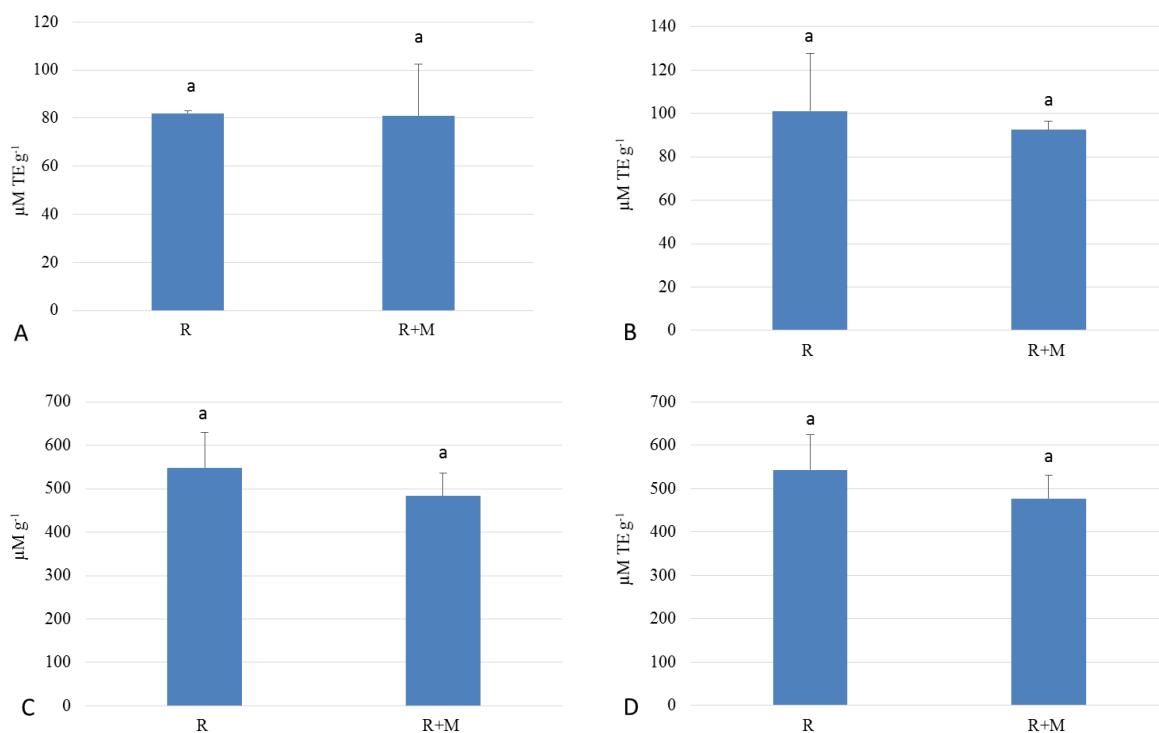
3.4 lentelė. Lapų chlorofilų indeksai

	Chlorofilo indeksas, s. v.	Flavonolių indeksas, s. v.	Azoto balanso indeksas, s. v.
R	38,75±1,912 (B)	0,44±0,032 (A)	89,94±11,543 (A)
	31,06±1,806 (A)	0,47±0,010 (A)	68,88±8,263 (A)
R+M	45,37±0,572 (A)	0,47±0,019 (A)	97,51±2,456 (A)
	35,48±3,937 (A)	0,50±0,043 (A)	73,71±15,764 (A)

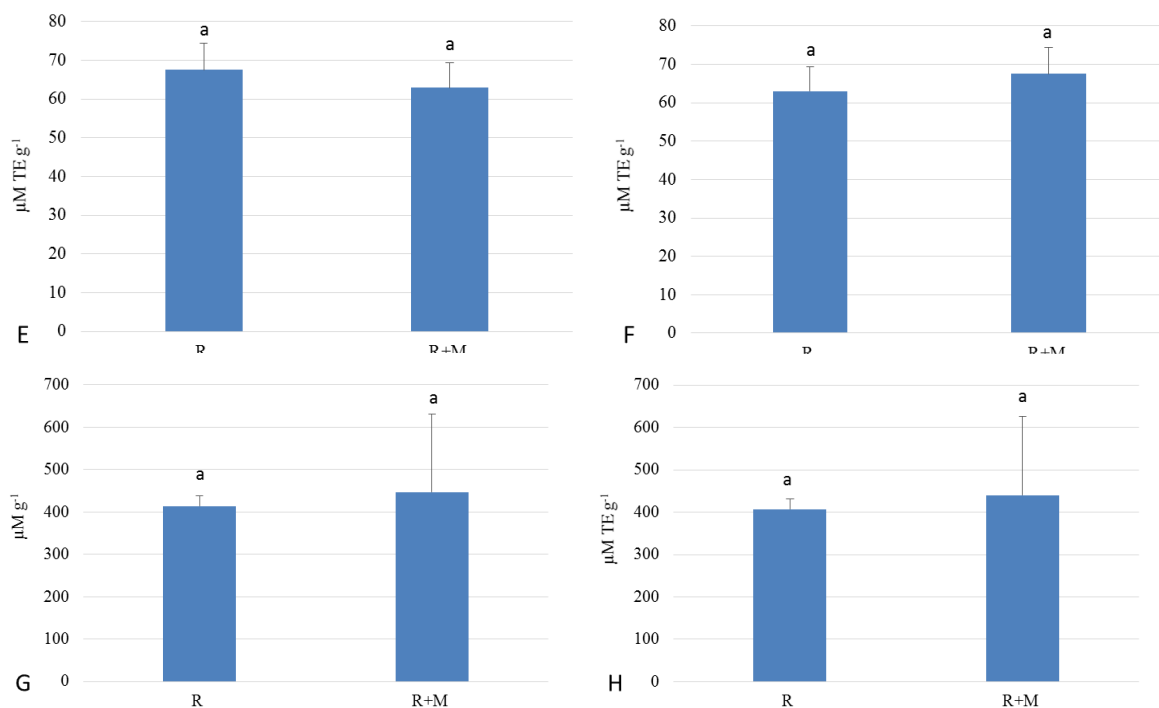
Raudonos ir mėlynos šviesos derinys nepagerino jaunų augalų lapų antioksidacinių savybių (3.6 pav). Tiek DPPH (3.6 pav., A), tiek ABTS (3.6 pav., B), tiek geležies redukcijos antioksidacinė galia nepasikeitė, lyginant su augalais, apšviestais tik raudona šviesa.

Brandžiuose augalų lapuose tendencija išlieka panaši. Vienintelė ABTS radikalų surišimo geba padidėjo augalus paveikus raudona ir mėlyna šviesa (3.7 pav., F). Kituose tyrimuose mėlynos šviesos įvedimas neišsiskyrė.

Kiti literatūroje aprašyti tyrimai parodė, kad mėlynos šviesos poveikyje plunksninės kalankės augaluose padidėja DPPH laisvųjų radikalų imobilizavimo geba ir fenolinių junginių kiekis audiniuose [64]. Visgi, mėlynos šviesos poveikis taip pat priklauso nuo jos tikslaus bangos ilgio, kiekio apšvietimo spektre bei bendro jos srauto, tuo galima paaiškinti nevienodus tyrimų rezultatus [4].

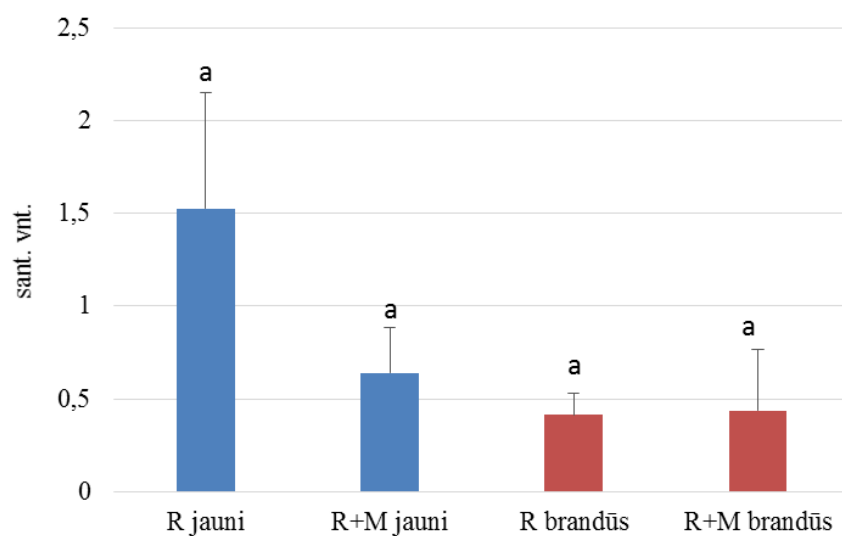


3.6 pav. Raudonos ir mėlynos šviesos įtaka jaunų augalo lapų antioksidacinėms savybėms (A – DPPH radikalų surišimo geba, B – ABTS radikalų surišimo geba, C–Geležies redukcijos antioksidacinė galia (FRAP) pagal geležį, D – Geležies redukcijos antioksidacinė galia (FRAP) galia pagal trolokso konc.)



3.7 pav. Raudonos ir mėlynos šviesos įtaka brandžių augalo lapų antioksidacinėms savybėms (A – DPPH radikalų surišimo geba, B – ABTS radikalų surišimo geba, C – Geležies redukcijos antioksidacinė galia (FRAP) pagal geležį, D – Geležies redukcijos antioksidacinė galia (FRAP) galia pagal trokso konc.)

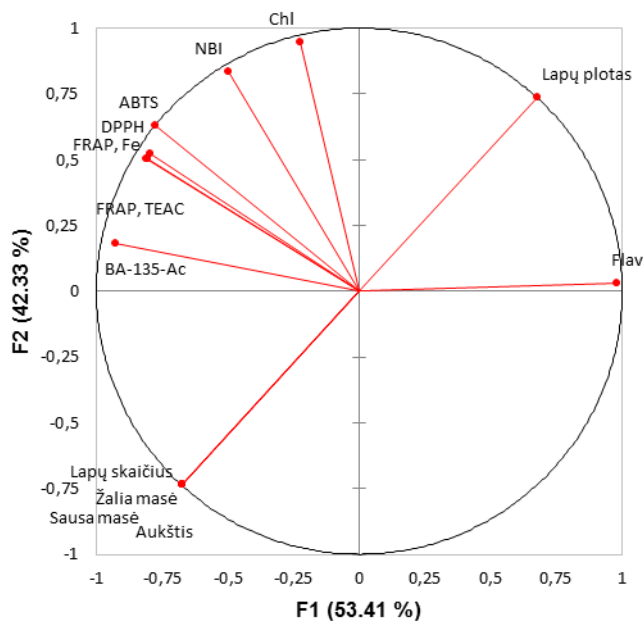
Didžiausias fitocheminio komponento kiekis nustatytas jaunuose plunksninės kalankės lapuose, augusiuose tik po raudonu apšvietimu (3.8 pav). Raudonos ir mėlynos šviesos paveiktuose jaunuose lapuose bufadienolido kiekis beveik 2,3 karto mažesnis, tačiau remiantis ANOVA analize pagal Dankano kriterijų, abu rezultatai priklauso tai pačiai grupei (a). Tai reiškia, kad statistiškai patikimų skirtumų nebuvo nustatyta, kadangi pavienių augalų reakcija į tirtą šviesą yra nevieninga. Brandžiuose lapuose kiekis – panašus.



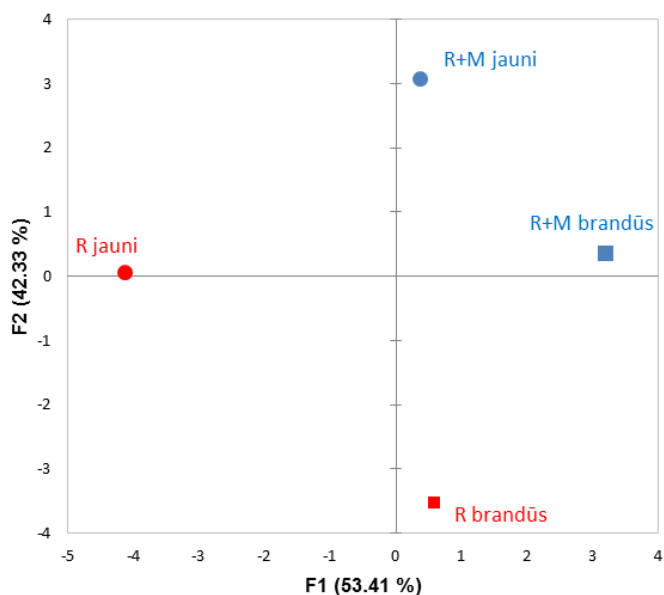
3.8 pav. Pagrindinių srauto komponentų įtaka bufadienolido BA-135-Ac kiekiui

Principinių komponentų koreliacijų ratas parodė, kad raudonos ir mėlynos šviesos poveikyje augalo antioksidacinės savybės tiesiogiai koreliuoja su bufadienolido kiekiu, chlorofilo ir azoto balanso indeksu (3.9 pav). Šiuo atveju stiprėjant augalo antioksidacinei sistemai, didėja ir fitokomponento kiekis. Lapų plotas neigiamai koreliuoja su augalo žalia ir sausa mase, todėl didėjant masei, lapų plotas mažėja. Tai galima paaiškinti, kad lapai linkę storėti ir mažėti.

Principinių komponentų sklaidos diagrama patvirtino, kad mėlynos šviesos poveikyje reikšminių skirtumų tarp jaunų ir brandžių lapų neužfiksuota, tačiau raudonai apšviesti jauni ir brandūs lapai išsiskiria (3.10 pav).



3.9 pav. Principinių komponentų koreliacijų ratas



3.10 pav. Principinių komponentų sklaidos diagrama

3.3 Papildomų apšvietimo spektro komponentių efekto įvertinimas

Tyrimo metu įvertinti augalų biometriniai skirtumai raudoną ir mėlyną (R+M) apšvietimą papildžius papildomomis komponentėmis – žalia ir tolimąja raudona. Visi parametrai buvo didžiausi augalų, augusių po R+M šviesa, o papildoma žalia ir tolimoji raudona nepadidino biometrinių reikšmių. Didžiausia žalioji masė – 54,54 g (R+M), sausa masė – 2,79 g (R+M), lapų skaičius 7,67 vnt (R+M ir R+M+Ž), lapų plotas – 367,47 cm², aukštis – 11,40 cm (R+M).

Tolimosios raudonos šviesos įtaka plunksninės kalankės biometriniais rodikliams skiriasi nuo poveikio lapinėms daržovėms. Tiriant salotas, R+M+TR derinys padidino žaliąją masę ir lapų plotą, kai plunksninės kalankės tyrimų rezultatuose tokių tendencijų nenustatyta [64].

3.5 lentelė. Papildomų apšvietimo spektro komponentių įtaka

	Žalia masė, g	Sausa masė, g	Lapų skaičius, vnt	Lapų plotas, cm ²	Aukštis, cm
R+M	54,54±4,607 (A)	2,79±0,244 (A)	7,67±1,155 (A)	367,47±43,974 (A)	11,40±0,954 (A)
R+M+Ž	49,87±12,363 (A)	2,30±0,284 (A)	7,67±0,577 (A)	327,36±78,428 (A)	8,63±1,097 (B)
R+M+TR	50,85±6,985 (A)	2,42±0,510 (A)	7,33±1,155 (A)	325,92±27,236 (A)	11,17±0,764 (A)

Žalia ir tolimoji raudona turėjo dvejopą poveikį augalų lapams. Jaunuose lapuose didžiausias chlorofilo (45,80 s. v.), flavonolių (0,48 s. v.) ir azoto balanso indeksas (98,11 s. v.) nustatytas, esant R+M apšvietimui. Brandžiuose lapuose nustatytas chlorofilo kiekio padidėjimas įvedus į spektrą žalią ir tolimąją raudoną šviesą, atitinkamai 39,94 ir 45,89 s. v. Įvertinus flavonolių ir azoto balanso indeksą, didėjimas nenustatytas.

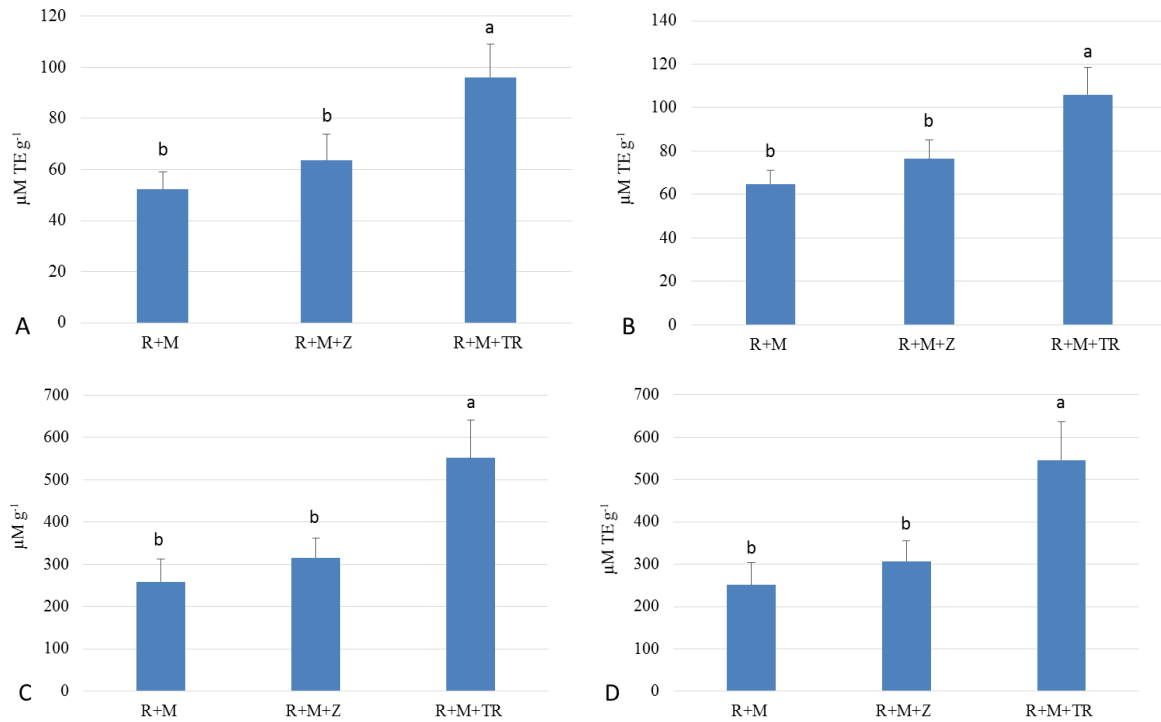
3.6 lentelė. Lapų chlorofilų indeksai

	Chlorofilo indeksas, s. v.	Flavonolių indeksas, s. v.	Azoto balanso indeksas, s. v.
R+M	45,80±2,033 (A)	0,48±0,042 (A)	98,11±10,460 (A)
	37,75±1,282 (A)	0,54±0,042 (A)	70,60±5,504 (B)
R+M+Ž	40,85±2,002 (B)	0,45±0,065 (A)	91,98±9,054 (A)
	39,94±2,210 (A)	0,47±0,017 (B)	87,88±7,445 (A)
R+M+TR	38,69±1,070 (B)	0,45±0,016 (A)	86,11±2,571 (A)
	45,89±4,271 (B)	0,53±0,024 (AB)	60,81±8,709 (B)

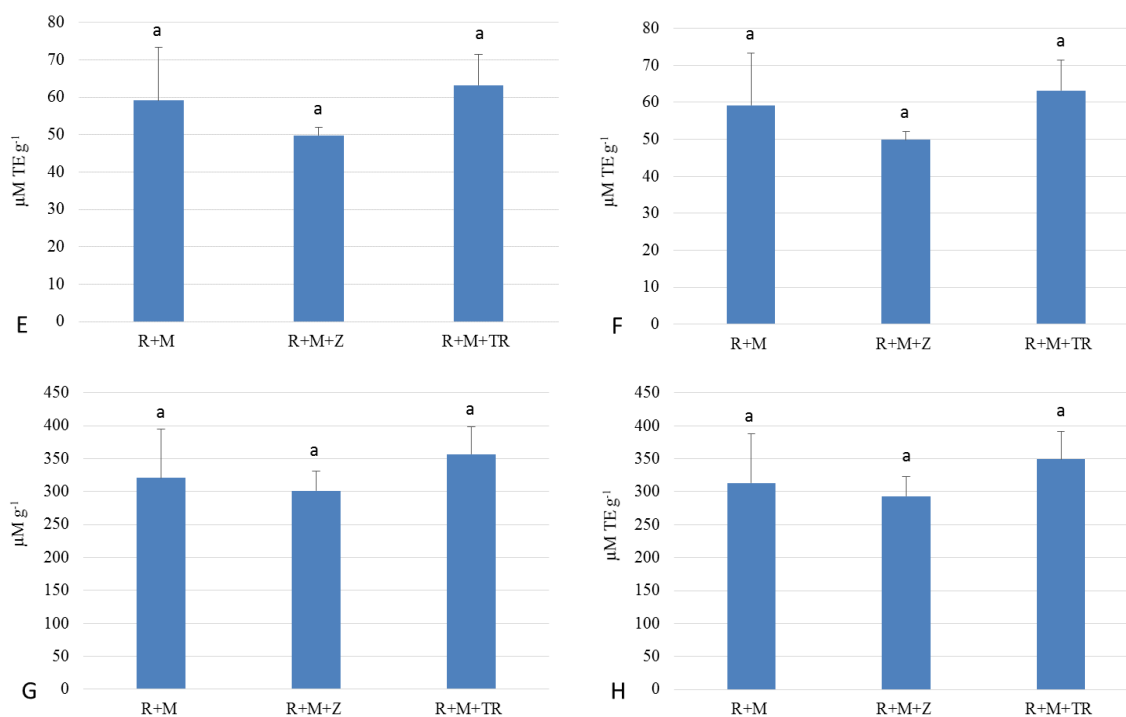
Biocheminės analizės atskleidė tolimosios raudonos šviesos įtaką jaunų augalų lapų antioksidacinėms savybėms (3.11 pav). DPPH ir ABTS radikalų surišimo geba jaunuose lapuose, esant R+M+TR apšvietimui, buvo apie 2 kartus didesnė lyginant su R+M. Geležies redukcijos antioksidacinė geba išaugo šiek tiek daugiau nei 2 kartus: nuo 259,06 iki 551,06 μM g⁻¹ (Fe) ir nuo 250,96 iki 545,51 (TEAG). Žalia šviesa taip pat turėjo teigiamos įtakos augalo antioksidacinėms savybėms, tačiau, priešingai nei R+M+TR, ANOVA analizė pagal Dankano kriterijų neparodė statistiškai patikimų skirtumų. Aiškus skirtumas išreikštas R+M+TR varianto poveikyje.

Brandžiuose lapuose matoma panaši tendencija (3.12 pav). Visos antioksidacinės gebos pagerėjo R+M+TR poveikyje, tačiau pagal ANOVA analizę, skirtumai nėra patikimi. R+M+Ž variante antioksidacinės gebos nežymiai mažesnės, lyginant su R+M ir R+M+TR.

Ši tendencija pastebima ir tyrimuose su kitomis augalų rūšimis: tolimoji raudona šviesa padidino salotų [65] [66], *Crepidiastrum denticulatum* [67] daigintų rapsų [68], sojų antioksidacinį aktyvumą ir fenolinių junginių kiekį. Apskritai, apžvelgdami ir vertindami įvairiapusių tolimosios raudonos šviesos efektus augalams, galima teigti, kad reguliuojant tolimosios raudonos kiekį pagal augalo rūšį, galima reikšmingai padidinti daržininkystės produkcijos ekonominę vertę [69].

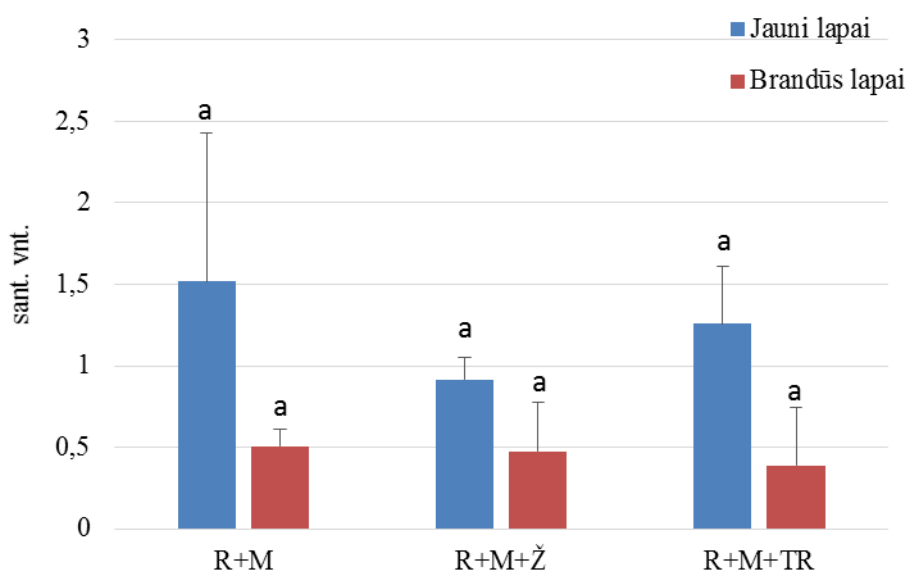


3.11 pav. Papildomų spektro komponenčių įtaka jaunų augalo lapų antioksidacinėms savybėms (A – DPPH radikalų surišimo geba, B – ABTS radikalų surišimo geba, C – Geležies redukcijos antioksidacinė galia (FRAP) pagal geležį, D – Geležies redukcijos antioksidacinė galia (FRAP) galia pagal trokso konc.)



3.12 pav. Papildomų spektro komponentių įtaka brandžių augalo lapų antioksidacinėms savybėms (A – DPPH radikalų surišimo geba, B – ABTS radikalų surišimo geba, C – Geležies redukcijos antioksidacinė galia (FRAP) pagal geležį, D – Geležies redukcijos antioksidacinė galia (FRAP) galia pagal trolokso konc.)

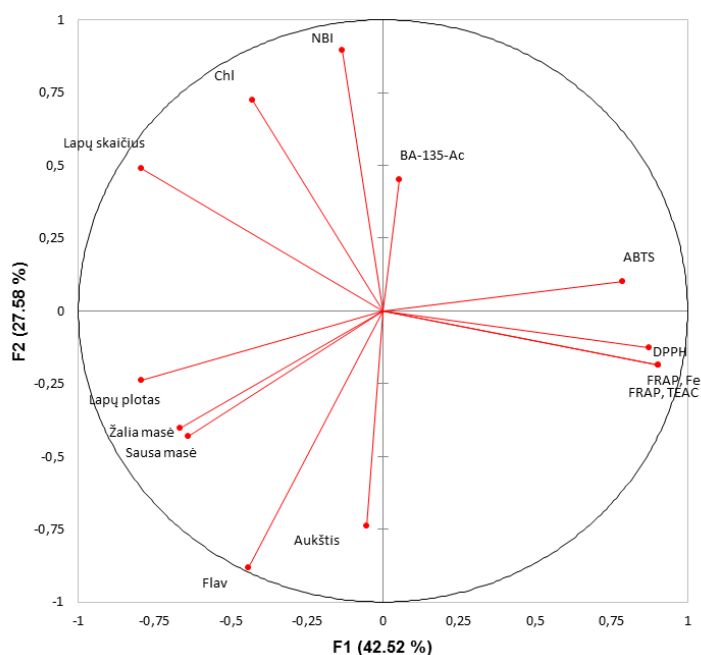
Didžiausias BA–135–Ac kiekis nustatytas augalų lapuose R+M poveikyje (3.13 pav). Tiek R+M+Ž, tiek R+M+TR poveikyje jauni ir brandūs augalų lapai sukauptė mažiau šio augalinio komponento. Gauta R+M varianto reikšmė yra panaši į pagrindinių apšvietimo komponentių tyrimų rezultatus (3.2), todėl galima teigti, kad augalai sukaupti panašų kiekį fitocheminio komponento, veikiami tik raudonu apšvietimu.



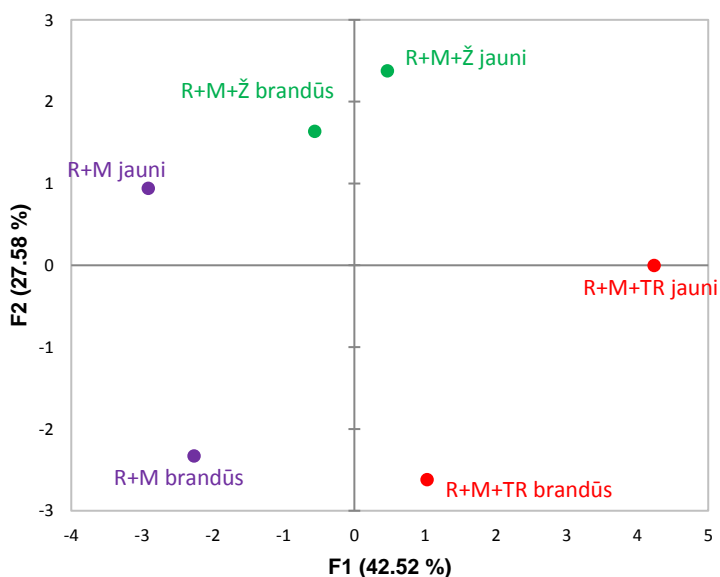
3.13 pav. Papildomų srauto komponentių įtaka bufadienolido BA–135–Ac kiekiui

Principinių komponentų koreliacijų ratas rodo, silpną koreliaciją tarp chlorofilo ir azoto balanso indekso bei BA–135–Ac kiekio (3.14 pav). Papildomų apšvietimo komponentų poveikyje augalo antioksidacinė sistema neturi koreliacijų, todėl negalime nustatyti ryšio su kitais galimais komponentais.

Principinių komponentų sklaidos diagramoje pastebime, kad visų apšvietimų variantų poveikis turi reikšminių skirtumų, lyginant jaunus ir brandžius lapus (3.15 pav).



3.14 pav. Principinių komponentų koreliacijų ratas



3.15 pav. Principinių komponentų sklaidos diagrama

3.4 Baltos šviesos derinių efektai

Platus baltos šviesos spektras, papildytas tolimąja raudona padidina augalų biometrinius duomenis (3.7 lentelė). Žalia masė buvo didžiausia – 61,20 g, kai tik balta šviesa apšviestų augalų – 53,47 g. Sausa masė taip pat atitinkamai didesnė – 2,65 g. Augalai pasižymėjo ir šiek tiek didesniu lapų skaičiumi bei lapų plotu. UV šviesos pridėjimas sumažino visus rodiklius, lyginant su kitais apšvietimo variantais.

3.7 lentelė. Baltos šviesos derinių įtaka

	Žalia masė, g	Sausa masė, g	Lapų skaičius, vnt	Lapų plotas, cm ²	Aukštis, cm
B	53,47±1,234 (AB)	2,45±0,192 (A)	6,73±0,306 (A)	349,45±9,187 (A)	12,17±0,289 (A)
B+TR	61,20±8,099 (A)	2,65±0,622 (A)	7,73±1,332 (A)	387,66±66,331 (A)	11,37±0,513 (A)
B+UV	41,29±12,971 (B)	1,83±0,861 (A)	6,60±0,400 (A)	274,89±70,378 (A)	10,50±2,179 (A)

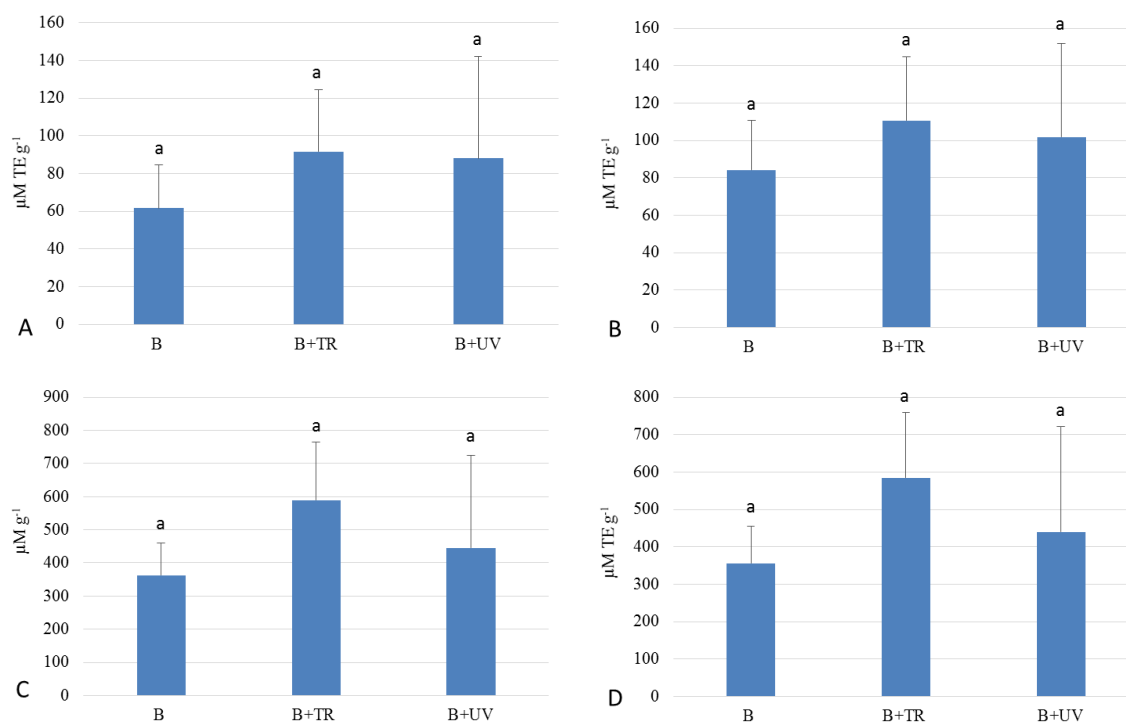
Skirtingai nei biometriniuose matavimuose, UV šviesa turėjo teigiamos įtakos bendrajai augalo gerovei. Jaunuose lapuose chlorofilo ir azoto balanso indeksas buvo didžiausias (45,89 ir 116,88 s. v.). Flavonolių indeksas visuose variantuose – panašus. Brandžiuose augalo lapuose išskirtinumą nenustatyta (3.8 lentelė). Fenolinių junginių kiekį UV šviesa padidino ir salotose (lot. *Lactuca sativa* L.) [64].

Kituose tyrimuose nustatyta, kad UV-B šviesos efektai reikšmingai keičia fenolinių junginių kiekį ir profilį [70]. Mūsų tyrimuose naudota mažesnė dozė ir UV-A spinduliuotė, tačiau taip pat stebimas augalo atsakas.

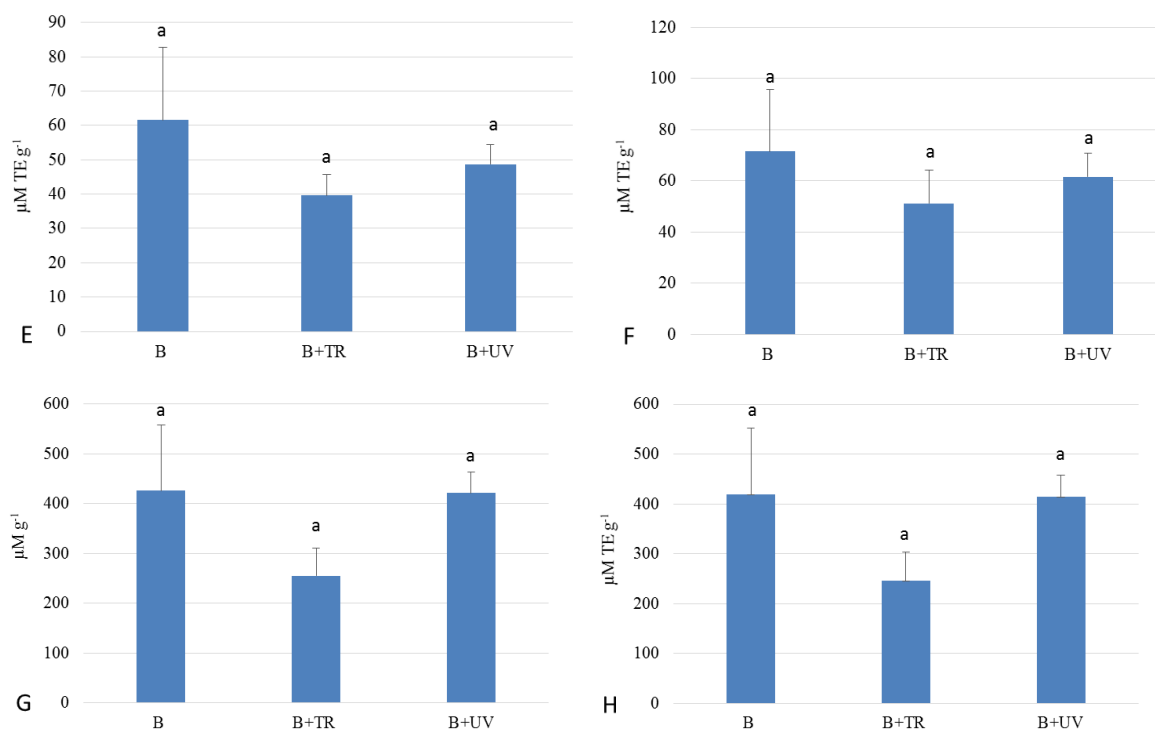
3.8 lentelė. Lapų chlorofilų indeksai

	Chlorofilo indeksas, s. v.	Flavonolių indeksas, s. v.	Azoto balanso indeksas, s. v.
B	42,52±1,124 (AB)	0,39±0,063 (A)	112,67±19,438 (A)
	42,22±2,066 (A)	0,50±0,055 (A)	85,83±12,614 (A)
B+TR	37,52±1,893 (B)	0,37±0,006 (A)	102,32±5,773 (A)
	37,68±3,569 (A)	0,46±0,012 (A)	83,23±6,793 (A)
B+UV	45,89±4,271 (A)	0,40±0,056 (A)	116,88±8,258 (A)
	40,54±5,291 (A)	0,48±0,014 (A)	85,88±8,960 (A)

Papildoma tolimoji raudona šviesa, kaip ir raudonų ir mėlynų LED spektro atveju, pagerino augalo antioksidacinės sistemos savybes (3.16 pav). Jauni augalų lapai, augę tik po baltu apšvietimu, pasižymėjo mažiausiu antioksidaciniu aktyvumu, surišant tiek DPPH, tiek ABTS radikalus. FRAP analizės rezultatuose užfiksuota tokia pati tendencija. UV šviesa taip pat turėjo teigiamos įtakos, tačiau visose analizėse rezultatai išliko panašūs į kontrolinio varianto (vien baltų LED apšvietimo). Pagal ANOVA analizę, statistiškai patikimų skirtumų nenustatyta, kadangi visi rezultatai priklauso tai pačiai „a“ grupei. Brandžiuose lapuose, tiek UV, tiek tolimosios raudonos šviesos pridėjimas neturėjo įtakos augalo antioksidacinėms savybėms (3.17 pav).

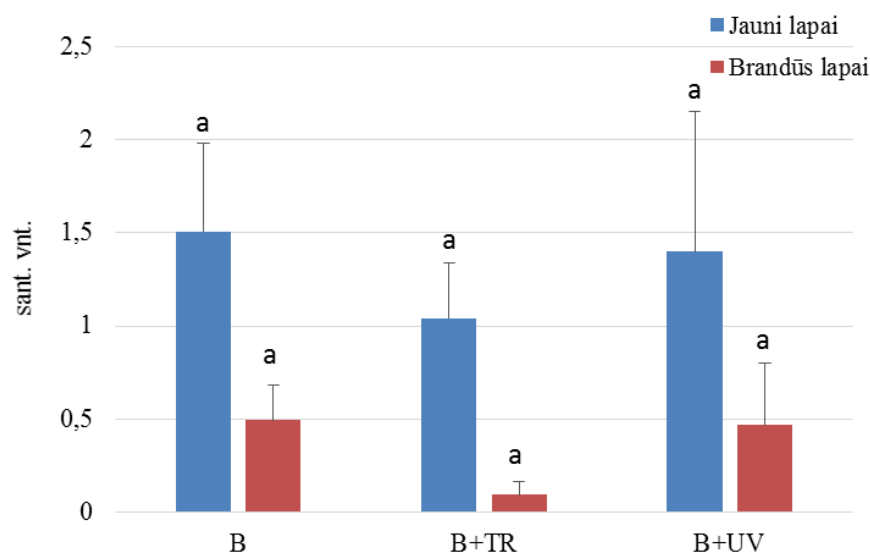


3.16 pav. Baltos šviesos įtaka jaunų augalo lapų antioksidacinėms savybėms (A – DPPH radikalų surišimo geba, B – ABTS radikalų surišimo geba, C – Geležies redukcijos antioksidacinė galia (FRAP) pagal geležį, D – Geležies redukcijos antioksidacinė galia (FRAP) galia pagal trolokso konc.)



3.17 pav. Baltos šviesos įtaka brandžių augalo lapų antioksidacinėms savybėms (A – DPPH radikalų surišimo geba, B – ABTS radikalų surišimo geba, C – Geležies redukcijos antioksidacinė galia (FRAP) pagal geležį, D – Geležies redukcijos antioksidacinė galia (FRAP) galia pagal trolokso konc.)

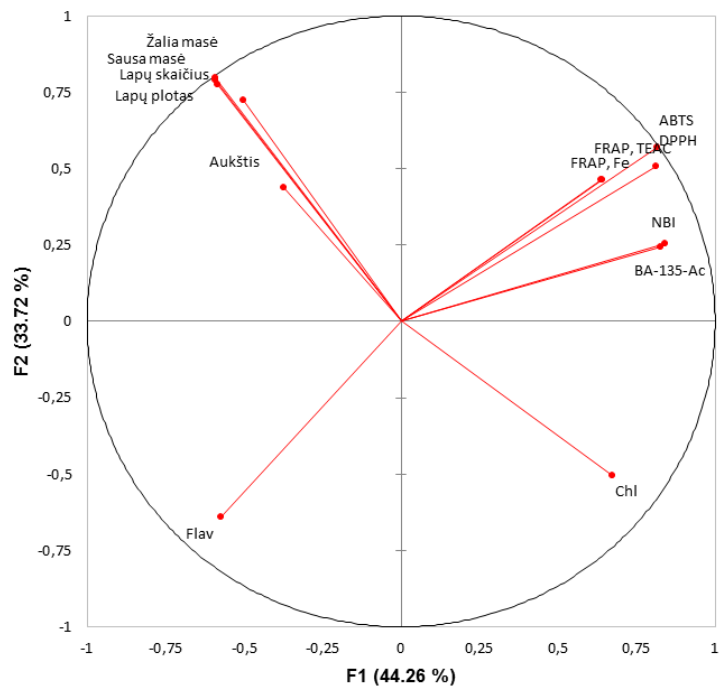
Daugiausiai bufadienolido sukauptė po baltu apšvietimu augę augalai. Tolimosios raudonos ir UV šviesos pridėjimas sumažino fitokomponento kiekį (3.18 pav).



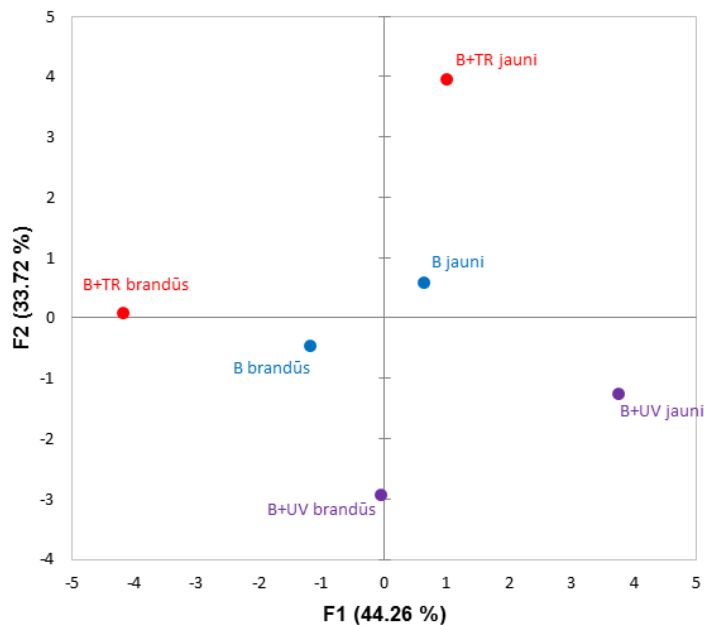
3.18 pav. Baltos šviesos derinių įtaka bufadienolido BA–135–Ac kiekiui

Atsižvelgus į komponentų koreliacijas nustatyta, kad augalo antioksidacinės savybės koreliuoja su bufadienolido kiekiu (3.19 pav). Taip pat nustatyta tiesioginė koreliacija ir su azoto balanso indeksu. Tai gali rodyti, kad bufadienolidas yra augalo gerovės indikatorius, kadangi didėjantis azoto balanso indeksas užtikrina geresnes sąlygas augimui. Iš rezultatų galima teigti, kad sugebėjus padidinti sukaupto BA–135–Ac kiekį, augalo antioksidacinė sistema taip pat linkusi stiprėti.

Komponentų sklaidos diagramoje, taškai išsidėstė veidrodiniu principu. Visų apšvietimų variantų poveikis jauniems ir brandiems lapas skyrėsi (3.20 pav).



3.19 pav. Principinių komponentių koreliacijų ratas



3.20 pav. Principinių komponentių sklaidos diagrama

3.5 Apšvietimo parametrų taikymo ekonominiai aspektai

3.5.1 Fotoperiodo ir srauto taikymo ekonominiai aspektai

Įvertinus fotoperiodo ir srauto intensyvumo tyrimo rezultatus, apskaičiuoti elektros energijos suvartojimo skirtumai. Jie palyginti ir nustatytos optimaliausių apšvietimo sąlygų ekonominės sąnaudos teoriniame 100 m² augalų fabrike, naudojant 67 šviestuvus (3.9 lentelė).

3.9 lentelė. Elektros energijos sąnaudos skirtingo fotoperiodo ir srauto apšvietimui

Fotoperiodas, val	Srautas, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Reikalingas energijos kiekis, kW	Elektros energijos kaštai 40 dienų, Eur
18	150	$67 \times 0,18 \text{ kW}$ $= 12,06 \text{ kW}$	$12,06 \text{ kW} \times 18 \text{ val} \times 0,130 \frac{\text{Eur}}{\text{kWh}} \times 40 = 1128,82$
18	250	$67 \times 0,23 \text{ kW}$ $= 15,41 \text{ kW}$	$15,41 \text{ kW} \times 18 \text{ val} \times 0,130 \frac{\text{Eur}}{\text{kWh}} \times 40 = 1442,38$
24	150	$67 \times 0,18 \text{ kW}$ $= 12,06 \text{ kW}$	$12,06 \text{ kW} \times 24 \text{ val} \times 0,130 \frac{\text{Eur}}{\text{kWh}} \times 40 = 1505,09$
24	250	$67 \times 0,23 \text{ kW}$ $= 15,41 \text{ kW}$	$15,41 \text{ kW} \times 24 \text{ val} \times 0,130 \frac{\text{Eur}}{\text{kWh}} \times 40 = 1923,17$

Geriausi kalankių biometriniai matmenys nustatyti 18 valandas $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ srautu apšviestuose augaluose, tačiau $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ srauto rezultatai – panašūs. Atsižvelgus į antioksidacinių savybių tyrimus jaunuose lapuose, svarstyta didinti apšvietimo periodą, kadangi jų antioksidacinės savybės ilgėjant fotoperiodui gerėja. Visgi, jauni lapai sudaro tik nedidelę augalo biomasės dalį, o brandžiuose lapuose privalaus 24 valandų fotoperiodo poveikio patvirtinti negalime. Taip pat, palyginus 18 ir 24 valandų apšvietimo sąnaudas elektros energijai, esant $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, jos skiriasi apie 1,3 karto. Atsižvelgus į sukaupto bufadienolido kiekį, 18 valandų fotoperiodas taip pat yra naudingiausias. Brandžiuose lapuose, esant $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ srautui jo sukaupta apie 1,5 karto daugiau nei $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ sraute, kai sąnaudos didesnės apie 1,3 karto. Todėl augimui bei BA–135–Ac kaupimui optimalios ir ekonomiškai naudingiausios apšvietimo sąlygos – 18 valandų fotoperiodas ir $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ srautas.

3.5.2 Apšvietimo spektro taikymo ekonominiai aspektai

Vertinant apšvietimo spektro ekonominius aspektus svarbu atsižvelgti, kad elektros energija skirtingų spalvų LED yra nevienodai efektyviai verčiama į fotosintetiškai aktyvią šviesą. Be to, augalai nevienodai įsisavina skirtingų bangų ilgių šviesą ir panaudoja ją fotosintezės procesui. Šiems dėsningumams įvertinti, atsižvelgiant į skirtingų bangų LED fotonų efektyvumą apskaičiuotas sąlyginis elektros energijos kiekis, reikalingas $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PPF srautui sukurti. Taip pat apskaičiuotas našusis fotosintezės fotonų srauto tankis YPF, šviesos spektro komponentės PPF padauginus iš santykinės kvantų efektyvumo vertės [41] [71] (3.10 lentelė).

3.10 lentelė. Našusis fotosintetiškai aktyvios spinduliuotės srauto tankis ir fotonų efektyvumas skirtingam LED apšvietimo spektrui

Apšvietimo spektras	Kiekis spektre, %	PPFD, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Fotonų efektyvumas, $\mu\text{mol W}^{-1}$	YFPD, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Energija, reikalinga šviesos srautui sukurti, W
PAGRINDINĖS KOMPONENTĖS					
R ($\lambda=660$ nm)	100	250	1,72	$250 \times 0,93 = 232,5$	$250 \div 1,72 = 145,3$
Bendras:				232,5	145,3
R ($\lambda=660$ nm)	90	225	1,72	$225 \times 0,93 = 209,25$	$225 \div 1,72 = 130,8$
M ($\lambda=447$ nm)	10	25	1,87	$25 \times 0,75 = 18,75$	$25 \div 1,87 = 13,4$
Bendras:				228	144,2
PAPILDOMOS KOMPONENTĖS					
R ($\lambda=660$ nm)	80	200	1,72	$200 \times 0,93 = 186$	$200 \div 1,72 = 116,3$
M ($\lambda=447$ nm)	20	50	1,87	$50 \times 0,75 = 37,5$	$50 \div 1,87 = 26,7$
Bendras:				223,5	143
R ($\lambda=660$ nm)	60	150	1,72	$150 \times 0,93 = 139,5$	$150 \div 1,72 = 87,2$
M ($\lambda=447$ nm)	20	50	1,87	$50 \times 0,75 = 37,5$	$50 \div 1,87 = 26,7$
Ž ($\lambda=523$ nm)	20	50	0,5	$50 \times 0,74 = 37$	$50 \div 0,5 = 100$
Bendras:				214	213,9
R ($\lambda=660$ nm)	60	150	1,72	$150 \times 0,93 = 139,5$	$150 \div 1,72 = 87,2$
M ($\lambda=447$ nm)	20	50	1,87	$50 \times 0,75 = 37,5$	$50 \div 1,87 = 26,7$
TR ($\lambda=740$ nm)	20	50	0,8	$50 \times 0,09 = 4,5$	$50 \div 0,8 = 62,5$
Bendras:				181,5	176,4
BALTOS ŠVIESOS DERINIAI					
B 5700 K	100	250	1,52	$250 \times 0,88 = 220$	$250 \div 1,52 = 164$
Bendras:				220	164,5
B 5700 K	99	247,5	1,52	$247,5 \times 0,88 = 217,8$	$247,5 \div 1,52 = 162,8$
UV-A ($\lambda=380$ nm)	1	2,5	0,6	$2,5 \times 0,50 = 1,25$	$2,5 \div 0,6 = 4,2$
Bendras:				219,05	167
B 5700 K	90	225	1,52	$225 \times 0,88 = 198$	$225 \div 1,52 = 148$
TR ($\lambda=447$ nm)	10	25	0,8	$25 \times 0,09 = 2,25$	$25 \div 0,8 = 31,25$
Bendras:				200,25	179,25

Vertinant pagrindinių apšvietimo spektro komponentių efektus ir apskaičiavus YFPD bei reikalingą energiją vienodam atitinkamo šviesos spektro srautui sukurti nustatyta, kad R ir R+M spektrai neturi reikšmingų energijos suvartojimo ar šviesos biologinio efektyvumo (YFPD) skirtumų. Turint omenyje, kad augalų biometriniai duomenys taip pat neturėjo reikšmingų skirtumų, augalus ekonomiškiau būtų auginti tik po raudonu apšvietimu, nes ir fitocheminio komponento jaunuose lapuose buvo sukaupta 2,3 karto daugiau, lyginant su R+M apšvietimu.

Įvertinus raudonai ir mėlynai šviesai papildomų komponentių (žalios, tolimosios raudonos) įtaką energijos suvartojimui matome, kad žalia šviesa dėl mažesnio fotonų efektyvumo reikšmingai padidina energijos kiekį reikalingą tam pačiam šviesos srautui sukurti (nuo 143 W R+M variante iki 214 W R+M+Ž). Tai reiškia, kad energijos reikės beveik 1,5 karto daugiau. Vertinant našųjų fotonų srautą YPPD – dalį PPFĐ pakeistus žalia šviesa šis sumažėja tik 4 %, kai dalį srauto pakeitus tolimąja raudona – sumažėja 19 %. Visgi, išsiaiškinus, kad žalia šviesa neturėjo reikšmingos įtakos augalų savybių pagerinimui, tolimosios raudonos šviesos pridėjimas yra labiau svarstytinas. Pridėjus tolimą raudoną šviesą, energijos sąnaudos išauga apie 1,24 karto, tačiau matomas ryškus jaunų augalo lapų antioksidacinių savybių pagerėjimas, lyginant su R+M apšvietimu.

Baltos šviesos derinių energijos suvartojimas yra didesnis nei R+M apšvietimo variantų. Kaip ir papildomų komponentių įtakos tyrimo atveju, tolima raudona taip pat pagerino augalo antioksidacines savybes, tačiau reikšmingų skirtumų nustatyta nebuvo. Atsižvelgus į B+TR ir B+UV apšvietimo energijos suvartojimą ir tyrimų rezultatus, galima teigti, kad įvestos papildomos komponentės yra energetiškai nuostolingos, lyginant su tik baltu apšvietimu, ir reikšmingos įtakos biologiniam šviesos efektyvumui (YPPĐ) neturi.

REKOMENDACIJŲ DALIS

1. Rekomendacijos plunksninių kalankių apšvietimui augalų fabrike

Šiame darbe atliktų eksperimentų rezultatai leido įvertinti galimybes apšvietimo parametrų pagalba valdyti plunksninių kalankių, auginamų kontroliuojamos aplinkos daržininkystės sistemose, žaliavos antioksidacines savybes ir tikslinių fitokomponentų – bufadienolidų koncentracijas jose. Nors pasirinktose parametrų verčių ribose nebuvo gauta reikšmingų šviesos efektų BA–135–Ac koncentracijai audiniuose, šviesos parametrai turi būti optimizuoti, siekiant pastovios, aukštos kalankių žaliavos kokybės, auginant jas augalų fabrikuose skirtingu metų laiku. Pastebėtinas didelis skirtingų vertintų augimo parametrų bei antioksidacinių savybių verčių išsibarstymas tarp biologinių pakartojimų tirtu šviesos parametro poveikyje. Tai rodo augalų atsako į šviesą netolygumą. Galimos priežastys – šviesos sklidimo srauto netolygumas, šviesos sklidimo kampas, šviesos atspindžiai, „krašto efektas“, temperatūros gradientai, oro judėjimo srtautai ir kt. Šiuos veiksnius būtina atpažinti ir kontroliuoti, siekiant gero gautų šviesos efektų atkuriamumo.

Tyrimų metu nustatyta reikšmingų šviesos efektų matuotiems rodikliams jaunuose kalankių lapuose. Jaunų lapų antioksidacinės sistemos reakcija yra jautresnė, nes veikiant šviesai antioksidacinės savybės pagerėja ir bufadienolido sukaupiama daugiau, kai brandžių lapų atsakas yra stabilesnis, jų antioksidacinės savybės mažiau paveikiamos skirtingų šviesos parametrų. Visgi, jaunų lapų masės dalis augale yra santykinai maža, todėl visi pasirinkimai yra tikslingi, remiantis brandžių lapų antioksidacinės sistemos rodikliais.

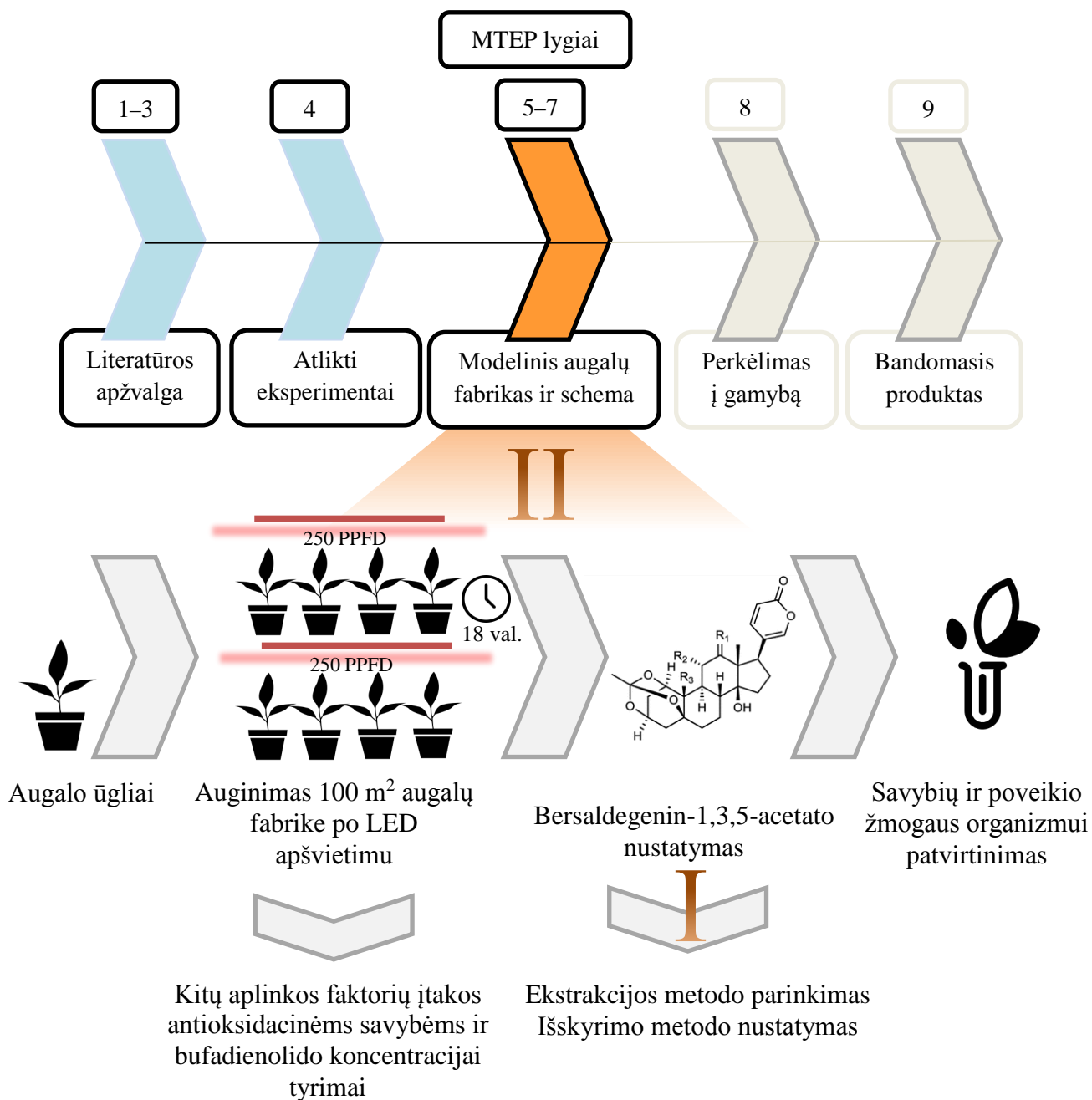
Įvertinus fotoperiodo, srauto ir apšvietimo taikymo tyrimų rezultatus ir ekonominius aspektus nustatyta, kad optimalios apšvietimo sąlygos efektyviam plunksninių kalankių auginimui augalų fabrike yra 18 valandų fotoperiodas ir $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ raudonos šviesos srautas. Padidinus apšvietimo srautą nuo 150 iki $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ Audiniuose sukaupto BA–135–Ac kiekis padidėja 1,5 karto, kai elektros energijos sąnaudos išauga tik 1,3 karto. Ilginant apšvietimo trukmę, augalų antioksidacinių savybių pagerėjimas nėra pakankamai reikšmingas, kad atsvertų ekonominių sąnaudų pokytį.

Vien raudonos šviesos efektyvumas antioksidacinėms savybėms ir bufadienolido koncentracijai yra didžiausias. Tačiau siekiant augalo fiziologijai palankesnio apšvietimo (fotosintezės efektyvumo ir aukštesnio chlorofilų, NBI indekso lapuose), tikslinga raudoną šviesą papildyti mėlyna. R+M derinys, lyginant su vien R, reikšmingai nesiskiria nei fotonų efektyvumo, nei biologinio efektyvumo, YPFD prasme. Baltoje LED šviesoje mėlynos šviesos procentinis indėlis yra artimas kaip ir R+M spektre, o jų YPFD reikšmingai nesiskiria, tačiau baltos šviesos tam pačiam srautui sukurti reikalingos elektros energijos sąnaudos yra didesnės ~14 %, lyginant su R+M spektru. Kitos papildomos komponentės, kaip žalia, UV–A ir tolimoji raudona, neigiamai veikia tiek YPFD, tiek sąlygines elektros energijos sąnaudas, reikalingas tam pačiam šviesos srautui sukurti, tačiau jos neturėjo teigiamos reikšmingos įtakos kalankių produktyvumui ar antioksidacinėms savybėms ir bufadienolido kiekiui, todėl toliau jų taikymo galimybės kalankių auginimui augalų fabrike nenagrinėjamos.

2. Produkto vystymo MTEP lygmuo ir sekančios veiklos

Remiantis mokslinių tyrimų ir eksperimentų plėtros (MTEP) ir inovacijų parengtumo lygiais [72], šiame tyrimų darbe įgyvendinta literatūros šaltinių ir eksperimentinė galimybių studija, atitinkanti MTEP1–MTEP3 lygmenį (3.16 pav). Surinkta informacija sudaro teorinį ir eksperimentinį pagrindą modelinio, mažos skalės augalų fabriko apšvietimo sistemos įrengimui (MTEP4). Numatomi du galimi galutiniai produktai: (I) – tai iš augalų fabrike užaugintų plunksninių kalankių žaliavos ekstrahuoti, išgryninti bufadienolidai arba (II) pats plunksninių kalankių standartizuotos žaliavos auginimo augalų fabrike metodas. Abiems atvejams MTEP4 lygmenyje svarbūs yra gretutiniai tyrimai – aplinkos ir mitybos faktorių augalų fabrike optimizavimas bei efektyvaus bufadienolidų ekstrakcijos iš kalankių žaliavos ir išgryninimo metodo sukūrimas. Pateikiama principinė aparatūrinė schema (3.21 pav), kurios komponentai (ekstrakcijos būdas/įranga; išgryninimo metodas/įranga) turėtų būti parinkti atskirų studijų keliu, o tolesnė produktų raida ir perspektyvos verslui priklausytų nuo šių gretutinių tyrimų rezultatų ir bendrinių ekonominių aspektų vertinimo kartu su verslo subjektu.

Augalų auginimas augalų fabriku sąlygomis tikslinių komponentų produkcijai – tarpdisciplininių žinių ir bendradarbiavimo reikalaujanti sritis. Aukštas technologinis tokių sistemų/procesų lygmuo reikalauja aukšto augalinės žaliavos ar išgryninto komponento pelningumo. Visgi, pagal atliktus tyrimus ir ekonominius apšvietimo vertinimus, plunksninės kalankės pavyzdžiu, apšvietimo spektro, srauto efektai augalams palankiose parametru ribose yra pervaldinami. Kaip ir pabrėžiamas LED apšvietimo efektyvumas yra smarkiai priklausomas nuo apšvietimo spektro parametru. Apibendrinant, tiek plėtojant tolesnę produkto vystymo MTEP schemą plunksninėms kalankėms, tiek vertinant apšvietimo efektus kitiems augalams, yra būtinas nuoseklus efektų vertinimas tiesioginėje sąsajoje su ekonomine verte.



3.21 pav. Biotechnologinio produkto gamybos ir vystymo schema pagal technologijų parengtumo lygius

IŠVADOS

1. Kalankių augimas ir audinių antioksidacinės savybės priklauso nuo apšvietimo spektro bei trukmės. Geriausios DPPH ir ABTS radikalų surišimo gebos bei geležies redukcinės galios vertės jaunuose kalankių lapuose buvo gautos augalus apšvietus 24 valandas $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ srautu, kai brandžiuose lapuose reikšmingų skirtumų užfiksuota nebuvo.

Daugiausia kalankių lapuose aptikto bufadienolido bersaldegenin-1,3,5-acetato sukaupta jaunuose lapuose, paveiktuose augalui optimaliu 18 valandų trukmės apšvietimu. Jaunų lapų antioksidacinės sistemos reakcija yra jautresnė ir, veikiant šviesai, antioksidacinės savybės pagerėja, o bufadienolido sukauptama daugiau, kai brandžių lapų atsakas yra stabilesnis, jų antioksidacinės savybės mažiau paveikiamos skirtingų šviesos parametru.

Remiantis koreliacijų ratu, antioksidacinės kalankių audinių savybės jautriai kinta priklausomai nuo apšvietimo srauto, lyginant su reakcija į fotoperiodą, todėl siekiant aukštesnės kalankių žaliavos kokybės, geresnių antioksidacinių savybių tikslinga yra didinti apšvietimo srautą, o ne fotoperiodą.

2. Kalankių augimo parametrus ir chlorofilų kiekiui audiniuose yra palankesnis raudonos ir mėlynos šviesos spektrinio derinio apšvietimas, kai vien raudona šviesa galimai veikia kaip fotostresorius ir paskatina antioksidacinės sistemos atsaką.

Baltos šviesos efektai plunksninių kalankių augimo parametrus bei antioksidacinėms savybėms prilygsta raudonos ir mėlynos šviesos spektro deriniui, tačiau elektros energijos sąnaudų prasme yra ~14 % mažiau efektyvus.

3. Reikšmingų šviesos efektų kalankių antioksidacinėms savybėms ir bufadienolido koncentracijai pasiekta tik jaunuose lapuose, kurie sudaro tik nedidelę bendros augalo biomasės dalį. Tirtomis sąlygomis apšvietimo spektras ir srautas yra labiau tinkami įrankiai plunksninių kalankių žaliavos kokybės pastovumo užtikrinimui, nei žaliavos praturtinimui tiksliniais bufadienolidais.

4. Įvertinus fotoperiodo, srauto ir apšvietimo taikymo tyrimų rezultatus ir ekonominius aspektus nustatyta, kad optimalios apšvietimo sąlygos efektyviam plunksninių kalankių auginimui yra 18 valandų fotoperiodas ir $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ raudonos šviesos srautas. Ilginant apšvietimo trukmę, ar pridėjus papildomos žalios ar tolimosios raudonos šviesos gautas kalankių antioksidacinių savybių pagerėjimas ir bufadienolido koncentracijos kaita nėra pakankamai reikšmingi, kad atsvertų elektros energijos sąnaudų padidėjimą.

LITERATŪROS SARAŠAS

1. GRAAMANS, L. , BAEZA E., DOBBELSTEEN ir kt. Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. *Agricultural Systems* [interaktyvus]. 2018, 31–43 [žiūrėta 2019-03-06]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.11.003>.
2. GOTO E. Plant production in closed plant factory with artificial lighting. *Light in Horticultural Systems*. 2012, 39–40.
3. TANAKA, M., TAKAMURA, T., WATANABE, H. ir kt. In vitro growth of Cymbidium plantlets cultured under superbright red and blue light-emitting diodes (LEDs). *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* [interaktyvus]. 1998, 39–44 [žiūrėta 2019-03-09]. Prieiga per: doi:10.1080/14620316.1998.11510941
4. VIRŠILĖ, A., OLLE, M., DUCHOVSKIS, P. LED Lighting in Horticulture. In: S.D. Gupta ed. *Light emitting diodes for agriculture: smart lighting* [interaktyvus]. Springer, 2017, pp. 113–147 [žiūrėta 2019-03-05] Prieiga per: doi: [10.1007/978-981-10-5807-3_7](https://doi.org/10.1007/978-981-10-5807-3_7).
5. BIAN, Z. H., YANG, Q. C., LIU, W. K. Effects of light quality on the accumulation of phytochemicals in vegetables produced in controlled environments: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture* [interaktyvus]. 2014, 95(5), 869–877 [žiūrėta 2019-03-20]. Prieiga per: doi:10.1002/jsfa.6789.
6. MITCHELL, C.A., DZAKOVICH, M.P., GOMEZ, C. ir kt. Light-Emitting Diodes in Horticulture. *Horticultural Reviews* [interaktyvus], 2015, 43, 1–88 [žiūrėta 2019-03-06]. Prieiga per: doi: 10.1002/9781119107781.ch01.
7. LUNA-MALDONADO, A. I., VIDALES–CONTRERAS, J. A., RODRIGUEZ–FUENTES, H. Advances and Trends in Development of Plant Factories. *Frontiers in Plant Science* [interaktyvus]. 2017, 31 [žiūrėta 2019-04-12]. Prieiga per: doi: 10.3389/fpls.2016.01848.
8. KOZAI, T. *Smart Plant Factory: The next Generations Indoor Vertical Farms*. Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2018. ISBN 978-981-13-1064-5.
9. SHAMSHIRI, R. R., KALANTIRI, F., TING, K. C. et al. Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* [interaktyvus]. 2018, 1–22 [žiūrėta 2019-04-11]. Prieiga per: doi: 10.25165/j.ijabe.20181101.3210.
10. JULES, J., PARIS, H., PARRISH. D. C., The Cucurbits of Mediterranean Antiquity: Identification of Taxa from Ancient Images and Descriptions. *Annals of Botany* [interaktyvus], 2007, 7, 1444 [žiūrėta 2019-04-11]. Prieiga per: doi: 10.1093/aob/mcm242.
11. HIRAMA, J. The history and advanced technology of plant factories. *Environ. Control Biol.* [interaktyvus], 2015, 53 (2), 47-48 [žiūrėta 2019-04-09]. Prieiga per: doi: 10.2525/ecb.53.47.
12. Grow Lights for Agriculture Market Shares, Strategies, and Forecasts, Worldwide, 2014 to 2020”, WinterGreen Research, ReportsnReports. Prieiga per internetą:

<https://www.reportsnreports.com/reports/280781-grow-lights-for-agriculture-market-shares-strategies-and-forecasts-worldwide-2014-to-2020.html>

13. JADHAV, A. Vertical Farming Market by Component (Irrigation Component, Lighting, Sensor, Climate Control, Building Material and Others) and by Growth Mechanism (Hydroponics, Aeroponics and Aquaponics). *Global opportunity analysis and industry forecast 2017–2025*. 2014. Prieiga per internetą: <https://www.alliedmarketresearch.com/vertical-farming-market>.
14. KOZAI, T. Propagation, grafting and transplant production in closed systems with artificial lighting for commercialization in Japan. *Propagation of ornamental plants*. 2007, 7 (3),145–149. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/237434751>.
15. CHRISTOU, P. From Medicinal Plants to Medicines in Plants: Plant Factories for the Production of Valuable Pharmaceuticals. *Current Pharmaceutical Design* [interaktyvus]. 2013, 31, 5469–5470 [žiūrėta 2019-04-06]. Prieiga per: doi: 10.2174/1381612811319310001.
16. STUTTE, G. W. Controlled Environment Production of Medicinal and Aromatic Plants. *Medicinal and Aromatic Crops: Production, Phytochemistry, and Utilization*. 2016, 49–63. ISBN 13:9780841231276.
17. ANPO, M., FAKUDA, H., WADA, T. Functional plants. *Plant Factory Using Artificial Light. Adapting to Environmental Disruption and Clues to Agricultural Innovation* [interaktyvus]. 2019, 143–154 [žiūrėta 2019-03-21]. Prieiga per: doi: 10.1016/B978-0-12-813973-8.00013-0.
18. KHAN, T., ULLAH, M. A., GARROS, L. ir kt. Synergistic effects of melatonin and distinct spectral lights for enhanced production of anti-cancerous compounds in callus cultures of *Fagonia indica*. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2019, 163–171 [žiūrėta 2019-04-07]. Prieiga per: doi: 10.1016/j.jphotobiol.2018.10.010.
19. ADIL, M., REN, X., JEONG, B. R. Light elicited growth, antioxidant enzymes activities and production of medicinal compounds in callus culture of *Cnidium officinale* Makino. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* [interaktyvus]. 2019, 3 [žiūrėta 2019-04-07]. Prieiga per: doi: 10.1016/j.jphotobiol.2019.05.006.
20. ARIAS, J. P., ZAPATA, K., ROJANO, B. ir kt. Effect of light wavelength on cell growth, content of phenolic compounds and antioxidant activity in cell suspension cultures of *Thevetia peruviana*. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* [interaktyvus]. 2016, 87–91 [žiūrėta 2019-04-13]. Prieiga per: doi: 10.1016/j.jphotobiol.2016.08.014.
21. SANG U. P., DEOK - JONG, A., HYEON - JEONG. ir kt. Increase in the Contents of Ginsenosides in Raw Ginseng Roots in Response to Exposure to 450 and 470 nm Light from Light-Emitting Diodes. *Journal of Ginseng Research* [interaktyvus]. 2012, 198–204 [žiūrėta 2019-04-13]. Prieiga per: doi: 10.5142/jgr.2012.36.2.198.
22. PARK, Y.G., OH, H. J., JEONG, B. R. Growth and anthocyanin concentration of *Perilla frutescens* var. *acuta* Kudo as affected by light source and DIF under controlled environment.

- Horticulture, Environment, and Biotechnology* [interaktyvus]. 2013, 103–108 [žiūrėta 2019-04-13]. Prieiga per: doi: 10.1007/s13580-013-0147-2.
23. ANPO, M., FAKUDA, H., WADA, T. Fundamentals to begin research on cultivation of medicinal plants. *Plant Factory Using Artificial Light. Adapting to Environmental Disruption and Clues to Agricultural Innovation*. 2019, 152. ISBN:978-0-12-813973-8.
 24. GONTCHAROVA, S. B., GONTCHAROV, A. A. Molecular phylogeny and systematics of flowering plants of the family Crassulaceae DC. *Molecular Biology* [interaktyvus]. 2008, 794–803 [žiūrėta 2019-04-15]. Prieiga per: doi: 10.1134/S0026893309050112.
 25. LUKŠYTĖ, I., SNIEŠKIENĖ, V. Sukulentų introdukcija Vytauto Didžiojo universiteto Kauno botanikos sodo dekoratyvinių augalų lauko kolekcijose. *Botanikos sodo raštai*. ISSN 1392–3714. Prieiga per internetą: https://www.vdu.lt/cris/bitstream/20.500.12259/33553/1/ISSN2345-0215_2011_T_15.PG_51-60.pdf
 26. CZEPAS, J.K., STOCHMAL, A. Bufadienolides of Kalanchoe species: an overview of chemical structure, biological activity and prospects for pharmacological use. *Phytochemistry Reviews* [interaktyvus]. 2017, 1155–1171 [žiūrėta 2019-03-06]. Prieiga per: doi: 10.1007/s11101-017-9525-1.
 27. RAOUF, A. H.S. Anatomical traits of some species of Kalanchoe (Crassulaceae) and their taxonomic value. *Annals of Agricultural Science* [interaktyvus]. 2012, 74 [žiūrėta 2019-04-13]. Prieiga per: doi: 10.1016/j.aosas.2012.03.002.
 28. MILAD, R., AHMEDY, S. E., SINGAB, N. A. Genus Kalanchoe (Crassulaceae): A Review of Its Ethnomedicinal, Botanical, Chemical and Pharmacological Properties. *European Journal of Medicinal Plants* [interaktyvus]. 2014, 86–104 [žiūrėta 2019-04-15]. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedomain.org/review-history/2372>.
 29. MAJAZ, A. Q., TATIYA, A. U., KHURSHID, M. ir kt. The miracle plant (Kalanchoe pinnata): A phytochemical and pharmacological review. *International Journal of Research in Ayurveda and Pharmacy*. 2011, 1478–1482. ISSN 2229-3566.
 30. UCHEGBU, R. I., AHUCHAUGU, A. A., AMANZE, K. O. ir kt. Chemical Constituents Analysis of the Leaves of Bryophyllum pinnatum by GC-MS. *AASCIT Journal of Chemistry* [interaktyvus]. 2017, 19–22 [žiūrėta 2019-04-15]. Prieiga per internetą: <http://www.aascit.org/journal/chemistry>.
 31. RAJSEKHAR, P. B., BHARANI, R. S. A., RAMACHANDRAN, M. ir kt. The “Wonder Plant” Kalanchoe pinnata (Linn.) Pers.: A Review. *Journal of Applied Pharmaceutical Science* [interaktyvus]. 2016, 151–158 [žiūrėta 2019-03-09]. Prieiga per: doi: 10.7324/JAPS.2016.60326.
 32. JOSEPH, B., SRIDHAR, S., SANKARGANESH ir kt. Rare Medicinal Plant - Kalanchoe Pinnata. *Research Journal of Microbiology* [interaktyvus]. 2011, 322–327 [žiūrėta 2019-03-09]. Prieiga per: doi: 10.3923/jm.2011.322.327.

33. PATTISON, P. M., TSAO, J. Y., BRAINARD, G. C. ir kt. LEDs for photons, physiology and food. *Nature* [interaktyvus]. 2018, 493–500 327 [žiūrėta 2019-04-28]. Prieiga per: doi: 10.1038/s41586-018-0706-x.
34. XU, Y. Nature and Source of Light for Plant Factory. *Elsevier* [interaktyvus]. 2019, 47–69 327 [žiūrėta 2019-03-20]. Prieiga per: doi: 10.1016/B978-0-12-813973-8.00002-6.
35. HUMPHREYS, C. J. Solid-State Lighting. *MRS Bulletin* [interaktyvus]. 2008, 459–470 [žiūrėta 2019-04-24]. Prieiga per: doi: 10.1557/mrs2008.91.
36. FAN, X. X., XU, Z. G., LIU, X. Y. ir kt. Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light. *Scientia Horticulturae* [interaktyvus]. 2013, 50–55 [žiūrėta 2019-04-25]. Prieiga per: doi: 10.1016/j.scienta.2013.01.017.
37. XU, Y. Seven dimensions of light in regulating plant growth. *Acta Hort.* 2018, p. 445–451. Prieiga per: doi: 10.17660/ActaHortic.2016.1134.56.
38. FUKUDA, N. Plant Growth and Physiological Responses to Light Conditions. *Efficient and effective vegetable cultivation technologies* [interaktyvus]. Elsevier. 2019, 71–77 [žiūrėta 2019-04-25]. Prieiga per: doi: 10.1016/B978-0-12-813973-8.00008-7.
39. Kevin R., COPE, K. R., BUGBEE, B. Spectral Effects of Three Types of White Light-emitting Diodes on Plant Growth and Development: Absolute versus Relative Amounts of Blue Light. *HortScience*. 2013, 504–509.
40. MASSA, D. G., KIM, H. H., WHEELER, R. M. ir kt. Plant Productivity in Response to LED Lighting. *HortScience*. 2008, 1951–1956.
41. SAGER, J. C., SMITH, W. O., CYR, K. L. Photosynthetic Efficiency and Phytochrome Photoequilibria Determination Using Spectral Data. *Transactions of the ASABE* [interaktyvus]. 1998, 31(6), 1882–1889 [žiūrėta 2019-04-27]. Prieiga per: doi: 10.13031/2013.30952.
42. VIRŠILĖ, A., *Fiziologiniai efektai metabolitų dinamikai žalumyninėse daržovėse ir želmenyse: Daktaro disertacija*. 2012.
43. YOUNAS, M., DROUET, S., NADEEM, M. ir kt. Differential accumulation of silymarin induced by exposure of *Silybum marianum* L. callus cultures to several spectres of monochromatic lights. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* [interaktyvus]. 2018, 61–70 [žiūrėta 2019-04-27]. Prieiga per: doi: 10.1016/j.jphotobiol.2018.05.018.
44. CIOC, M., SZEWCZYK, A., ZUPNIK, M. ir kt. LED lighting affects plant growth, morphogenesis and phytochemical contents of *Myrtus communis* L. in vitro. *Plant Cell Tiss Organ Cult* [interaktyvus]. 2018, 433–447 [žiūrėta 2019-05-07]. Prieiga per: doi: 10.1007/s11240-017-1340-2
45. ALINIAEIFARD, S., SEIF, M., ARAB, M. ir kt. Growth and Photosynthetic Performance of *Calendula officinalis* under Monochromatic Red Light. *International Journal of Horticultural*

- Science and Technology* [interaktyvus]. 2018, 123–132 [žiūrėta 2019-05-12]. Prieiga per: doi: 10.22059/ijhst.2018.261042.248.
46. LAZZARINI, L. E. S., BERTOLUCCI, S. K. V., PACHECO, F. V. ir kt. Quality and intensity of light affect *Lippia gracilis* Schauer plant growth and volatile compounds in vitro. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture* [interaktyvus]. 2018, 367–379 [žiūrėta 2019-05-09]. Prieiga per: doi: 10.1007/s11240-018-1470-1.
47. CHOI, J. H., SEONGE, E. S., YOO, J. H. ir kt. Enhancement of Growth Characteristics and Biological Activities in *Astragalus membranaceus* Using Artificial Light Sources. *Russian Journal of Plant Physiology* [interaktyvus]. 2018, 732–739 [žiūrėta 2019-05-09]. Prieiga per: doi: 10.1134/S1021443718050059.
48. VERMA, S. K., GANTAIT, S., RYONG, B. ir kt. Enhanced growth and cardenolides production in *Digitalis purpurea* under the influence of different LED exposures in the plant factory. *Scientific Reports* [interaktyvus]. 2018, 1–12 [žiūrėta 2019-05-11]. Prieiga per: doi: 10.1038/s41598-018-36113-9.
49. LINATOC, A. C., IDRIS, A., BAKAR, M. F. A. Influence of Light Intensity on the Photosynthesis and Phenolic Contents of *Mangifera Indica*. *Journal of Science and Technology* [interaktyvus]. 2018, 47–54 [žiūrėta 2019-05-02]. Prieiga per: doi: 10.30880/jst.2018.10.04.009.
50. BILODEAU, S. E. WU, B. S., RUFYIKIRI, A., S. ir kt. An Update on Plant Photobiology and Implications for Cannabis Production. *Frontiers in Plant Science* [interaktyvus]. 2019, 1–15 [žiūrėta 2019-05-11]. Prieiga per: doi: 10.3389/fpls.2019.00296.
51. TAMULAITIS, G., DUCHOVSKIS, P., BLIZNIKAS, Z. ir kt. High-power light-emitting diode based facility for plant cultivation. *Journal of Physics D: Applied Physics* [interaktyvus]. 2005, 3182–3187 [žiūrėta 2019-05-23]. Prieiga per: doi: 10.1088/0022-3727/38/17/S20.
52. KRAUJALYTĖ, V., VENSKUTONIS, P. R., PUKALSKAS, A. ir kt. Antioxidant properties and polyphenolic compositions of fruits from different European cranberrybush (*Viburnum opulus* L.) genotypes. *Food Chemistry*. 2013 [interaktyvus]. 3695–3702 [žiūrėta 2019-05-23]. Prieiga per: doi: 10.1016/j.foodchem.2013.06.054.
53. OUFIR, M., SEILER, C., GERODETTI, M. ir kt. Quantification of Bufadienolides in *Bryophyllum pinnatum* Leaves and Manufactured Products by UHPLC-ESIMS/MS. *Planta Medica* [interaktyvus]. 2015, 12–13 [žiūrėta 2019-05-23]. Prieiga per: doi: 10.1055/s-0035-1546126.
54. <https://www.eso.lt/lt/namams/elektra/tarifai-kainos-atsiskaitymas-ir-skolos/persiuntimo-paslaugu-kainos-2019.html>
55. NELSON, J., BUGBEE, B. Economic analysis of greenhouse lighting: light emitting diodes vs. high intensity discharge fixtures. *PLoS ONE* [interaktyvus]. 2014, 9(6) [žiūrėta 2019-05-05]. Prieiga per: doi: 10.1371/journal.pone.0099010.

56. KANG, J. H., KRISHNAKUMAR, S., ATULBA, S. L. S. ir kt. Light intensity and photoperiod influence the growth and development of hydroponically grown leaf lettuce in a closed-type plant factory system. *Horticulture, Environment, and Biotechnology* [interaktyvus]. 2013, 501–509 [žiūrėta 2019-05-22]. Prieiga per: doi: 10.1007/s13580-013-0109-8.
57. HE D., KOZAI T., NIU G., et al. Light-Emitting Diodes for Horticulture. In: Li J., Zhang G. (eds) Light-Emitting Diodes. Solid State Lighting Technology and Application Series, vol 4. Springer: 2019. Cham pp 513–548 [žiūrėta 2019-05-23]. Prieiga per: doi: 10.1007/978-3-319-99211-2_14.
58. ALI, B., KHANDAKER, L., OBA, S. Comparative study on functional components, antioxidant activity and color parameters of selected leafy vegetables as affected by photoperiods. *Journal of food, agriculture and environment*. 2009, 7, 392–398.
59. RAN, K. H., HAN, Y. Y. Effects of Red, Blue, White, and Far-red LED Source on Growth Responses of Wasabia japonica Seedlings in Plant Factory. *Horticultural Science and Technology* [interaktyvus]. 2013, 415–422 [žiūrėta 2019-05-23]. Prieiga per: doi: [10.7235/hort.2013.13011](https://doi.org/10.7235/hort.2013.13011).
60. LEAL-COSTA, M, NASCIMENTO, L., MOREIRA, N., et al. Influence of Blue Light on the Leaf Morphoanatomy of In Vitro Kalanchoe pinnata (Lamarck) Persoon (Crassulaceae). *Microscopy and Microanalysis* [interaktyvus], 2010, 16, 576–582 [žiūrėta 2019-05-25]. Prieiga per: doi: 10.1017/S1431927610000279.
61. OKAMOTO, K., YANAGI, T., TAKITA, S. Development of plant growth apparatus using blue and red led as artificial light source. *ISHS Acta Horticulturae* [interaktyvus]. 1996, 2 [žiūrėta 2019-04-13]. Prieiga per: doi: 10.17660/ActaHortic.1996.440.20.
62. CHEN, H. B., WU, J. Y., WANG, C. F. ir kt. Modeling on chlorophyll *a* and phycocyanin production by *Spirulina platensis* under various light-emitting diodes. *Biochemical Engineering Journal* [interaktyvus]. 2010, 52–56 [žiūrėta 2019-05-12]. Prieiga per: doi: [10.1016/j.bej.2010.09.004](https://doi.org/10.1016/j.bej.2010.09.004).
63. MANIVANNAN, A., SOUNDARARAJAN, P., HALIMAH, N. ir kt. Blue LED light enhances growth, phytochemical contents, and antioxidant enzyme activities of *Rehmannia glutinosa* cultured in vitro. *Horticulture, Environment, and Biotechnology* [interaktyvus]. 2015, 105–113 [žiūrėta 2019-05-29]. Prieiga per: doi: 10.1007/s13580-015-0114-1.
64. LEE, M. J., SON, K. H., OH, M. M. Growth and phenolic compounds of *Lactuca sativa* L. grown in a closed-type plant production system with UV-A, -B, or -C lamp. *Journal of the Science of Food and Agriculture* [interaktyvus]. 2013, 5 [žiūrėta 2019-05-29]. Prieiga per: doi: [10.1002/jsfa.6227](https://doi.org/10.1002/jsfa.6227).
65. LEE, M. J., SON, K. H., OH, M. M. Increase in biomass and bioactive compounds in lettuce under various ratios of red to far-red LED light supplemented with blue LED light. *Horticulture, Environment, and Biotechnology* [interaktyvus]. 2016, 139–147 [žiūrėta 2019-05-29]. Prieiga per: doi: 10.1007/s13580-016-0133-6.

66. STUTTE, G. W., EDNEY, S., SKERRITT, T. Photoregulation of bioprotectant content of red leaf lettuce with light-emitting diodes. *HortScience*, 2009, 44(1), 79–82 [žiūrėta 2019-05-21]. Prieiga per internetą: <https://journals.ashs.org/hortsci/view/journals/hortsci/44/1/article-p79.xml>.
67. BAE, J., PARK, S., OH, M. M. Supplemental irradiation with far-red light-emitting diodes improves growth and phenolic contents in *Crepidiastrum denticulatum* in a plant factory with artificial lighting. *Hortic. Environ. Biotechnol* [interaktyvus]. 2019, 58(4), 357–366 [žiūrėta 2019-04-20]. Prieiga per: doi: 10.1007/s13580-017-0331-x.
68. PARK, C., KIM, N. S., PARK, J. S. et al. Effects of light-emitting diodes on the accumulation of glucosinolates and phenolic compounds in sprouting canola (*Brassica napus* L.). *Foods* [interaktyvus]. 2019, 8, 76 [žiūrėta 2019-05-28]. Prieiga per: doi:10.3390/foods8020076.
69. DEMOTES-MAINARD, S., PERON, T., COROT, A. et al. Plant responses to red and far-red lights applications in horticulture. *Environmental and experimental botany* [interaktyvus] 2016, 121, 4-21 [žiūrėta 2019-05-29]. Prieiga per: doi:10,1016/j.envexpbot.2015.05.010.
70. NASCIMENTO, L., LEAL-COSTA, M. MENEZES, N., et al. Ultraviolet-B radiation effects on phenolic profile and flavonoid content of *Kalanchoe pinnata*. *Journal of photochemistry and photobiology B: Biology* [interaktyvus]. 2015, 148, 73–81 [žiūrėta 2019-05-28]. Prieiga per doi:10.1016/j.photobiol.2015.03.011.
71. PARK, Y. Spectral effects of light-emitting diodes on plant growth, visual color quality, and photosynthetic photon efficacy: White versus blue plus red radiation. *Plos One* [interaktyvus]. 2018, 13(8) [žiūrėta 2019-05-30]. Prieiga per: doi:10.1371/journal.pone.0202386.
72. PETRAITĖ, M. *MTEP lygių apibrėžčių metodologija*. Kaunas, 2014. Prieiga per internetą: https://mita.lrv.lt/uploads/mita/documents/files/leidiniai/mtep_lygiu_apibrezciumetodologija.pdf