

Wille Hyryläinen

LED-KASVIVALAISIMEN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS

LED-KASVIVALAISIMEN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS

Wille Hyyryläinen
Opinnäytetyö
Syksy 2021
Tietotekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Tietotekniikan tutkinto-ohjelma, laite- ja tuotesuunnittelun suuntautumisvaihtoehto

Tekijä: Wille Hyyryläinen

Opinnäytetyön nimi: LED-kasvivalaisimen suunnittelu ja toteutus

Työn ohjaaja: Jaakko Kaski

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: syksy 2021

Sivumäärä: 55 + 1 liite

Työn aiheena oli suunnitella ja toteuttaa LED-kasvivalaisin tukemaan kasvien hyvinvointia aikana, milloin luonnollinen valo on riittämätöntä. Työhön kuului LED-tekniikan nykytilanteen sekä potentiaalisen laitteiston kartoittaminen hyötysuhteen, hinnan ja fotosynteesiin soveltuvuuden perusteella. Työssä kerrottiin myös keinovalaistuksen historiasta, valon laadun vaikutuksesta kasveihin sekä erilaisista kasvivalaisintyypeistä. LED-moduulien sisältämien ledien mallin selvitys oli yksi työn osa-alue, sillä moduulin valmistaja ei ole tätä tietoa julkaissut.

Kasvivalaisimesta rakennettiin prototyyppi, jonka WiFi-relemoduuliin päivitettiin avoimen lähdekoodin laiteohjelmistoon ja asetettiin siihen haluttu valojakso. Valaisimen toimivuus testattiin käytännössä kasvattamalla valaisimen avulla vihanneskrassin sekä paprikan taimia tilassa, johon ei pääse ulkopuolista valoa sekä vertailemalla tuloksia erilaisissa valaistusolosuhteissa kasvaneisiin vertailuryhmiin.

Testijakson aikana todettiin kasvien menestyvän valaisimen alla hyvin ja lisävalaistukseen tarkoitettu valaisin toimi hyvin myös taimien ainoana valonlähteenä. Mahdollinen jatkokehitysidea energian säästämiseksi on valosensorin lisääminen valaisimen ajastimeen ja valon sammuttaminen, kun luonnollista valoa on riittävästi.

Asiasanat: keinovalo, valoviljely, energiatehokkuus, puutarhatalous, ledit

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in Information Technology, Option of Device and Product Design

Author: Wille Hyyryläinen
Title of thesis: Design and Implementation of LED Grow Light
Supervisor: Jaakko Kaski
Term and year when the thesis was submitted: autumn 2021
Number of pages: 55 + 1 appendix

Subject of this thesis was to design and implement LED horticultural lamp to support plant growth when the amount of natural light is insufficient. History of artificial lighting of plants was also studied. The work included mapping the current situation on LED-technology as well as potential equipment to use, based on efficiency, price and suitability for photosynthesis. Investigating the model of LEDs used in the chosen LED-modules were also one part of this work, because the manufacturer has not released this information.

A prototype of grow light was built and WiFi relay module with open source firmware was used as a timer. Functionality of this prototype was tested in practice by growing garden cress and bell pepper under the light.

Light was found to be sufficient for plant growth on its own and therefore it was considered as functional light to support insufficient natural light at winter. For further development connecting light sensor to timer module was considered to turn the light off to save energy when enough natural light is available for plants.

Keywords: artificial light, grow light cultivation, energy efficiency, horticulture, LEDs

SISÄLLYS

SANASTO JA LYHENTEET.....	7
1 JOHDANTO.....	8
2 VALON TARVE.....	9
2.1 Auringonvalo	9
2.2 Auringon säteily.....	10
2.3 Keinovaistuksen tarve.....	11
2.4 Päivittäinen valointegraali.....	11
2.5 Käyttökohteen luonnollinen säteilyteho	11
3 KASVIEN YHTEYTTÄMINEN	14
3.1 Fotosynteesi.....	14
3.2 Klorofyllit.....	14
4 VALON LAATU.....	16
4.1 Sähkömagneettinen spektri.....	16
4.2 Fotosynteettinen fotonivuo, fotonivuon tiheys sekä fotonitehokkuus	18
4.3 McCreen käyrä	18
5 LED-TEKNIikka.....	19
5.1 LED-tekniikan historia	19
5.2 Valkoisen ledin loisteaine	20
6 KASVIVALAISINTYYPIT	21
6.1 Suurpainenaatriumlamppu	21
6.2 Monimetallilamppu	22
6.3 Loisteputki ja pienoisloistelamppu	22
6.4 Plasmavalaisimet	23
6.5 Kapeakaistaiset LED-valaisimet.....	24
6.6 Täyden spektrin LED-valaisimet.....	25
7 VALAISIMEN SUUNNITTELU	26
7.1 Runko.....	26
7.2 LED-moduulien valinta	26
7.3 Kytkenä	29
7.4 Virtalähde.....	30
7.5 Ajastin ja valojakso.....	30

7.5.1	Ajastin	31
7.5.2	Ajastimen laiteohjelmiston päivitys ja konfigurointi.....	31
7.6	Hyötysuhde ja fotosynteettinen fotonitehokkuus	37
7.6.1	Virtalähteen hyötysuhde.....	37
7.6.2	LED-moduulien fotosynteettinen fotonitehokkuus	37
7.6.3	Kokonaishyötysuhde ja fotosynteettinen fotonitehokkuus	37
8	VALAISIMEN TOTEUTUS	38
8.1	Osien hankkiminen sekä hinnat.....	38
8.2	Valaisimen rakentaminen	39
8.2.1	Runko	40
8.2.2	Elektroniikka.....	40
9	TESTAUS JA TULOKSET	41
9.1	Pintalämpötilat.....	42
9.2	Virtalähteen mitattu hyötysuhde	44
9.3	Valon intensiteetti	44
9.4	Toimivuus keinovalona	45
10	TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET	49
11	YHTEENVETO	50
	LÄHDELUETTELO	52
	LIITE 1	56

SANASTO JA LYHENTEET

absorptio	ilmiö, jossa atomit, molekyylit tai ionit pidättyvät aineeseen.
atsimuutti	ilmansuunta asteina ilmoitettuna, 0° tarkoittaa etelää.
COB	Chip-On-Board, ledityyppi
DLI	Daily Light Integral, päivittäinen valointegraali
fotomorfogeneesi	valon aiheuttama morfogeneesi
GPIO	General Purpose Input/Output, yleiskäyttöinen siirräntä
HPS / SPNa	High Pressure Sodium / suurpainenatrium. Lampputyyppejä
loisteaine / fosfori	aine, jossa esiintyy luminesenssi-ilmiö
morfogeneesi	muodon kehittyminen / erilaistuminen
PAR	Photosynthetically Active Radiation, fotosynteettisesti aktiivinen säteily
PPE	Photosynthetic Photon Efficacy, fotosynteettinen fotonitehokkuus
PPF	Photosynthetic Photon Flux, fotosynteettinen fotonivuo
PPFD	Photosynthetic Photon Flux Density, fotosynteettisesti aktiivisen säteilyn vuon tiheys
SMD	Surface-Mount Device, pintaliitoskomponentti
spektri	havaitun suureen jakautuminen komponentteihin energian tai taajuuden mukaan

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena oli suunnitella ja toteuttaa LED-kasvivalaisin. Opinnäytetyön valaisimen tilaajana toimi yksityishenkilö, joka asuu vastavalmistuneessa kerrostaloasunnossa, jossa on ranskalainen parveke ja jonka ikkunalliset ovet ovat pohjoisen suuntaan. Ikkunoiden välittömässä läheisyydessä kasvaa muun muassa runsaasti valoa vaativia paprikoita.

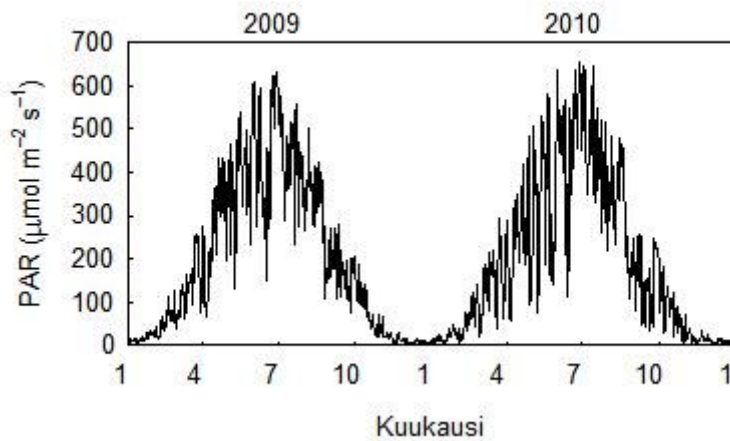
Talven aikana tilaaja huomasi, että hänen kasvinsa tarvitsevat lisävalaistusta. Näiden seikkojen takia ajatus keinovalaistuksesta heräsi keskusteluissa tilaajan kanssa ja ideoita alettiin työstämään. Tilaajalle oli tärkeää, että valaisin edustaisi modernia tyyliä ja sopisi asunnon sisustuksen. Myös energiatehokkuus, valon miellyttävä sävy ihmissilmälle ja sopiva kirkkaus olivat tärkeä osa kasvi-valon vaatimuksista. Myös työn tekijän oma kiinnostus LED-tekniikkaa ja keinovalaistusta kohtaan toimi motivaationa opinnäytetyön aiheen valinnassa.

Työn tavoitteena oli tutustua tällä hetkellä saatavilla olevaan LED-tekniikkaan, keinovalaistuksen teoriaan, fotosynteesiin sekä ledien hyödyntämismahdollisuuksiin kasvien keinovalaistuksessa. Tavoitteena oli vertailla moderneja ledejä perinteisempiin valaistusratkaisuihin, vertailla spektrien soveltuvuutta ja valaisimien hyötysuhteita. Valaisimesta rakennettiin prototyyppi ja tämän toimivuus testattiin kasvattamalla vihanneskrassin sekä paprikan taimia valaisimen alla sekä kolmessa muussa vertailuryhmässä.

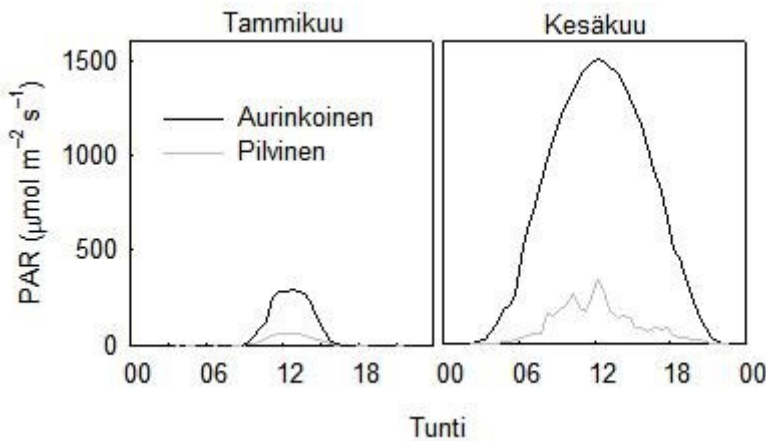
2 VALON TARVE

2.1 Auringonvalo

Auringonvalon määrä Suomessa vaihtelee suuresti vuodenajan mukaan. Juupajoen Hyytilän tutkimusasemalla on mitattu mm. auringonvalon PAR-arvoa kahden vuoden ajan, vuosina 2009 ja 2010. PAR-säteily on ollut voimakkainta kesäkesällä yli 600 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ -keskimääräisellä voimakkuudellaan. Korkeimmat huippuarvot kesäkuussa ovat noin kello 12 aikaan 1 500 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ -huippuvoimakkuudellaan (kuvat 1 ja 2) (1).



KUVA 1. PAR-säteilyn määrä Hyytilän tutkimusasemalla vuosina 2009 ja 2010 (1)

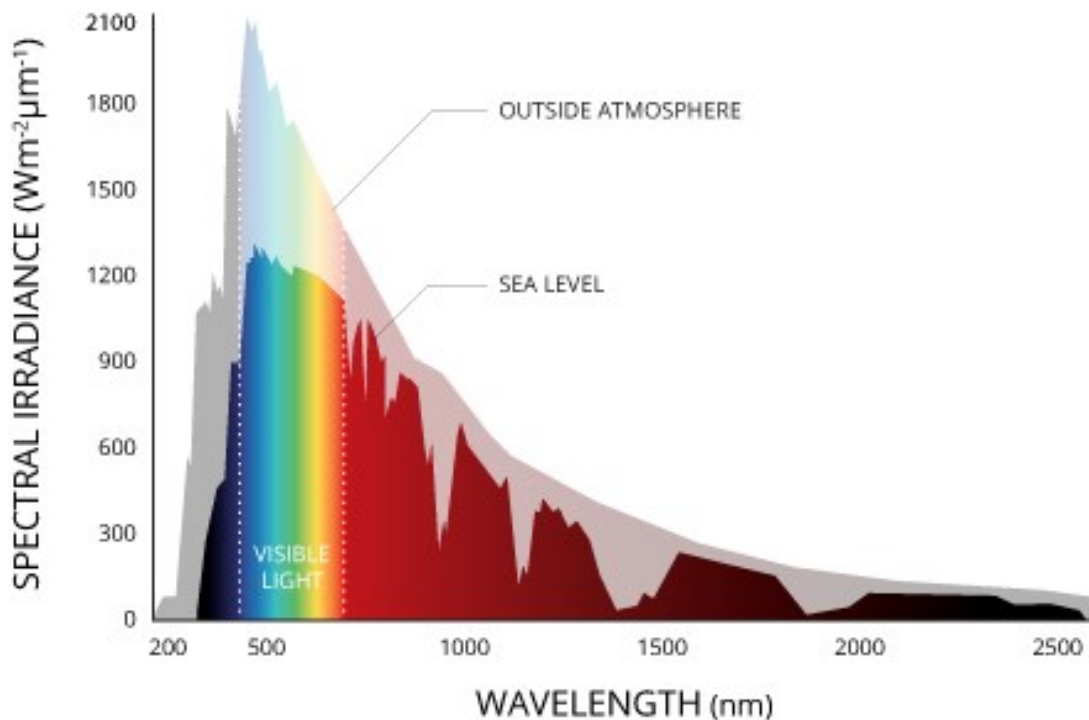


KUVA 2. PAR-säteilyn määrä tammikuussa sekä kesäkuussa aurinkoisena sekä pilvisenä päivänä Hyytilän tutkimusasemalla (1)

2.2 Auringon säteily

Auringon säteily on auringon tuottamaa elektromagneettista säteilyä. Se tuo maahan lämpöä sekä energiaa fotosynteesiin. Tämä säteilevä energia on välttämätöntä ympäristön sekä sen asukkaiden elämälle. Kolme oleellisinta auringon säteilyn spektrialueella ovat ultravioletti, näkyvä valo sekä infrapuna. Maan pinnalle saapuvasta säteilystä 49,4 % on infrapunasäteilyä, 42,3 % näkyvää valoa ja 8,3 % ultraviolettisäteilyä (kuva 3) (2).

Auringon säteilyn määrä ja intensiteetti vaihtelevat useiden muuttujien mukaan. Näitä ovat esimerkiksi kohteen leveysaste, vuodenaika, kellonaika, pilvipeite sekä korkeus. Kaikki auringonsäteily ei saavuta maan pintaa, vaan suuri osa absorboituu, heijastuu tai hajaantuu ilmakehään. Maan pinnalla energia voi absorboitua suoraan auringonsäteilystä, tätä kutsutaan suoraksi säteilyksi. Epä-suora säteily on taas hajautunutta säteilyä, joka saavuttaa kohteen (2).



KUVA 3. Auringon säteilyn spektri ilmakehän ulkopuolella sekä merenpinnan korkeudella (2)

2.3 Keinovalaistuksen tarve

Oulussa auringonvalon vuotuinen kokonaissäteilyenergian määrä vaakatasolle on n. 840 kWh neliömetrille vuodessa. (3.) Euroopan unionin aurinkosähköjärjestelmien suunnitteluun käytetyn järjestelmän simuloima vaakatason vuotuinen kokonaissäteilyenergia käyttöosoitteeseen on 869,1 kWh/m²/a. Energian määrä on vahvasti sidonnainen vuodenaikaan, joten varsinkin talvikuukausien aikainen keinovalaistus on hyödyllistä (4).

Fotosynteettisesti aktiivisen säteilyn osuus tästä auringonvalon kokonaissäteilyenergiasta voidaan arvioida karkeasti käyttäen kerrointa 1 joule = 4,6 μmol. Näin ollen kohteen vuoden keskimääräinen fotosynteettisesti aktiivinen fotonivuo päivässä vaakasuoralle pinnalle 99,21 W/m² -säteilyteholla on 456,38 μmol/m²/s (5).

2.4 Päivittäinen valointegraali

Päivittäinen valointegraali (Daily Light Integral, DLI) on mitta päivittäiselle fotoaktiiviselle säteilymäärälle pinta-alaa kohden. Eri kasvilajit vaativat eri määrän valoa kasvaakseen normaalisti. DLI ilmoitetaan muodossa moolia neliömetrille päivää kohti. Esimerkkeinä sanikkakasvit, marantakasvit, orkideat, saintpauliat ja viirivehkat pärjäävät hyvin vähäisellä valolla (minimi tyydyttävään laatuun tarvittava DLI 2 mol/m²/d, hyvään laatuun 4 mol/m²/d, erinomaiseen laatuun 6–10 mol/m²/d), kun taas esimerkiksi tsinniat, inkaliljat, paprikat, krysanteemit, neilikat, gladiolukset ja tomaatit kukoistavat saadessaan reilusti valoa (minimi tyydyttävään laatuun tarvittava DLI 10–12 mol/m²/d, hyvään laatuun 14–20 mol/m²/d, erinomaiseen laatuun 22–30 mol/m²/d) (6, s. 5–7). Kohteen simuloitu vuoden keskiarvoinen DLI vaakasuoran pinnan kokonaissäteilyenergiasta laskettuna on 39,43 mol/m²/d.

2.5 Käyttökohteen luonnollinen säteilyteho

Työn kohteena olevassa huonekasvien sijoituspaikassa laskurilla simuloitu säteilyteho 90°:n kallistuskulmalla ja -179°:n atsimuutilla, tarkoittaa lähes suoraan pohjoiseen suunnattua pystysuoraa pintaa, sillä käyttökohteen ikkunat ovat rakennuksen pohjoispuolella. Näillä arvoilla laskettiin EU:n PVGIS-5-tietokantaa hyödyntäen simuloitun neliömetrille osuvan säteilytehon määrä sekä tästä laskettu päivittäinen valointegraali (taulukko 1). Laskelmissa ei ole huomioitu läheisten rakennusten

eikä kasvillisuuden aiheuttama varjostusta tai heijastuksia eikä ikkunalasikerrosten aiheuttamaa häviötä, vaan taulukon tarkoituksena on antaa karkea arvio lisävalaistuksen tarpeesta. Suoraan pohjoiseen (-180°) suunnattua pintaa kyseisen simulaattorin rajoitusten vuoksi ei pystytty simuloimaan, joten simulaatiossa tyydyttiin -179° :n atsimuuttiin (4).

Kohteessa on useita paljon valoa tarvitsevia kasveja, josta esimerkkinä paprika, joka vaatii tyydyttävään kasvuun $10\text{--}12\text{ mol/m}^2/\text{d}$, hyvään kasvuun $14\text{--}20\text{ mol/m}^2/\text{d}$ sekä erinomaiseen kasvuun $22\text{--}30\text{ mol/m}^2/\text{d}$ (6, s. 7). Tyydyttävä auringonvalon määrä saavutetaan huhti-elokuussa. Erinomainen määrä valoa taas saadaan touko-heinäkuussa.

TAULUKKO 1. Auringon säteilyteho sekä DLI neliömetrille kohteessa kulma 90° , atsimuutti -179°

Kuukausi	Säteilyteho (kWh/m²/kk)	Wh/m²/vrk	kJ/m²/vrk	DLI (mol/m²/vrk)
Tammikuu	1,1	36,67	132	0,61
Helmikuu	5,5	183,33	660	3,04
Maaliskuu	14,9	496,67	1788	8,22
Huhtikuu	27,4	913,33	3288	15,12
Toukokuu	47,8	1593,33	5736	26,39
Kesäkuu	60,6	2020,00	7272	33,45
Heinäkuu	52,4	1746,67	6288	28,92
Elokuu	29,4	980,00	3528	16,23
Syyskuu	13,3	443,33	1596	7,34
Lokakuu	6,1	203,33	732	3,37
Marraskuu	1,5	50,00	180	0,83
Joulukuu	0,3	10,00	36	0,17

Referenssiksi simuloitiin myös luonnollisen auringonvalon säteilyteho sekä DLI vaakatasoiselle pinnalle kohteessa, ottamatta huomioon varjoja tai heijastumia (taulukko 2).

TAULUKKO 2. Auringon säteilyteho sekä DLI neliömetrille kohteessa kulma 0°, atsimuutti 0°

Kuukausi	Säteily (kWh/m ² /kk)	Wh/m ² /vrk	kJ/m ² /vrk	DLI (mol/m ² /vrk)
Tammikuu	3,0	100,00	360	1,66
Helmikuu	17,4	580,00	2088	9,60
Maaliskuu	64,3	2143,33	7716	35,49
Huhtikuu	113,7	3790,00	13644	62,76
Toukokuu	153,9	5130,00	18468	84,95
Kesäkuu	163,4	5446,67	19608	90,20
Heinäkuu	154,0	5133,33	18480	85,01
Elokuu	112,0	3733,33	13440	61,82
Syyskuu	58,9	1963,33	7068	32,51
Lokakuu	23,7	790,00	2844	13,08
Marraskuu	4,3	143,33	516	2,37
Joulukuu	0,6	20,00	72	0,33

3 KASVIEN YHTEYTTÄMINEN

3.1 Fotosynteesi

Suurin osa elämästä maapallolla on riippuvainen fotosynteesistä. Kasvit, levät ja tietyt tyypiset bakteerit hyödyntävät tätä prosessia, joka kaappaa auringonvalon energiaa tuottaakseen happea sekä kemiallista energiaa glukoosin muodossa. Fotosynteesin aikana kasvit käyttävät hiilidioksidia ja vettä, jotka se saa maasta ja ilmasta. Kasvin solun sisällä vesi hapettuu, eli se menettää elektroneja ja hiilidioksidi pelkistyy, eli vastaanottaa elektroneja. Tämä prosessi muuttaa veden hapeksi ja hiilidioksidin glukoosiksi. Tämän jälkeen kasvi vapauttaa hapen takaisin ilmaan ja säilyttää energian glukoosimolekyyleissään (7).

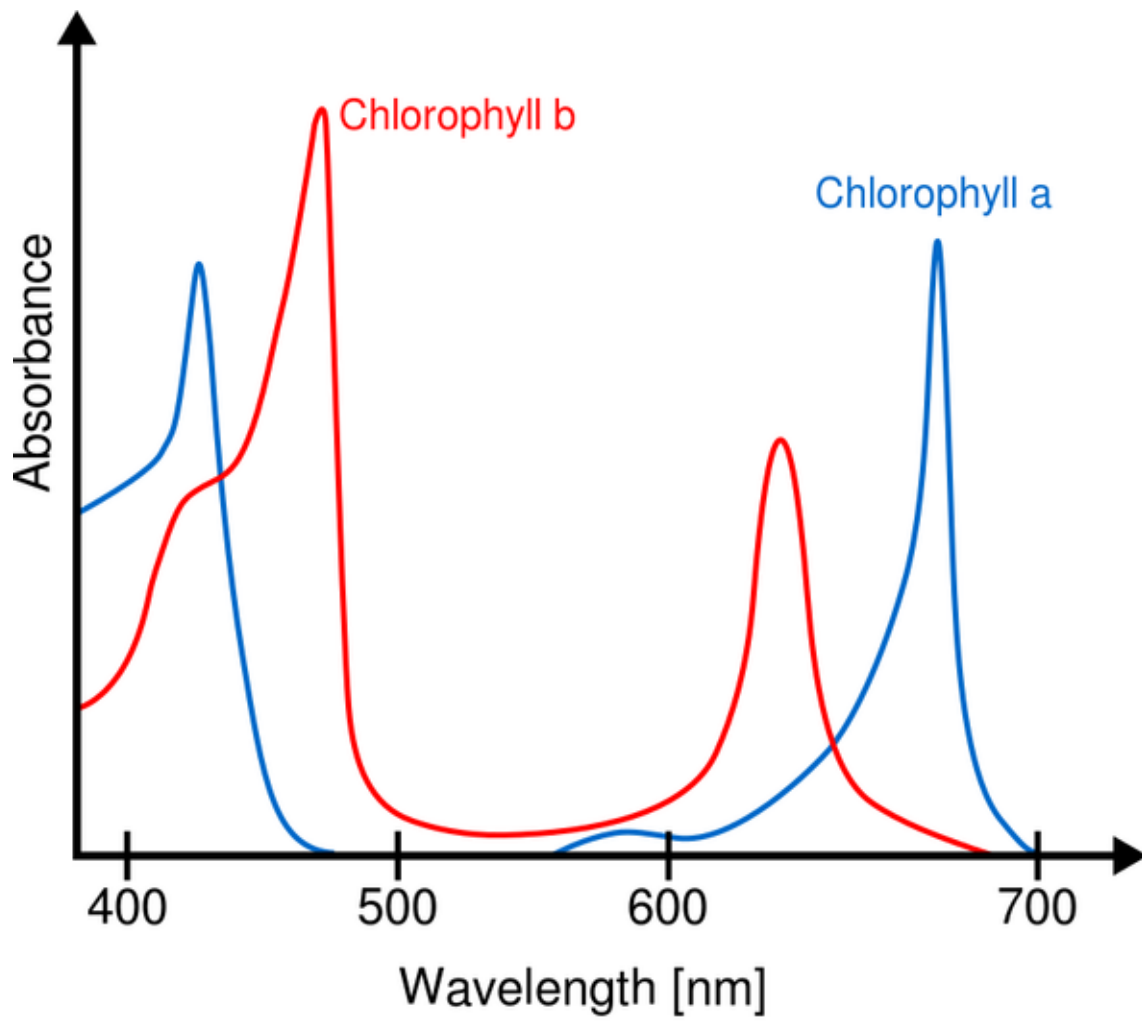
3.2 Klorofyllit

Klorofylli eli lehtivihreä on kasvin sisällä olevien solujen sisällä olevia pieniä organelleja eli solunsisäisiä erillisiä rakenneyksiköitä, jolla on oma tehtävänsä. Näitä kutsutaan kloroplasteiksi eli viherhiukkasiksi, jotka säilyttävät auringonvalon tuottamaa energiaa (8, s. 512).

Klorofylli on ryhmänimi, jolla tarkoitetaan kasvien lehtivihreää eli niiden vihreää väriainetta. Tavallisimmat näistä pigmenteistä ovat a-klorofylli ($C_{55}H_{72}MgN_4O_5$), joka on väriltään sinivihreä, sekä b-klorofylli ($C_{55}H_{70}MgN_4O_6$), joka väriltään on kellanvihreä. Eri klorofyllityypit eroavat toisistaan kemiallisten sivuryhmien ja kaksoissidosten perusteella (8, s. 339).

A-klorofyllin absorptiohuiput ovat vahvimmillaan 642 nm punaisella alueella sekä 372 nm sinisellä alueella, kun taas b-klorofyllin absorptiohuiput ovat vastaavasti 626 nm sekä 392 nm (kuva 4) (9).

Klorofyllien absorptioalueiden takia kasvit näyttävät vihreiltä, sillä ne hyödyntävät yhteyttämisessä lähinnä sinisiä ja punaisia aallonpituuksia ja heijastavat tai läpäisevät niille tarpeettoman vihreän aallonpituusalueen pois.

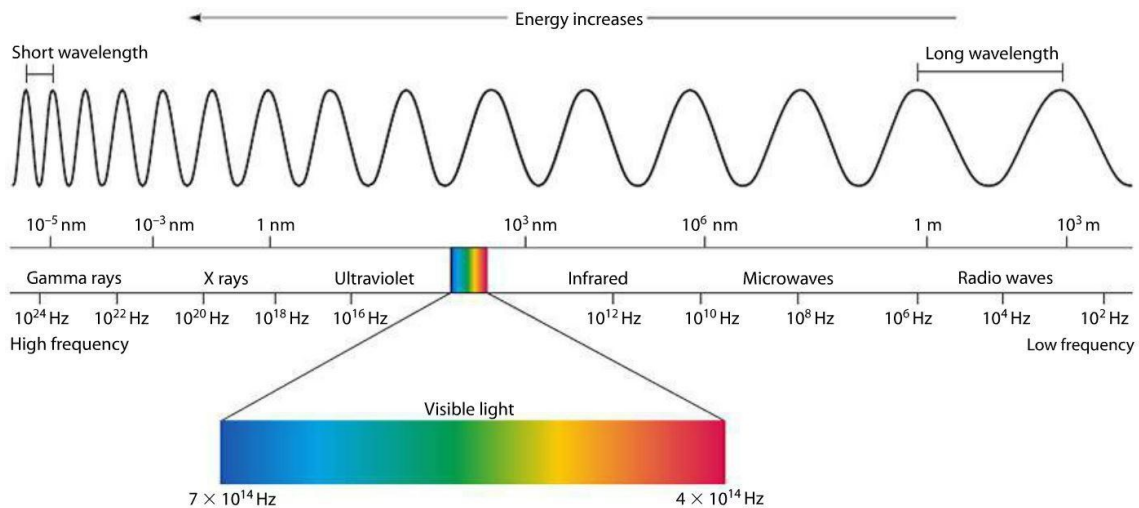


KUVA 4. Klorofylli a- sekä b-pigmenttien absorptiospektrit (9)

4 VALON LAATU

4.1 Sähkömagneettinen spektri

Kuuman kappaleen säteilemä spektri on jatkuva, koska materiaalin kappaleessa on useita erilaisia oskillaattoreita, joten käytännössä säteilyä on kaikilla taajuuksilla. Sähkömagneettisen spektrin pääkomponentit ovat gamma- ja röntgensäteily, ultraviolettisäteily, näkyvä valo, infrapunasäteily, mikroaallot sekä radioaallot (kuva 5).



KUVA 5. Sähkömagneettisen säteilyn kirjo näkyvän valon spektri (10)

Gamma- ja röntgensäteily ovat korkeimman energian elektromagneettista säteilyä ja ne läpäisevät materiaaleja helposti. Niillä on lyhyimmät aallonpituudet ja korkeimmat taajuudet. Radioaktiiviset materiaalit emittoivat gammasäteilyä, röntgensäteilyä saadaan taas esimerkiksi röntgenputkista. Ultraviolettisäteily on toiseksi korkeimman energian säteilyä. Sitä voivat tuottaa erittäin kuumat kappaleet, kuten esimerkiksi aurinko. Maan ilmakehä suodattaa valtaosan mahan saapuvasta ultraviolettisäteilystä.

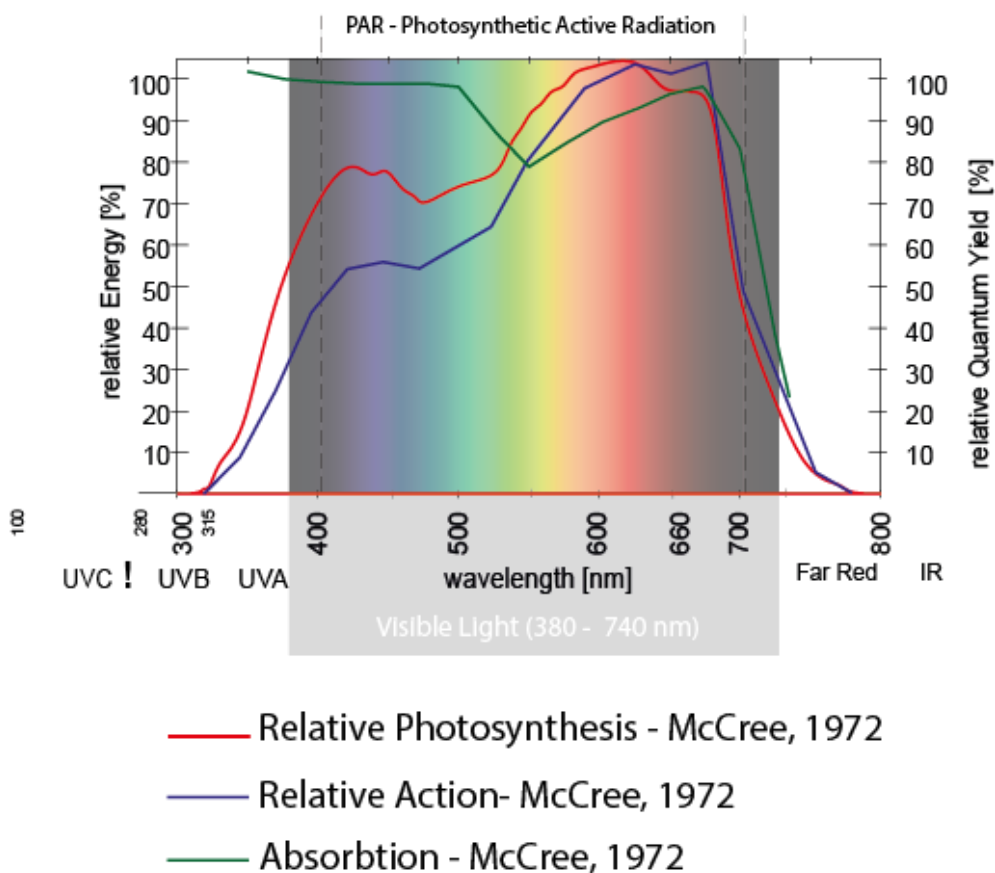
Näkyvä valo on ainut elektromagneettisen säteilyn muoto, jonka voimme nähdä silmillämme. Se käsittää hyvin kapean sektorin elektromagneettisen säteilyn kirjosta. Aurinko ja muut valkoisen kuumat kappaleet tuottavat valkoista valoa, joka sisältää kirjon eri aallonpituuksia. Infrapunasäteilyä

lyä voi tuottaa mikä tahansa kuuma kappale, samaan tapaan valkoisen valon kanssa, mutta infrapunalla on pidempi aallonpituus. Infrapunasaiteily absorboituu helposti aineeseen ja nostaa sen lämpötilaa.

Mikroaaltosaiteilyä voidaan tuottaa erityisillä sähköisillä laitteilla, joita kutsutaan klystroniksi. Metallit heijastavat mikroaalloja ja epämetallit absorboivat niitä. Radioaalloilla on pisimmät aallonpituudet, muutamasta senttimetristä kilometreihin. Niitä voidaan tuottaa resonansseilla erityisissä sähköisissä piireissä sekä sähkökipinällä. Niitä voidaan havaita metalliantenneilla (10).

Yleisesti hyväksytty ihmissilmän näkemän näkyvän valon aallonpituusalue on 380–780 nanometriä, mutta lapsien näkemä aallonpituusalue voi alkaa 320 nm:stä ja ulottua suurilla kirkkauksilla peräti 1 100 nm:iin (11, s. 222–229). Lyhyet aallonpituudet ovat ihmissilmän näkemänä violettiä valoa, pitkät taas punaista.

Fotosynteesistä aktiivinen säteily on määritelty näkyvän valon spektrialueeksi, jonka aallonpituus on 400 ja 700 nm:n väliltä ja jota kasvit pääasiassa hyödyntävät fotosynteesissä (kuva 6) (12;13).



KUVA 6. Valon spektri, fotosynteettisesti aktiivisen säteilyn alue sekä McCreen käyrät (13)

4.2 Fotosynteettinen fotonivuo, fotonivuon tiheys sekä fotonitehokkuus

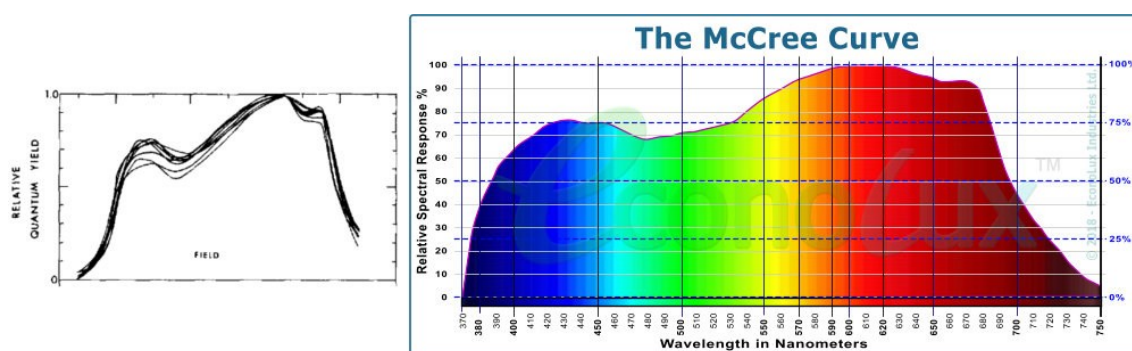
Fotosynteettisellä fotonivuolla (Photosynthetic Photon Flux, PPF) tarkoitetaan fotosynteettisesti aktiivisen säteilyn määrää, joka ilmoitetaan mikromoleina sekuntia kohti ($\mu\text{mol/s}$) (14).

Fotosynteettisen fotonivuon tiheydellä (Photosynthetic Photon Flux Density, PPF_D) tarkoitetaan fotosynteettisesti aktiivisen säteilyn määrää pinta-alaa kohden. Tämä ilmoitetaan tyypillisesti mikromoolia neliömetrille sekuntia kohti ($\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$) (14).

Fotosynteettisellä fotonitehokkuudella (PPE Photosynthetic Photon Efficacy) tarkoitetaan, kuinka monta fotosynteettisesti aktiivista fonia energialla voidaan tuottaa. Tämä ilmoitetaan yleensä muodossa mikromoolia joulea kohti ($\mu\text{mol/J}$) (15).

4.3 McCreen käyrä

McCreen käyrä on Keith J. McCreen 1972 julkaiseman tutkimuksen käyrä, joka kuvaa 22 eri kasvin lehden hiilidioksidin absorptiota, kun niitä valaistetaan eri monokromaattisilla aallonpituuksilla. Käyrästä voidaan siis arvioida kasvien vastetta valon eri aallonpituuksille. Vasemmasta kuvaajasta näkee hiilidioksidin absorptioopeutta eri monokromaattisilla aallonpituuksilla valaistuna. Oikealla taas keskiarvoistus kyseisistä käyristä (kuva 7).



KUVA 7. Alkuperäiset McCreen käyrät vasemmalla, sekä keskiarvoistettu käyrä oikealla (16)

5 LED-TEKNIikka

Light-emitting Diode eli LED on puolijohde, joka muuttaa sähköenergiaa valoksi. Yleensä diodin koko on pieni, noin yksi neliömillimetri tai vähemmän, joten LED-valaisimissa käytetään useita diodeja (17).

5.1 LED-tekniikan historia

Elektroluminesenssin konseptin kehitettiin vuonna 1907 Henry Joseph Round, joka havaitsi ilmiön piikarbidilla. Tämä keltainen valo oli tosin liian himmeä mihinkään hyötykäyttöön. Lisätutkimusta ei tuolloin aiheesta tehty. 1920 Bernhard Gudden sekä Robert Wichard Pohl käyttivät sinkkisulfidia kuparin kanssa toistaakseen kyseisen ilmiön, mutta jälleen valo oli liian heikko mihinkään hyötykäyttöön ja tutkimustyö pysäytettiin. Termin "elektroluminesenssi" otti käyttöön George Destriau vuonna 1936, kun hän julkaisi raportin sinkkisulfidijauheen tuottamasta valoilmioista, kun sen läpi johdettiin sähkövirtaa (17).

Vuonna 1961, työskennellessään Texas Instrumentsilla, Robert Biard ja Gary Pittman keksivät infrapunaledin. Tälle ei tosin tuolloin ollut hyötykäyttöä, koska infrapuna on näkymätöntä ihmisille. Tämä keksintö oli vahinko, sillä he työskentelivät laserdiodin parissa. Kokeet galliumarsenidin käyttämisestä puolijohdeena olivat alkaneet 1950-luvulla, ja ne johtivat myöhemmin ensimmäiseen hyötykäyttöön soveltuvaan lediin. Vuonna 1962 Nick Holonyak Jr. keksi ensimmäisen ledin, joka pystyi tuottamaan näkyvää punaista valoa. Hän keksi nämä ledit työskennellessään General Electricille. Kokeet puolijohdeiden parissa, jotka pystyivät parempaan hyötysuhteeseen, jatkuivat 1960-luvun läpi. Vuosikymmenen alkuvuosina ledejä tehtiin galliumarsenifosfidilla galliumarsenidisubstraattilla. Galliumfosfidin käyttäminen substraattina nosti hyötysuhdetta ja kirkkaammat punaiset ledit syntyivät. Myöhemmin alettiin tuottamaan myös oransseja ledejä (17).

Vuonna 1972 Monsanto-yhtiön M. George Craford käytti kahta galliumfosfidipiiriä, yhtä punaista ja yhtä keltaista luodakseen ledin, joka tuotti vaaleankeltaista valoa. Sattumalta Monsanto oli ensimmäinen yritys, joka tuotti ledejä suurella skaalalla ja massakulutukseen. Craford keksi myös ledin, joka tuotti noin kymmenen kertaa kirkkaamman valon kuin Holonyakin versio. Tutkijat alkoivat

1970-luvun puolivälissä käyttää ainoastaan galliumfosfidia tehdäkseen ledejä, jotka tuottivat vaaleanvihreää valoa. Nämä kokeet johtivat parempiin lediversioihin vuosikymmenen loppuun mennessä. Nämä ledit pystyivät tuottamaan puhtaan vihreää valoa. Ledien käyttö yleistyi tällä vuosikymmenellä, kun Fairchild Optoelectronics alkoi tuottamaan edullisia tuotteita (17).

Jatkuva ja intensiivinen tutkimus- ja kehitystyö led-tekniikan kanssa johti ensimmäisen sukupolven niin sanottujen superkirkkaiden punaisten, keltaisten sekä vihreiden ledien kehitykseen 1980-luvun alussa. Tutkijat kokeilivat 1990-luvun alussa gallium-alumiinifosfidia puolijohdemateriaalina tuottaakseen superkirkkaita oranssipunaisia, oransseja, vihreitä ja keltaisia ledejä (17).

Vuonna 1994 Shuji Nakamura keksi superkirkkaan sinisen ledin käyttäen galliumnitridiä ja pian tämän jälkeen kirkkaat siniset ja vihreät ledit kehitettiin käyttäen indiumgalliumnitridiä. Nämä ns. ultrakirkkaat siniset ledit loivat perustuksen edullisille sekä erittäin hyödyllisille valkoisille ledeille. Tutkijat keksivät, että päällystämällä sinistä valoa tuottava piiri fluoresoiva loisteaineella diodi saatiin tuottamaan kirkkaanvalkoista valoa (17).

5.2 Valkoisen ledin loisteaine

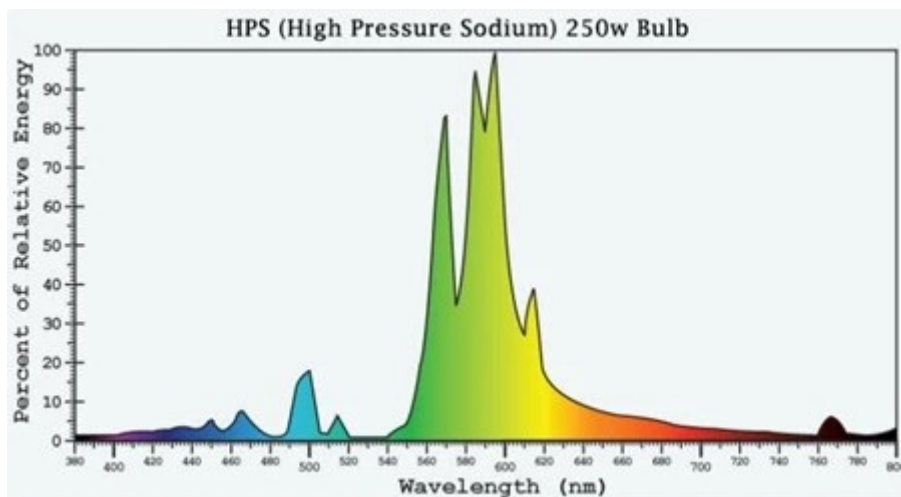
Sinisen 450–460 nm aallonpituuden ledin tuottama korkeaenerginen säteily johdetaan loisteaineeseen, joka luovuttaa eteenpäin pidemmän aallonpituuden säteilyä. Ledin fosfori eli loisteaine kauppa-alaisessa merkityksessään on fotoluminesensoiva materiaali, joka voi absorboida galliumnitridiledin violetin tai sinisen valon ja muuttaa sen pidemmän aallonpituuden valoksi. Loisteaineet valmistetaan kiinteistä luminesensoivista materiaaleista, jotka absorboivat sinistä (450–460 nm) valoa ja vapauttavat vihreää, keltaista, oranssia tai punaista valoa tämänhetkellä valtavirran LED-markkinoilla. Näiden loisteaineiden sekoituksella saadaan aikaiseksi valkoista valoa (18).

6 KASVIVALAISINTYYPIT

Tässä luvussa käydään läpi erilaisia perinteisiä kasvivalaisintyyppejä, niiden spektrikuvaaja sekä fotosynteettisiä fotonitehokkuuksia. Spektrikuvaaja voidaan verrata esimerkiksi McCreen käyrään arvioidakseen spektrin soveltuvuutta fotosynteesiin. Erilaisten valaisimien valaisimien fotosynteettisiä fotonivoita (Photosynthetic Photon Flux, PPF) ja fotosynteettisiä fotonitehokkuuksia (Photosynthetic Photon Efficacy, PPE) on ilmoitettu liitteessä (liite 1).

6.1 Suurpainenatriumlamppu

Suurpainenatrium (SPNa) (HPS, High Pressure Sodium) on kaasupurkauslamppu, joka on kehitetty 60-luvulla. Se on käytetyin valaisintyyppi niin kaupallisessa maataloudessa kuin harrastajienkin keskuudessa. Sen spektri painottuu pääasiassa punaisen valon alueelle (kuva 8) ja sen PPE-arvo on yksi perinteisten kasvivalaisintyyppien parhaimmista. Kaksipäiset lamput ovat nyt teknologian eturintamassa, polttimon jopa 2,1 $\mu\text{mol}/\text{J}$ sekä valaisimen noin 1,9 $\mu\text{mol}/\text{J}$ PPE-arvolla (19).

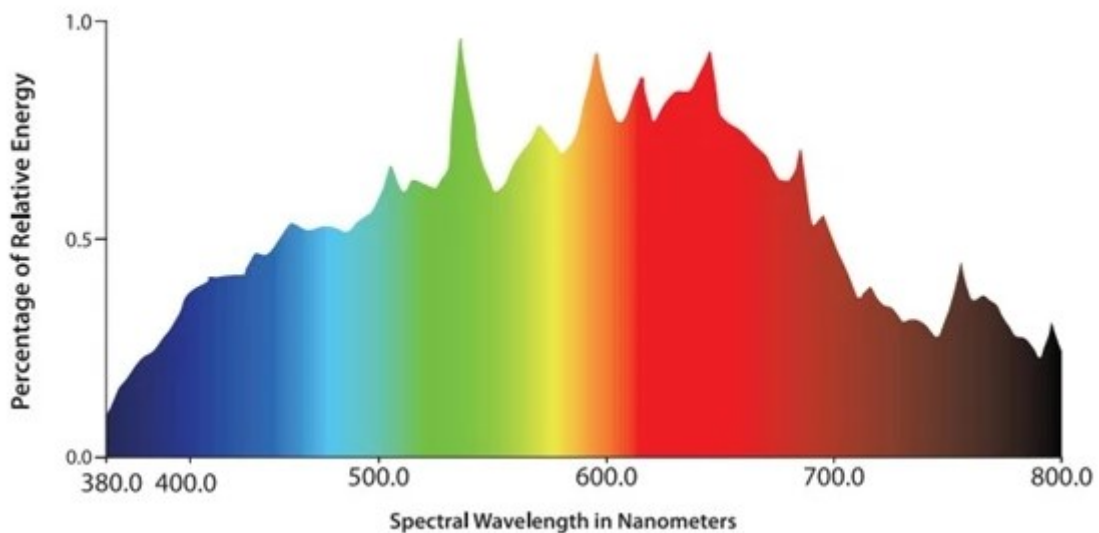


KUVA 8. 250 W Suurpainenatriumlampun spektri (20)

6.2 Monimetallilamppu

Monimetalli eli metallihalidi (MH) on kaasupurkauslamppu, jolla on suurpainenatriumiin verrattuna sinisempi spektripainotus. Sinisen fotonin tuottamiseen tarvitaan enemmän energiaa, joten valaisintyyppillä on tyypillisesti suurpainenatriumia matalampi PPE (19).

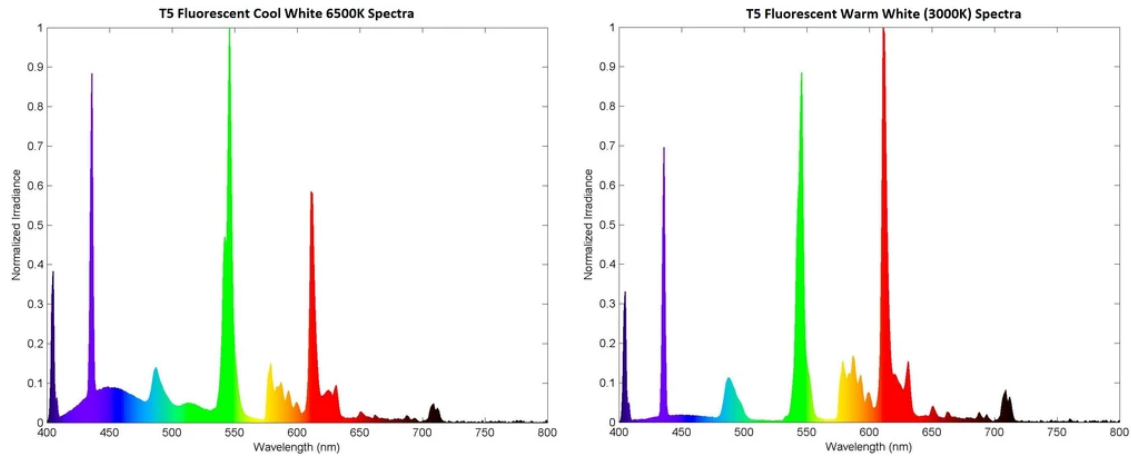
Keraaminen metallihalidi on metallihalidista jatkokehitetty lampputyyppi, joka tuottaa hyvin laajan spektrin valoa (kuva 9) ja polttimon PPE on noin 1,9 $\mu\text{mol}/\text{J}$. Tällä polttimotyyppillä valaisin kykenee häviöineen noin 1,67 $\mu\text{mol}/\text{J}$ PPE-arvoon (19).



KUVA 9. Keraamisen metallihalidilampun spektri (20)

6.3 Loisteputki ja pienoisloistelamppu

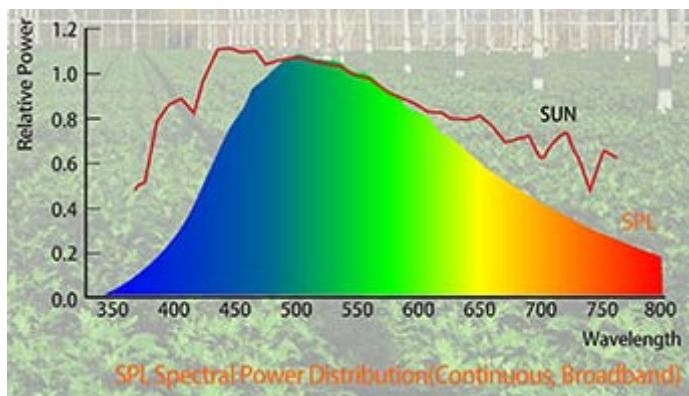
Kaasutäytteiset loisteputkivalaisimet ovat tyypillisesti pienitehoisia ja matalan intensiteetin valaisimia. Ne ovat putkia, joiden sisällä on elohopeahöyryä ja argonkaasua. Ne sytytetään jännitepiikillä, mikä aiheuttaa kaasun ionisaation ja ultraviolettivalon muodostumisen. Putken pinnalla on loisteaineita, jotka muuttava UV-valon näkyväksi valoksi. Lamppujen spektrit ovat yleensä hyvin piikikkäitä, mikä johtuu loisteaineiden ominaista atomisiirtymistä (kuva 10). Loisteputkien ja pienoisloistelamppujen PPE on noin 1,1 $\mu\text{mol}/\text{J}$ (19).



KUVA 10. 6500K sekä 3000K T5-tyyppin loisteputken spektri (20)

6.4 Plasmavalaisimet

Plasmalampuissa käytetään elektrodien sijasta virityslähteenä magnetronin tuottamaa 2,45 GHz:n mikroaaltosäteilyä, jolla viritetään lampun rikki- tai halidimolekyylejä. Plasmalampun hyötysuhde on korkea ja jopa 70 % plasmaan syötetystä tehosta säteilee näkyvänä valona (kuva 11). Kumminkin plasmalamput ovat erittäin tehokkaita säteilylähteitä, jotka vaativat hyvin hienostuneita heijastimia ja valaisimia. Lisäksi ne toimivat hyvin korkeassa, noin 900 °C:n lämpötilassa ja vaativat jäähdytystä ja etäisyyttä kasvien latvoista. Rikkiplasmavalaisimet ovat tyypillisesti teholtaan 700–3 000 W ja niiden PPE on noin 1,3 $\mu\text{mol}/\text{J}$. Halidiplasmavalaisimet ovat tyypillisesti teholtaan 250–500 W ja niiden PPE on noin 1,0 $\mu\text{mol}/\text{J}$ (21).

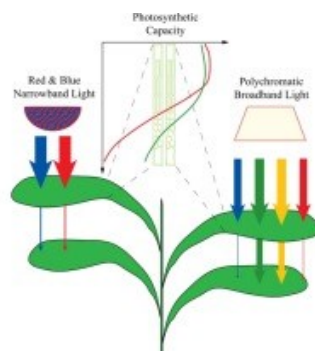


KUVA 11. Rikkiplasmavalaisimen spektri (22)

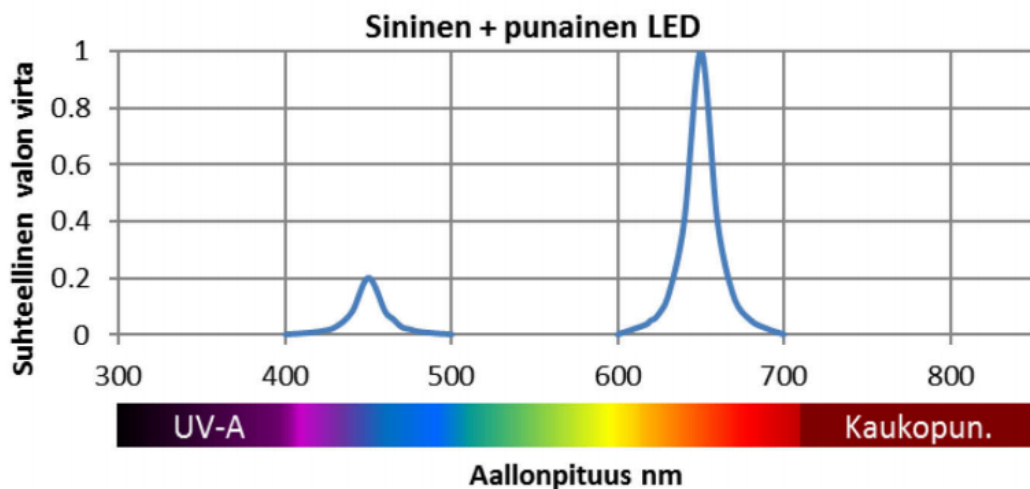
6.5 Kapeakaistaiset LED-valaisimet

Kapeakaistaiset eli monokromaattisista ledeistä rakennetut, pinkkiä tai violettia valoa tuottavat led-valaisimet ovat yksi LED-kasvivalaisimien tyyppi. Usein useita aallonpituusalueita PAR-säteilyalueen sisältä ja mahdollisesti sen ulkopuoleltakin tuottaa parhaan koko kasvuston kehityksen, yhteyttämisen sekä sadon. Täten kapeakaistaisista LED-valaisimista ollaan nykyään siirtymässä ns. täyden spektrin valaisimiin (23).

2015 tehdyssä tutkimuksessa verrattiin kiinankaalin kasvamista identtisen fotosynteettisesti aktiivisen säteilyn intensiteetillä, monokromaattisen LED-valaisimen sekä suurpainenatriumvalaisimen välillä (24). Tuloksena oli, että suurpainenatriumvalaisimen alla kasvaneet yksilöt olivat kuivamassaltaan suurempia. Syynä tähän epäiltiin violetin valon huonoa läpäisevyyttä alemmille lehtikerroksille verrattuna suurpainenatriumin laajempaan spektriin (kuva 12).



KUVA 12. Graafinen tiivistelmä valon läpäisevyydestä (24)

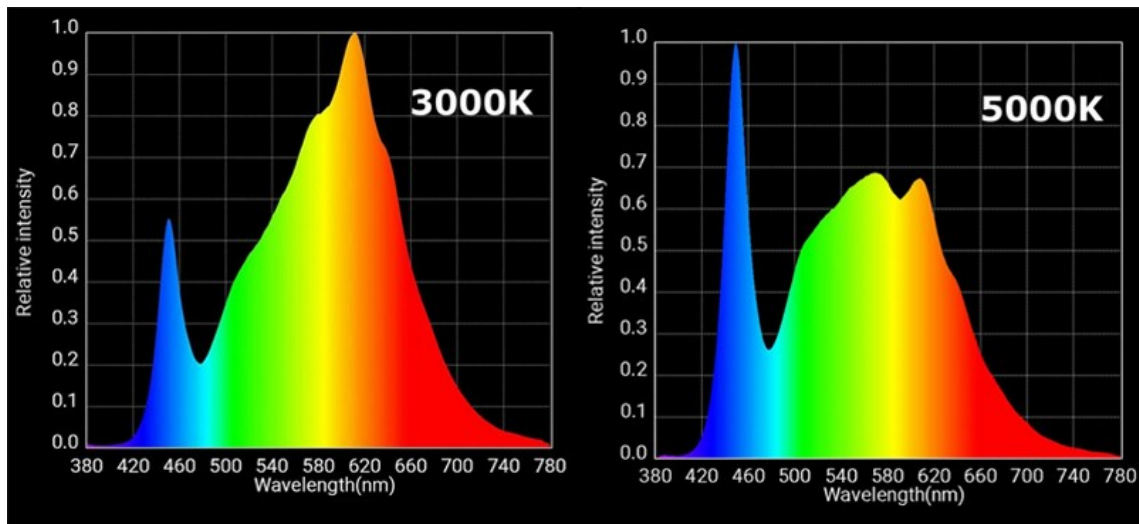


KUVA 13. Sinipunaisen monokromaattisen LED-valaisimen tyypillinen spektri (25)

6.6 Täyden spektrin LED-valaisimet

On jo pitkään tiedetty fotosynteesissä käytettävän valon merkitys, mutta ymmärrys muun valon vaikutuksista kasvien kehitykseen on kuitenkin herännyt vasta viime vuosisadalla. Valon spektrin laadun vaikutus fotosynteesiin ei ole ainoa tärkeä muuttuja, vaan valon laatu toimii myös informaatiopakettina kasveille ja aiheuttaa erilaisia kehitysvasteita (26).

LED-valaisin, joka tuottaa säteilyä 400–700 nm -aallonpituusalueella, voidaan kutsua täyden spektrin valaisimeksi. Valkoisten valaisimien spektrit kuitenkin vaihtelevat suuresti esimerkiksi värilämpötilan mukaan (27).



KUVA 14. 3000K ja 5000K ledien spektrikuvaajat (27)

7 VALAISIMEN SUUNNITTELU

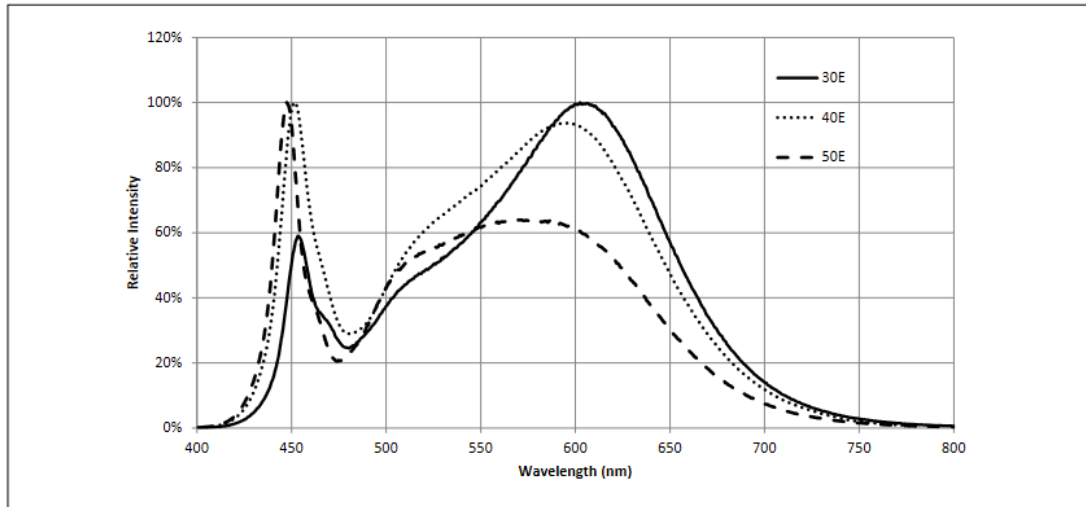
7.1 Runko

Runko päätettiin rakentaa 25 x 25 mm:n alumiiniprofiilista, johon päädyttiin sen helpon saatavuuden ja jäähdytysprofiilina toimimisen takia. LED-moduuleita voidaan ajaa 700 mA:n virralla ilman jäähdytysprofiilia, mutta jäähdytysprofiilien avulla LED-moduuleja voidaan yliajaa ilman lämpötilojen nousemista liian korkeaksi. Matalampi lämpötila myös pidentää ledien käyttöikää. Runko koostuu kahdesta 175 cm pitkästä alumiiniprofiilista, johon kuhunkin kiinnitetään kolme LED-moduulia. Alumiiniprofiilit yhdistetään käyttäen kierretankoa, muttereita ja alumiiniputkea. Rungon päälle kiinnitetään virtalähde, ajastin sekä jakorasia kytkentöjä varten.

7.2 LED-moduulien valinta

LED-moduuleiksi valittiin kuusi kappaletta Bridgeluxin valmistamia EB Gen 2 -sarjan moduuleita 560 mm:n pituudessa ja 3 000 kelvinin värilämpötilalla, mallinumeroltaan BXEB-L0560Z-30E2000-C-B3 eli spektriltään punaisen valon alueelle painottuva malli. (Kuva 15.) Moduuleista on saatavilla myös uudempi, kolmannen sukupolven (EB Gen 3) mallisarja, mutta huolimatta paremmasta hyötysuhteesta päädyttiin toisen sukupolven (EB Gen 2) -moduuleihin, sillä ne ovat tällä hetkellä huomattavasti edullisempia. Tähän malliin päädyttiin fyysisten mittojen, varsin hyvän hyötysuhteen sekä kilpailukykyisen hinnan takia, joten moduuleita saatiin ostettua useampi kappale verrattuna vaihtoehtoisiin LED-moduuleihin ja näin ollen ajettua ledejä pienemmällä virralla, viileämpänä sekä paremmalla hyötysuhteella. Yksi LED-moduuli koostuu piirilevystä, liittimistä sekä 112 kappaleesta 2835-kokoluokan (2,8 x 3,3 mm) pintaliitosledejä.

Figure 10: Typical Color Spectrum

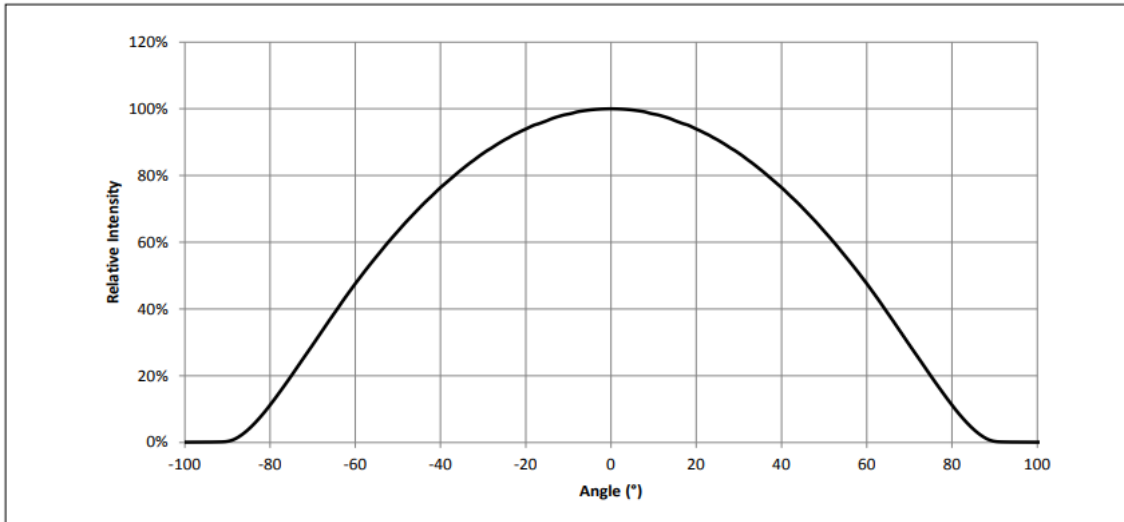


Note for Figure 10:

1. Color spectra measured at nominal current for $T_{c2} = 50^{\circ}\text{C}$.
2. Color spectra shown for 30E is 3000K and 80 CRI.
3. Color spectra shown for 40E is 4000K and 80 CRI.
4. Color spectra shown for 50E is 5700K and 80 CRI.

KUVA 15. Bridgelux EB Gen2 3000K 80 CRI, 4000K 80 CRI sekä 5700K 80 CRI spektrikuvaajat (28)

LED-moduulin säteilykulmaksi on määritelty 120° , joka on kulma, minkä sisällä valon intensiteetti on vähintään 50 % ledin kohtisuoran valon intensiteetistä. (Kuva 16.) (28.) Esimerkkinä yhden ledin 20 cm:n etäisyydellä oleva vähintään 50 %:n intensiteetin kattama alue on säteeltään 34,65 cm:n ympyrä ($\tan(60^{\circ}) * 20 \text{ cm} = 34,65 \text{ cm}$). LED-rivistöjen pituudet valaisimessa ovat $3 * 56 \text{ cm}$ ja moduulien väleissä on 1 cm:n välit, eli kokonaispituutena 170 cm. Rivistöt ovat 6 cm:n etäisyydellä toisistaan, joten 50 %:n intensiteetin ylittävä alue on karkeasti arvioituna leveydeltään $75,3 \text{ cm}$ ($2 * 34,65 \text{ cm} + 6 \text{ cm} = 75,3 \text{ cm}$) ja pituudeltaan $239,3 \text{ cm}$ ($2 * 34,65 \text{ cm} + 170 = 239,3 \text{ cm}$), joten 20 cm:n korkeudelta valaistaessa yli 50 %:n intensiteetin alue on noin $1,8 \text{ m}^2$.

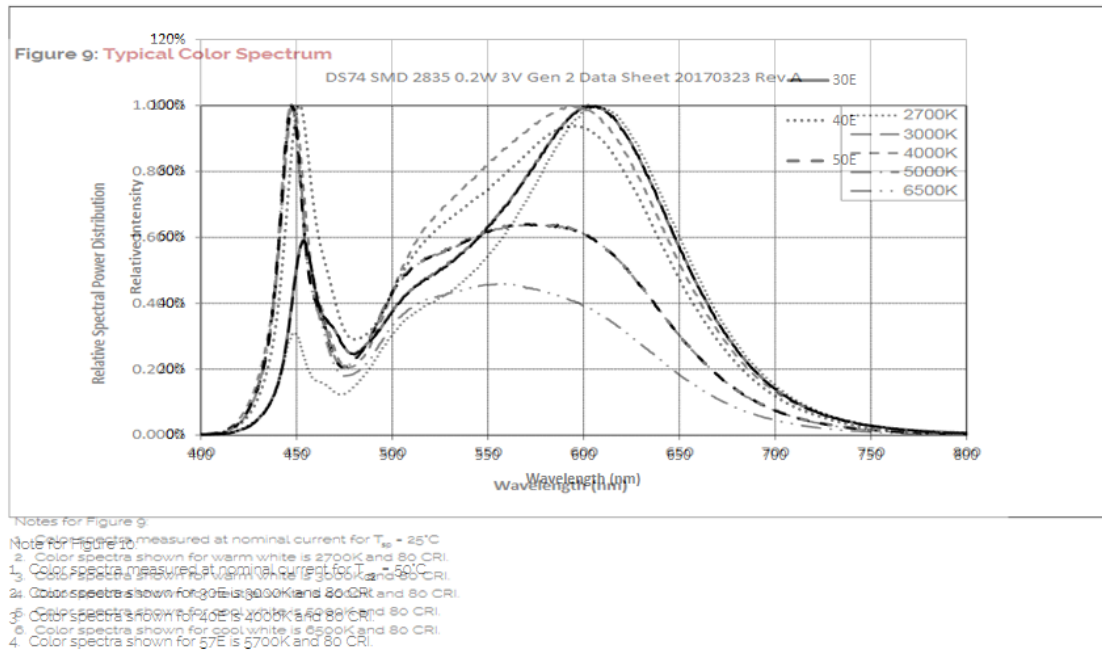


KUVA 16. Led-moduulin säteilykuvio (28)

Valmistaja ei ilmoita moduulissa käytettävien ledien mallia, joten selvitystyö jouduttiin tekemään itse, vertailemalla kuvankäsittelyohjelmalla valmistajan 2835-kokoluokan ledien datalehdissä ilmoitettuja spektrejä moduulin spektriin (Kuva 17.) Lopputulos oli, että kyseisessä moduulissa käytetään Bridgelux SMD 2835 0.2W 3V Gen 2 (DS74) -sarjan BXEN-30E-11L-3C-00-0-0 -ledimallia. Kaikki laskut perustuvat tähän olettamukseen.

Figure 10: Typical Color Spectrum

DS131 Bridgelux EB Series Gen2 Data Sheet 20171020 Rev A



KUVA 17. LED-moduulin sekä verratun ledin datalehtien spektrikuvaajat päällekkäin (28;29)

7.3 KytKentä

Valitut moduulit sisältävät 112 lediä, jotka on kytketty 7S16P-kytkennällä eli 16 kpl ledejä rinnan sekä 7 kpl kuudentoista ledin rinnankytkettyä kokonaisuutta kytkettynä sarjaan.

Moduulit päätettiin kytkeä rinnan. Bridgelux lupaa moduuleille 60 voltin maksimijännitteen järjestelmässä, joten jos kaikki kuusi moduulia olisi kytketty sarjaan, olisi käyttöjännite ollut noin 117 voltia, mikä on paitsi valmistajan ohjeistuksen ylittävä jännite, mutta myös mahdollisesti vaarallinen jännite, joka vaatii suojauksen kosketukselta mm. kuluttajaelektronikkaa koskevan tuoteturvallisuusstandardin IEC/EN 62368-1:2014 (30, s. 75) mukaan. Tämän standardin mukaan alle 60 voltin tasajännitteellä toimivat laitteet luokitellaan ns. ES1-luokkaan, joka ei vaadi minkäänlaista kosketussuojausta (30, s. 62). Koska moduuleita voi prototyypivalaisimen tapauksessa kosketella käsin, päädyttiin lopputulokseen, että moduulit kytketään rinnan.

Rinnankytkennän negatiivisena puolena voidaan mainita mahdollinen epätasainen virran jakautuminen moduulien välillä, mikäli ledien lämpötila ei ole sama, sillä ledien käyttöjännite laskee noin 2 mV lämpötilan noustessa yhdellä celsiusastella (31). Myös eri erien ledien ominaisuudet voivat poiketa toisistaan, joten osatilauksen saavuttua tarkastettiin, että moduulit ovat kaikki samaa eräkoodia, joten niiden pitäisi olla ominaisuuksiltaan lähes identtisiä. Prototyypivalaisimen tapauksessa virran epätasaista jakautumista ei koettu haasteeksi, sillä LED-moduulit kiinnitetään alumiiniprofiiliin, joka tasaa lämpötilaeroja. Lisäksi ledejä ajetaan maltillisella virralla.

Moduulien nimellisviraksi on ilmoitettu 700 mA ja maksimivirraksi 1 400 mA (28), mutta yksittäisen ledin datalehteä tutkimalla huomattiin, että Bridgelux ilmoittaa kyseisen ledimallin nimellisvirraksi 60 mA (29). Täten 16 kappaletta kyseisiä ledejä rinnankytkettynä tekee nimellisvirraksi 960 mA. Yksittäisen ledin maksimivirraksi ilmoitetaan 150 mA (29), joten yksittäisen ledin datalehden mukaan laskettuna 16 kappaletta rinnankytkettynä tekee moduulin maksimivirraksi 2 400 mA, moduulin datalehden ilmoittaman 1 400 mA sijaan. Ledien maksimikäyttölämpötila juotospisteestä mitattuna on +85 °C (29).

7.4 Virtalähde

Kytken ja taten myös käyttöjännitteen päättämisen jälkeen päästiin rajaamaan virtalähteitä. Virtalähteeksi vertailtiin hyväksi todettuja Mean Wellin valmistamia vakiovirtalähteitä 150 watin teholuokassa ja n. 24 voltin jännitteellä (taulukko 3). Tähän teholuokkaan päädyttiin, jos valotehoa tarvitaan lisää ja ledejä halutaan ajaa jatkossa suuremmalla virralla.

TAULUKKO 3. Virtalähteiden vertailu

Valmistaja	Malli	Vakiovirran jännitealue	Säädettävä virta-alue	Maksimi-hyötysuhde	Hinta (Digikey)	Lähde
Mean Well	HLG-150H-24AB	12–24 V	3,8–6,3 A	93 %	46,72 €	(32 ja 36.)
Mean Well	XLG-150-24-A	16,8–24 V	3,2–6,3 A	93 %	28,91 €	(33 ja 36.)
Mean Well	ELG-150-24A	12–24 V	3,2–6,25 A	89 %	37,04 €	(34 ja 36.)
Mean Well	CLG-150-24A	18–24 V	3,15–6,3 A	90 %	Ei saatavilla	(35 ja 36.)

Virtalähteen valinnassa päädyttiin XLG-150-24-A-malliin jännite- ja virta-alueiden sopivuuden sekä yhtä hyvän hyötysuhteen takia kuin kalliimmassa HLG-sarjan virtalähteessä.

7.5 Ajastin ja valojakso

Valojaksoisuus eli fotoperiodismi tarkoittaa valon valoisaa ja pimeää ajan erottelua. On olemassa pitkän päivän kasveja, jotka vaativat lyhyet pimeät jaksot kukkiakseen, lyhyen päivän kasveja, jotka vaativat pitkät pimeät jaksot, sekä neutraalit kasvit, joilla ei ole mitään tiettyä fotoperiodismivaatimusta (26). Valaisimeen integroitiin ajastin, johon haluttu valojakso voitiin asettaa langattoman verkkoyhteyden yli.

7.5.1 Ajastin

Ajastimena päädyttiin käyttämään Itead SONOFF POW R2 -moduulia (kuva 18), joka integroitiin valaisimeen ja johon valojakso voitiin asettaa langattoman verkkoyhteyden yli. Ajastin perustuu edulliseen ESP8266-piiriin (37). Moduulilla on myös mahdollista seurata siihen kytketyn laitteen energiankulutusta. Ajastimeen päätettiin asentaa vakion suljetun lähdekoodin laiteohjelmiston tilalle avoimen lähdekoodin laiteohjelmisto.



KUVA 18. Ajastinmoduuli purettuna edestä

7.5.2 Ajastimen laiteohjelmiston päivitys ja konfigurointi

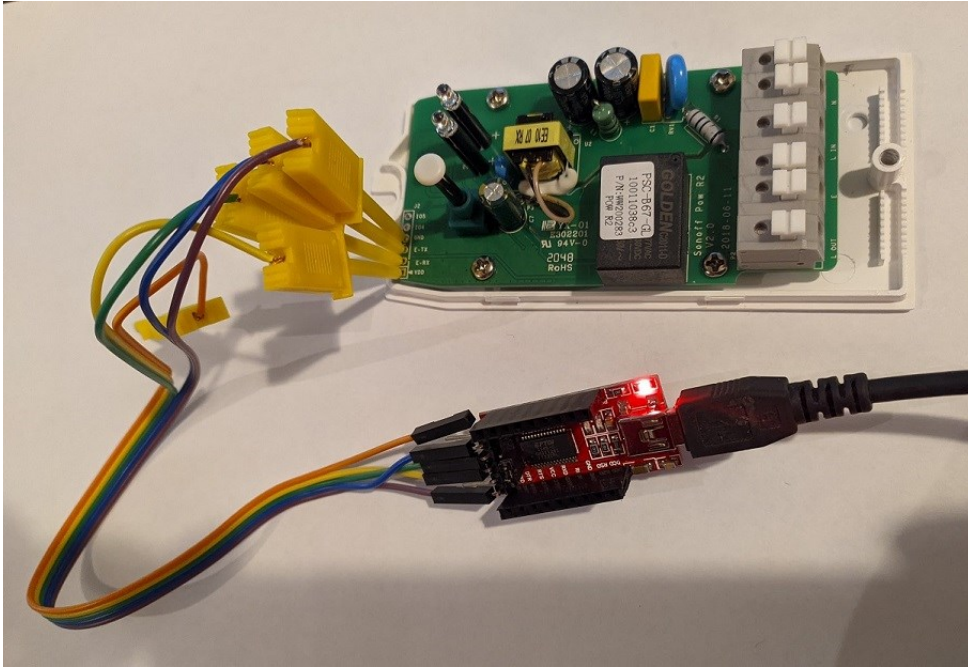
Koska moduuli on kiinalaisen valmistajan sekä käyttää kiinalaista pilvipalvelua sen säätämiseen, sen laiteohjelmisto päätettiin päivittää Tasmota-nimisen projektin avoimen lähdekoodin laiteohjelmistoon (38), joka tässä tapauksessa on Tasmota 9.4.0.2. Moduulilla voidaan myös seurata valaisimen energiankulutusta sekä esimerkiksi tarvittaessa myös ohjata auringon nousu- ja laskuaikojen mukaan. Kyseinen laiteohjelmisto on hyvin joustava mahdollista jatkokehitystä silmällä pitäen.

Moduulin päivitys tapahtui käytännössä avaamalla laite ja tarkistamalla flash-piirin malli, joka tässä tapauksessa on Winbond 25Q32JVSIQ, joka on 32 megabitin eli 4 megatavun flash-muistipiiri (39) merkittynä piirilevylle U4:llä (kuva 19).



KUVA 19. Ajastinmoduulin piirilevy takaa

Tämän jälkeen tietokoneelle, jolla päivitys tulisi tekemään, asennettiin Python sekä FTDI:n ajurit sarjaporttiadapterille. Tämän jälkeen etsittiin sarjaportin sekä tehonsyötön pinnit (GND, +3,3V, TX sekä RX) moduulista. Moduuli kytkettiin testikoukuilla varustetuilla kaapeleilla FTDI FT232RL -piiriin perustuvaan USB-sarjaporttiadapteriin (kuva 20) ja katsottiin laitehallinnasta laitteen COM-portin numero, joka tässä tapauksessa oli COM10.



KUVA 20. Moduulin yhdistäminen FTDI FT232RL -piiriin pohjautuvaan USB-sarjaporttiadapteriin

Tämän jälkeen moduuli päivitettiin käyttäen Pythonilla ohjelmoitua Esptool-nimistä sovellusta (40). Moduulin vakiolaiteohjelmistosta otetiin tämän jälkeen varmuuskopio ja laitteen flash-piiri tyhjennettiin. Tämän jälkeen Tasmota 9.4.0.2 -laiteohjelmisto kirjoitettiin laitteeseen käyttäen Esptool-sovellusta.

Komennot:

Vakiolaiteohjelmiston varmuuskopiointi fwbackup.bin -tiedostoon:

```
esptool.py --port COM10 read_flash 0x00000 0x400000 fwbackup.bin
```

Flash-piirin tyhjennys:

```
esptool.py --port COM10 erase_flash
```

Tasmota-laiteohjelmiston kirjoitus tasmota.bin-tiedostosta:

```
esptool.py --port COM10 write_flash -fs 4MB -fm dout 0x0 tasmota.bin
```

```
Command Prompt
C:\Users\Fujitsu\Desktop\esptool-master>esptool.py --port COM10 read_flash 0x00000 0x100000 fwbackup.bin
esptool.py v3.1-dev
Serial port COM10
Connecting...
Detecting chip type... ESP8266
Chip is ESP8266EX
Features: WiFi
Crystal is 26MHz
MAC: 84:cc:a8:aa:c9:31
Uploading stub...
Running stub...
Stub running...
1048576 (100 %)
1048576 (100 %)
Read 1048576 bytes at 0x0 in 98.6 seconds (85.1 kbit/s)...
Hard resetting via RTS pin...

C:\Users\Fujitsu\Desktop\esptool-master>esptool.py --port COM10 erase_flash
esptool.py v3.1-dev
Serial port COM10
Connecting...
Detecting chip type... ESP8266
Chip is ESP8266EX
Features: WiFi
Crystal is 26MHz
MAC: 84:cc:a8:aa:c9:31
Stub is already running. No upload is necessary.
Erasing flash (this may take a while)...
Chip erase completed successfully in 7.1s
Hard resetting via RTS pin...

C:\Users\Fujitsu\Desktop\esptool-master>esptool.py --port COM10 write_flash -fs 4MB -fm dout 0x0 tasmota.bin
esptool.py v3.1-dev
Serial port COM10
Connecting...
Detecting chip type... ESP8266
Chip is ESP8266EX
Features: WiFi
Crystal is 26MHz
MAC: 84:cc:a8:aa:c9:31
Stub is already running. No upload is necessary.
Configuring flash size...
Flash will be erased from 0x00000000 to 0x00095fff...
Flash params set to 0x0340
Compressed 613952 bytes to 438395...
Wrote 613952 bytes (438395 compressed) at 0x00000000 in 39.1 seconds (effective 125.6 kbit/s)...
Hash of data verified.

Leaving...
Hard resetting via RTS pin...

C:\Users\Fujitsu\Desktop\esptool-master>
```

KUVA 21. Laiteohjelmiston varmuuskopiointi, flash-piirin tyhjennys sekä uuden laiteohjelmiston päivitys

Tämän jälkeen laite käynnistyy uudelleen ja luo itsenäisen avoimen WiFi-tukiaseman, johon yhdistämällä voi oman WiFi-verkon tunnukset asettaa laitteeseen. Tämän jälkeen moduuli yhdistää asetettuun WiFi-verkkoon ja sitä voidaan alkaa käyttämään ja konfiguroimaan selaimella. Etusivulla nähdään tämänhetkinen käyttöjännite, virta, teho, näennäisteho, reaktiivinen teho, tehokerroin, kuluneen vuorokauden energiankulutus, edellisen päivän energiankulutus sekä kokonaisenergiankulutus (kuva 22). Tässä tapauksessa oleelliset asetukset olivat aikavyöhykkeen asetus sekä ajastetun käynnistämisen ja sammutuksen asettaminen. Lisäksi ajastimeen päätettiin asettaa käyttökaupungin koordinaatit, jolloin ajastin pystyy laskemaan auringon nousu- ja laskuajat.

Sonoff Pow R2

Tasmota

Voltage	233 V
Current	0.412 A
Power	91 W
Apparent Power	96 VA
Reactive Power	32 VAr
Power Factor	0.94
Energy Today	0.886 kWh
Energy Yesterday	0.000 kWh
Energy Total	0.886 kWh

ON

Toggle

Configuration

Information

Firmware Upgrade

Console

Restart

Tasmota 9.4.0.2 by Theo Arends

KUVA 22. Tasmota-laiteohjelmistolla päivitetyn moduulin päänäkyä selaimessa

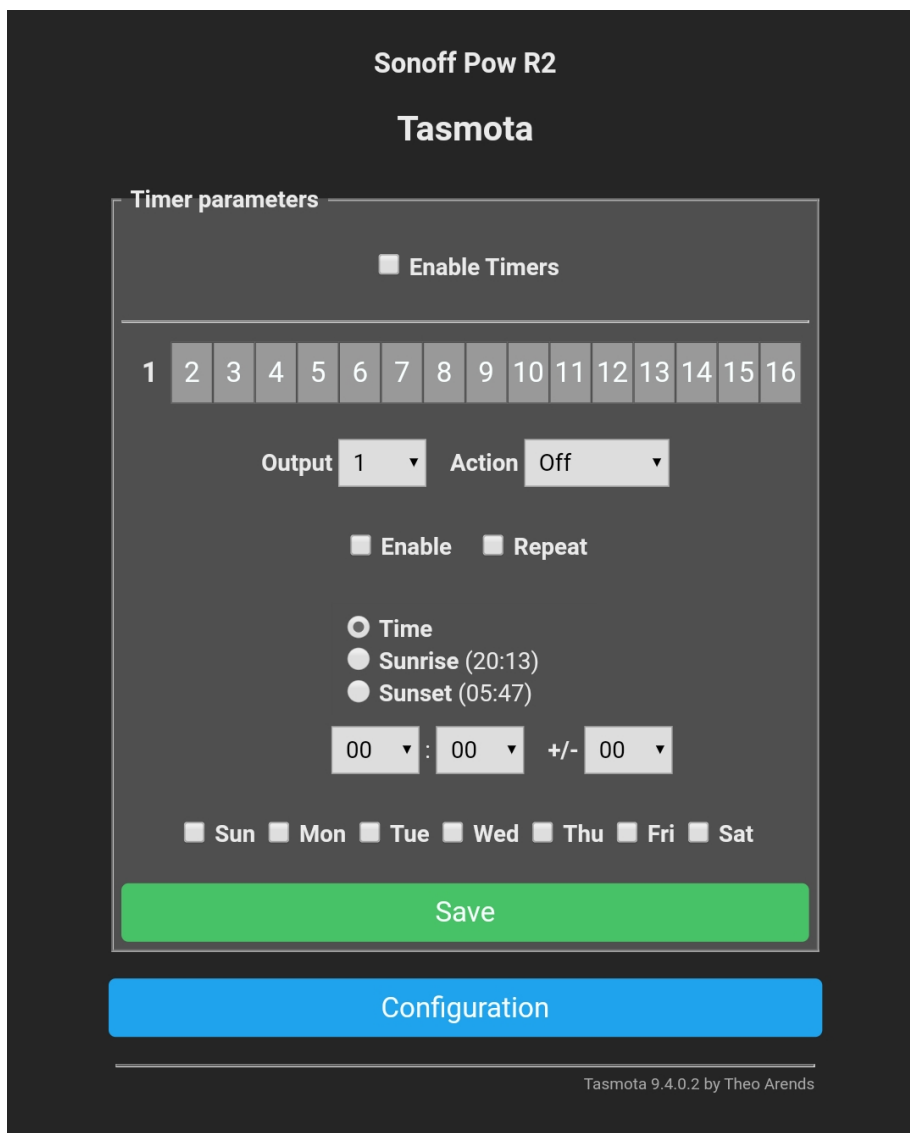
Tasmota konsolin komennot:

Aikavyöhykkeen määrittäminen Suomen kesäaikaan: **Timezone +3**

Leveysasteen määrittäminen: **Latitude 65.012615**

Pituusasteen määrittäminen: **Longitude 25.471453**

Nyt moduuliin voitiin asettaa haluttu valojakso ja tarvittaessa myös valaisimen sammutus energi-
ansäästön vuoksi niihin aikoihin, kun auringonvalo on tyypillisesti riittävää ja lisävalaistusta ei tar-
vita (kuva 23). Tässä tapauksessa valojaksoksi kuitenkin tyydyttiin asettamaan aluksi kiinteä 16
tuntia valoa ja 8 tuntia pimeyttä. Valaisimen valojaksotus pystytään myös manuaalisesti ohittamaan
moduulissa olevan kytkimen avulla. Tämä oli myös yksi tilaajan vaatimuksista, sillä hän halusi tar-
vittaessa saada sammutettua valon, jos kokisi valon häiritseväksi esimerkiksi unen saannin kan-
nalta.



KUVA 23. Ajastimien asetusnäkyvä

7.6 Hyötysuhde ja fotosynteettinen fotonitehokkuus

Valaisimen hyötysuhde koostuu pääasiassa virtalähteen hyötysuhteesta ja LED-moduulien fotosynteettisistä fotonitehokkuuksista sekä ajastimen energiankulutuksesta. Myös johdoista syntyy häviötä, mutta tässä tapauksessa ne koettiin niin marginaalisiksi, ettei niitä otettu huomioon.

7.6.1 Virtalähteen hyötysuhde

Sähköinen virtalähteen hyötysuhde paranee, mitä suuremmalla teholla sitä käytetään. Mean Well XLG-150-24-A:n hyötysuhde on jopa 93 %, kun käytetään 230 V:n syöttöjännitettä ja 100 %:n kuormaa. Hyötysuhde laskee 230 V:n käyttöjännitteellä ja 50 %:n kuormalla noin 90 prosenttiin. Tämän virtalähteen hyötysuhde on parhaimmillaan lähellä maksimikuormitusta (33).

7.6.2 LED-moduulien fotosynteettinen fotonitehokkuus

Ajettaessa LED-moduuleita nimellisvirralla (700 mA) ja tyypillisellä jännitteellä (19,5 V), eli 13,65 watin teholla, niiden valovirta on tyypillisesti 2 390 lm (28). Bridgeluxin toimittaman laskurin mukaan tästä voidaan laskea fotosynteettinen fotonitehokkuus käyttäen kerrointa 0,0146 $\mu\text{mol/s/lm}$ (41). Täten $2\,390\text{ lm} * 0,0146\ \mu\text{mol/s/lm} = 34,894\ \mu\text{mol/s}$, joten jakamalla tämä teholla saadaan tulokseksi 2,5563 $\mu\text{mol/J}$ ($34,894\ \mu\text{mol/s} / 13,65\text{ W}$). Vastaavat fotosynteettiset fotonitehokkuudet ovat 12,32 W:n teholla (640 mA) 2,6545 $\mu\text{mol/J}$ ja 19,49 W:n teholla (960 mA) 2,4333 $\mu\text{mol/J}$. Ledien hyötysuhde siis tyypillisesti kasvaa, mitä pienemmällä virralla niitä ajetaan.

7.6.3 Kokonaishyötysuhde ja fotosynteettinen fotonitehokkuus

Ajettaessa kuutta LED-moduulia datalehden ilmoittamalla nimellisvirralla, eli 700 mA moduulia kohden, tulee kokonaisvirraksi 4,2 A. Tällä virralla valmistaja ilmoittaa tyypilliseksi jännitteeksi 19,5 V (28), joten tehoksi tulee 81,9 wattia. Virtalähteen hyötysuhdekuvaajaa tulkitsemalla 81,9 W tehopisteen kohdalta, eli 54,6 % maksimitehosta, datalehden ilmoittama tyypillinen hyötysuhde virtalähteelle on noin 91 % (33). Edellisten laskujen mukaan ledien fotosynteettiseksi fotonitehokkuudeksi tällä virralla saadaan siis 2,5563 $\mu\text{mol/J}$ ja virtalähteen hyötysuhteeksi n. 91 %. Näin ollen PPE-arvoksi virtalähteineen, 700 mA virralla LED-moduulia kohti, saadaan $0,91 * 2,5563\ \mu\text{mol/J} = 2,3262\ \mu\text{mol/J}$.

8 VALAISIMEN TOTEUTUS

8.1 Osien hankkiminen sekä hinnat

Virtalähde sekä LED-moduulit päätettiin tilata yhdysvaltalaiselta Digi-Key Electronicsilta. Yksi ylimääräinen LED-moduuli päätettiin ottaa mukaan tilaukseen mahdollisen rikkoontumisen varalta. Koska tuotteet lähetettiin EU:n ulkopuolelta, ostohinnan lisäksi tuli tuotteista maksaa tullauksen yhteydessä arvonlisävero. Ajastin tilattiin Aliexpress-verkkokaupasta kiinalaiselta myyjältä. Tämän arvo oli niin alhainen, että arvonlisäveroa ei tarvinnut maksaa. Loput osista otettiin omasta varastosta tai hankittiin paikallisesti ja näihin kului arviolta 20 € (taulukko 4).

TAULUKKO 4. Osien valmistajat, mallit, toimittajat ja hinnat

Osa	Valmistaja	Malli	Toimittaja	Hinta (€)
LED-moduulit, 7 kpl	Bridgelux	BXEB-L0560Z-30E2000-C-B3	Digi-key	28,77 + ALV 6,90
Virtalähde	Mean Well	XLG-150-24-A	Digi-key	28,91 + ALV 6,93
Ajastin	Itead	SONOFF POW R2	Aliexpress	12,31
Alumiiniprofiili, 2 kpl	-	25 x 25 mm x 3 m	Oulun metallipalvelu	10,00
Johdot	-	-	SP-Elektroniikka, Puuilo	5,70
Jakorasia	Etman	IP65 75x75	Puuilo	2,50
Holkkitiiviste, 4 kpl	Harju	M16 5-10	Puuilo	3,30
Muut tarvikkeet n.	-	-	Useita	20,00
Yhteensä				125,32



KUVA 24. LED-moduulit ja yksi varakappale sekä virtalähde

8.2 Valaisimen rakentaminen

Virtalähteen ja LED-moduulien saavuttua sekä kaapelien ostamisen jälkeen valaisinta päätettiin testata pikaisesti osat irrallaan, kytkemällä kuusi moduulia rinnan virtalähteen ulostuloon käyttäen ns. Wago-tyyppisiä vipupikaliittimiä, kytkemällä virtalähteen syöttöön pistotulpallinen kaapeli sekä kytkemällä tämä pistorasiaan (kuva 25).



KUVA 25. Virtalähteen ja LED-moduulien ensimmäinen testikäynnistys

Kun todettiin, että kaikki vaikuttaisi toimivan, ryhdyttiin säätämään virtalähteen virta-asetusta ja testaamaan sen ääripäät. Minimiasetuksella valaisimen ottoteho oli n. 54 wattia ja maksimiasetuksella taas 164 wattia.

8.2.1 Runko

Runko tehtiin käytettynä ostetusta 25 x 25 mm:n alumiiniprofiilista, jonka yhdellä sivulla on hahlo. Alumiiniprofiilit katkaistiin 175 cm:n mittaisiksi ja LED-moduulien kiinnittämiseksi profiileihin porattiin 2,5 mm:n terällä reiät ja tehtiin näihin reikiin kierretapilla M3-kierteet. Lisäksi tankoihin porattiin reiät LED-moduulien johtoja varten ja painettiin näihin läpivientikumit johtojen vaurioitumisen ehkäisemiseksi. Alumiiniprofiilien päälle tehtiin kierteet virtalähteen kiinnitystä varten tankojen keskiosaan sekä jakorasialle tästä hieman sivuun. Tankojen päihin tehtiin kierteet ja näihin kierrettiin kiinnityslenkit. Tangot kiinnitettiin toisiinsa poraamalla reiät kierretangolle ja yhdistämällä alumiiniprofiilit käyttäen M6-kierretankoa, muttereita sekä käyttäen väliholkkeina 35 mm pitkiä alumiiniputkia. Johtojen kytkemisen jälkeen alumiiniprofiilien päihin painettiin muoviset päätytulpat ja myös kierretankojen reiät peitettiin tulpilla. Runko ripustettiin käyttäen nylonnarua.

8.2.2 Elektroniikka

KytKentä oli seuraavan kaltainen: pistotulppa – 3 m pitkä kolmijohtiminen kaapeli – jatkoliitin – kaapeli ajastimelle – ajastin – virtalähde – virtalähteen ulostulon haaroitus jakorasiasa kuudelle LED-moduulille. LED-moduulit kiinnitettiin runkoon käyttäen piitahnaa rungon ja moduulien välissä lämmönjohtuvuuden parantamiseksi ja moduulit kiinnitettiin käyttäen M3-pultteja sekä aluslevyjä. Ajastin kiinnitettiin kaksipuolisella teipillä rungon päälle. Jakorasialle vedettiin johdot jokaiselta LED-moduulilta ja kytkettiin nämä virtalähteen ulostuloon. Jakorasiasa hyödynnettiin myös verkkojohdon kytkennässä. Johdot kytkettiin ns. Wago-tyyppisillä vipuliittimillä.

9 TESTAUS JA TULOKSET

Valaisinta testattiin kylpyhuoneessa, johon ei pääse ulkoista valoa ja jonka omia valaisimia ei testijakson aikana käytetty (kuvat 26 ja 27). Lämpötilamittaukset ja vertailukasvatusjakso toteutettiin kyseisessä tilassa. Ensimmäinen vertailuryhmä oli lampun alla kasvatettavat yksilöt. Toinen vertailuryhmä oli pimeässä kaapissa kasvatettava ryhmä. Kolmas ryhmä oli huoneiston hämärässä tilassa kasvatettava ryhmä. Neljäs vertailuryhmä oli etelänpuoleisen ikkunan ikkunalaudalla, joka touko-kesäkuun aikana tehtävässä vertailussa saa varsin hyvin luonnollista valoa.



KUVA 26. Valaisin testikäytössä kuvattuna yläviistosta



KUVA 27. Valaisin testikäytössä kuvattuna alaviistosta

9.1 Pintalämpötilat

Valaisimen pintojen lämpötilat mitattiin infrapunalämpötilamittarilla 25,0 °C:n lämpötilassa, 91 W:n ottoteholla ja 9½ tunnin päällä olon jälkeen (taulukko 5). Pintalämpötilat olivat komponenttien vaatimien raja-arvojen sisällä sekä alittavat IEC/EN 62368-1-tuoteturvallisuustandardin TS1-luokituksen 70 °C:n hetkellisesti kosketeltavien pintojen maksimilämpötilan (30, s. 169), mikä ei vaadi min-käänlaista kosketussuojausta tai varoitusta kuumista pinnoista.

TAULUKKO 5. Valaisimen pintalämpötilat 91 W:n ottoteholla

Osa	Lämpötila (°C)		
Virtalähteen pinta	44,5		
Ajastimen pinta	35,7		
Ulompi alumiiniprofiili	Vasen reuna 35,5	Keskiosa 38,6	Oikea reuna 35,9
Sisempi alumiiniprofiili	Vasen reuna 35,9	Keskiosa 39,0	Oikea reuna 35,8
Ulommat LED-moduulit	Vasen (1) 38,9	Keski (2) 43,9	Oikea (3) 39,8
Sisemmät LED-moduulit	Vasen (4) 39,6	Keski (5) 44,0	Oikea (6) 39,8

Edellisen mittauksen lisäksi pintojen lämpötilat mitattiin virran maksimiasetuksella 165 W:n ottoteholla ja 16 tunnin päällä olon jälkeen 25,9 °C:n lämpötilassa (taulukko 6). Myös tässä tapauksessa lämpötilat olivat komponenttivalmistajien asettamien raja-arvojen sisällä sekä alittavat IEC/EN 62368-1 TS1-luokituksen (30, s. 169) maksimilämpötilan.

TAULUKKO 6. Valaisimen pintalämpötilat 165 W:n ottoteholla

Osa	Lämpötila (°C)		
Virtalähteen pinta	61,0		
Ajastimen pinta	39,6		
Ulompi alumiiniprofiili	Vasen reuna 44,7	Keskiosa 50,3	Oikea reuna 46,1
Sisempi alumiiniprofiili	Vasen reuna 45,4	Keskiosa 51,5	Oikea reuna 46,1
Ulommat LED-moduulit	Vasen (1) 53,2	Keski (2) 60,9	Oikea (3) 52,0
Sisemmät LED-moduulit	Vasen (4) 53,0	Keski (5) 58,0	Oikea (6) 51,0

Valmistajan ilmoittama maksimilämpötila LED-moduuleille on 85 °C ja tämä alittui mittauksissa reilusti. Virtalähteen kotelon maksimilämpötilaksi valmistaja ilmoittaa 90 °C ja lisäksi täyden 100 000 tunnin kestoajan, mikäli kotelon lämpötila on alle 65 °C. Ajastimelle valmistaja ilmoittaa ainoastaan käyttöympäristön maksimilämpötilan, joka on 40 °C.

Edellisten mittausten perusteella voidaan siis todeta, että LED-moduuleja voidaan myös yliajaa 700 mA:n nimellisvirtaa suuremmalla virralla ilman minkään komponentin lämpenemistä liian kuumaksi. Virtalähteestä saatiin 7,45 A maksimivirta, joka kuudelle LED-moduulille jakautuneena tekee 1 242 mA moduulia kohden.

9.2 Virtalähteen mitattu hyötysuhde

Virtalähde säädettiin 4,225 A:n virralle (eli n. 704 mA moduulia kohden). Tällöin LED-moduulien käyttöjännite oli 19,40 V ja täten virtalähteen antotehona oli n. 82,0 W. Pistorasiasta valaisin otti 91,3 W ja ajastimen tehonkulutukseksi mitattiin 0,6 W, joten ajastimen kulutus vähennettynä tehonkulutus oli 90,7 W. Täten virtalähteen hyötysuhde oli n. 90,4 %.

Tämän lisäksi virtalähde säädettiin maksimivirralla ja toistettiin mittaukset. Maksimivirraksi mitattiin 7,45 A (eli n. 1 241 mA moduulia kohti) käyttöjännitteen ollessa 20,05 V ja täten antotehona 149,4 W. Pistorasiasta valaisin otti 165,2 W eli ajastimen kulutus vähennettynä 164,6 W, joten virtalähteen hyötysuhde maksimivirralla oli n. 90,7 %. Näin ollen valaisimen virtalähteen hyötysuhde oli kummassakin tapauksessa lähellä luvattua hyötysuhdetta.

9.3 Valon intensiteetti

Valon suhteellinen intensiteetti mitattiin 91 W:n ottoteolla 20 cm:n etäisyydeltä ledeistä käyttäen Xiaomi Redmi Note 7 -matkapuhelinta ja sen valosensoria. Puhelinten valosensorien absoluuttinen tarkkuus on hyvin vaihtelevaa (42), joten kyseinen mittaus on vain suuntaa antava vertailumittaus. Mittaukset tehtiin valaisimen keskikohdasta sekä LED-moduulien keskikohdista, pituussuunnassa LED-moduulien väleistä, valaisimen päätyjen viimeisten ledien kohdalta 10 cm valaisimen ulkoreunoilta ulospäin sivuun siirrettynä, jotta valokuvion muotoa voidaan hahmottaa (taulukko 7).

TAULUKKO 7. Valon intensiteettimittaukset lukseina 20 cm:n etäisyydellä valaisimesta. Suoraan alaisimen alta mitatut tulokset lihavoituna

		9 000		12 500		10 500		
2 700	9 600	19 800	18 800	19 800	19 900	18 700	9 700	2 400
		12 300		12 600		12 300		

9.4 Toimivuus keinovalona

Tuloksia varten päätettiin idättää paprikan (*Capsicum annuum*) sekä vihanneskrassin (*Lepidium sativum*) siemeniä ja kasvattaa näitä erilaisissa valo-olosuhteissa. Paprikan siemenet laitettiin itämään märän talouspaperin väliin 10.5.2021 sekä vihanneskrassin siemenet 12.5.2021. Kummatkin lajeista istutettiin 14.5.2021 kahteentoista eri ruukkuun ja jaettiin neljään eri vertailuryhmään, joista kukin sijoitettiin erilaisiin valaistusolosuhteisiin ja merkittiin tarroilla P tarkoittaen paprikaa, K krassia ja numero tämän jälkeen järjestyslukua.

Ensimmäinen ryhmä (K1, K2, K3, P1, P2 ja P3) sijoitettiin valaisimen alle ja valaisin säädettiin 20 cm:n korkeudelle kasveista. Toinen ryhmä (K4, K5, K6, P4, P5 ja P6) sijoitettiin pimeään kaappiin. Kolmas ryhmä (K7, K8, K9, P7, P8 ja P9) sijoitettiin huoneen hämärään osaan. Neljäs ryhmä (K10, K11, K12, P10, P11 ja P12) sijoitettiin etelän puoleisen ikkunan ikkunalaudalle, missä kasvit saivat päivän aikana myös suoraa auringonvaloa.

Vertailuryhmien valon intensiteettimittaukset suoritettiin auringonpaisteen aikaan. Huippuintensiteetin eri ryhmillä:

Valaisimen alla: 21 800 lx

Pimeässä: 0 lx

Hämärässä: 65 lx

Auringonvalossa: 32 800 lx

Lämpötilat mitattiin valoisana aikana eri vertailukohteissa, missä huomattiin valaisimen alla olevan kohteen olevan hieman muita kohteita lämpimämpi. Valaisimen alla päivälämpötila mittauspäivänä oli n. 27 °C, muiden kohteiden ollessa päivälämpötiloiltaan noin 24 °C. Mullan kosteutta pyrittiin

yhtenäistämään kastelemalla ruukut niin, että kuuden ruukun yhteispaino asettui n. 1,4 kg:aan. Eri vertailuryhmien tarvitsema veden määrä vaihteli ja hämärässä olevat yksilöt tarvitsivat vähemmän kastelua painon saavuttamiseksi kastelukertojen välillä.

Kuvat kasveista ovat 5. päivän (kuva 28), 11. päivän (kuva 29), 22. päivän (kuva 30), 28. päivän (kuva 31) sekä 34. päivän (kuva 32) kuluttua istutuksesta otettuja. Kuvissa ovat vertailuryhmät 1–4. Kuvien järjestyksenä on seuraava; vasemmalla ylhäällä, ensimmäinen ryhmä, valaisimen alla kasvaneet yksilöt. Vasemmalla alhaalla, toinen ryhmä, pimeässä kasvaneet yksilöt. Oikealla ylhäällä, kolmas ryhmä, hämärässä kasvaneet yksilöt. Oikealla alhaalla, neljäs ryhmä, ikkunalaudalla kasvaneet yksilöt.



KUVA 28. Tilanne 19.5.2021, 5 päivää istutuksesta



KUVA 29. Tilanne 25.5.2021, 11 päivää istutuksesta



KUVA 30. Tilanne 5.6.2021, 22 päivää istutuksesta



KUVA 31. Tilanne 11.6.2021, 28 päivää istutuksesta



KUVA 32. Tilanne 17.6.2021, 34 päivää istutuksesta

10 TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Eri valaistusolosuhteiden ryhmiä vertailtaessa 11. kasvupäivän kohdalla huomattiin, että pimeässä (ryhmä 2) ja asunnon hämärässä osassa (ryhmä 3) kasvaneet yksilöt olivat kasvaneet huomattavasti pituutta, mutta olivat hyvin pienilehtisiä sekä väritään vaaleankeltaisia. Pituuskasvun syynä on kasvien pyrkimys kasvaa pituutta saadessaan riittämättömän määrän valoa. Keltainen väri johtuu valon vähyydestä sekä tästä johtuvasta klorofyllien rajoittuneesta muodostumisesta.

Ikkunalaudalla (ryhmä 4) ja valaisimen alla (ryhmä 1) pituuskasvu oli maltillisempaa, kasvit olivat tuuheampia ja lehtien koko suurempi sekä lehtien väri vihreä. Keinovalon alla olleet yksilöt olivat kasvattaneet kaikista ryhmistä suurimmat lehdet.

Vertailtaessa ryhmiä 22. kasvupäivän kohdalla huomattiin, että valaisimen alla olevat (ryhmä 1) vihanneskrassiyksilöt olivat aloittaneet kukintansa ja olivat näin pisimmällä elinkaarensa osalta. Vihanneskrassi oli kukkinut ja alkanut lakastumaan ja kuivumaan 34. kasvupäivän kohdalla, mihin kasvatustesti päätettiin lopettaa. Myös ikkunalaudalla oleva 4. ryhmä oli kasvanut hyvin, mutta vihanneskrassi ei ollut aloittanut kukintaansa.

Tarkastellessa näitä tuloksia voidaan siis päätellä, että valaisimen teho ja valon laatu riittää kasvattamaan vihanneskrassia sekä paprikaa täysin ilman luonnollista auringonvaloa. Kasvua tarkasteltaessa vaikuttaa myös, että valo nopeuttaa vihanneskrassin kehitystä verrattaessa tätä luonnolliseen touko-heinäkuun auringonvaloon. Valon punaiselle aallonpituusalueelle painottuva spektri sekä senhetkistä luonnollista auringonvaloa lyhyempi valojakso epäiltiin olevan syynä nopeampaan kehitykseen valaisimen alla. Myös muita vertailuryhmiä korkeammalla lämpötilalla oli mahdollisesti vaikutusta asiaan. Näin voidaan siis päätellä, että pelkän valaisimen valon riittäessä testiryhmän kasveille talviaikaiseen lisävalaistukseen tarkoitettu valaisin tulee olemaan myös tähän käyttöön riittävä. Vertailukasvatuskoe suoritettiin 91 watin ottoteholla, mutta valaisinta voidaan ajaa tarvittaessa myös suuremmalla teholla, jos jatkossa kasville halutaan tulevaisuudessa enemmän valoa.

11 YHTEENVETO

Työn aiheena oli suunnitella ja toteuttaa LED-kasvivalaisin tilaajan tarpeisiin. Valaisimen komponenttien valintakriteerien määrittelemiseksi perehdyttiin kasvien keinovalaistuksen historiaan, tutustuttiin saatavilla oleviin komponentteihin, näiden hintatasoon, hyötysuhteeseen ja fotosynteesiin soveltuvuuteen. Komponenttivalintojen vahvistuttua hankittiin osat prototyyppivalaisimen rakentamista varten. Ajastimena päädyttiin käyttämään tehomittauksella varustettua WiFi-relettä, jonka laiteohjelmisto vaihdettiin avoimen lähdekoodin Tasmota-projektin laiteohjelmistoon sekä konfigurointiin tämä sopivalle valojaksolle WiFi-yhteyden yli. Prototyyppivalaisimen käyttölämpötilat mitattiin eri syöttötehoilla ja todettiin lämpötilojen olevan varsin maltilliset myös yliajaessa LED-moduuleita yli valmistajan suosittaman 700 mA:n virralla. Valaisimen käytännön toimivuus päätettiin testata istuttamalla vihanneskrassia sekä paprikaa neljään eri vertailuryhmään, jossa jokainen ryhmä oli erilaisissa valaistusolosuhteissa. Valaisimen alla olevien kasvien testikasvatusjakso tehtiin pimenetyssä tilassa, johon ei pääse ulkopuolista valoa, vaan ainut valo kasveille saadaan valaisimesta. Testijakson aikana huomattiin kasvien menestyvän valaisimen alla hyvin ja lisävalaistukseen tarkoitettu valaisin riitti kasvattamaan vihanneskrassin sekä paprikan taimia hyvällä menestyksellä.

Valaisin todettiin toimivaksi laitteeksi lisävalaistukseen, sillä sen teho riitti testiryhmän kasveille ilman luonnollista valoa. Vihanneskrassin kehitys oli myös nopeampaa valaisimen alla (ryhmä 1) verrattaessa tätä luonnollista auringonvaloa saaneisiin yksilöihin (ryhmä 4). Pimeässä (ryhmä 2) ja hämärässä (ryhmä 3) kasvit menestyivät huonosti.

Työn aikana ilmennyt jatkokehitysidea valaisimelle oli sensorien lisääminen ajastimeen, sillä avoin laiteohjelmisto on hyvin joustava. Esimerkiksi valosensori voidaan lisätä ajastimen GPIO-pinneihin luonnollisen valon määrän havaitsemiseksi ja valaisimen sammuttamiseksi energian säästämiseksi, kun luonnollista valoa saadaan riittävästi.

Haluan lisäksi kiittää seuraavia henkilöitä, jotka ovat olleet mukanani tehdessäni tätä opinnäytetyötä: Kiitokset ohjaajalleni Jaakko Kaskelle opinnäytetyöni joustavasta ohjauksesta, Tuula Hopeavuorelle kielellisestä sekä muotoilullisesta ohjeistuksesta, Juha-Petteri Hyyryläiselle autotallinsa ti-

lojen ja työkalujen käyttömahdollisuudesta, lina Komulaiselle henkisestä tuesta, valaisimen vaatimusten määrittelystä sekä asiantuntija-avusta opinnäytetyöni biologian ja biokemian osa-alueissa sekä Jukka Jauhiaiselle työn arvioinnista lyhyellä varoitusaajalla.

LÄHDELUETTELO

1. Helsingin yliopiston ilmakehätieteiden keskus INAR – Simosol Oy – Jaskara, M. – Haapoja, T. 2021. Auringon säteily. Hiilipuu. Saatavissa: <http://www.hiilipuu.fi/fi/artikkelit/auringon-%C3%A4teily>. Hakupäivä 26.3.2021.
2. Fondriest Environmental, Inc. 2014. Solar Radiation & Photosynthetically Active Radiation. Saatavissa <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/weather/photosynthetically-active-radiation/>. Hakupäivä 24.4.2021.
3. Arkkitehtuuritoimisto Kimmo Lylykangas Oy. 2014. Aurinkotonttien asemakaavoitus Oulussa. Suunnitteluohje 2014. Oulun kaupunki, ympäristö- ja yhdyskuntapalvelut. Saatavissa: <https://www.ouka.fi/documents/486338/c8718652-2f04-491f-8638-b98a2380343b>. Hakupäivä 26.3.2021.
4. European Commission. 2019. Photovoltaic Geographical Information System. Saatavissa: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html. Hakupäivä 26.3.2021.
5. Nederhoff, E., Marcelis, L. F. M. 2010. Calculating light & lighting. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/46386501_Calculating_light_lighting. Hakupäivä 26.3.2021.
6. Torres, A. P., Lopez, R., G. 2021. Commercial Greenhouse Production. Measuring Daily Light Integral in a Greenhouse. Purdue Extension HO-000-W. Purdue University. Saatavissa: <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/HO/HO-238-W.pdf>. Hakupäivä 31.3.2021.
7. National Geographic. 2021. Photosynthesis. Saatavissa: <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/photosynthesis/>. Hakupäivä 24.3.2021.
8. Tirri, R., Lehtonen, J., Lemmetyinen, R., Pihakaski, S., Portin, P. 2013. Biologian Sanakirja Uudistetun laitoksen 4. painos. Otava.
9. Rubio, A. 2015. The true color of chlorophyll. Saatavissa: <https://www.mpsd.mpg.de/17628/2015-04-chlorophyll-rubio>. Hakupäivä 24.3.2021.
10. Mini Physics. 2016. The Electromagnetic Spectrum. Saatavissa: https://www.miniphysics.com/electromagnetic-spectrum_25.html. Hakupäivä 26.3.2021.
11. Sliney, D. 2016. What is light? The visible spectrum and beyond. Saatavissa: <https://doi.org/10.1038/eye.2015.252>. Hakupäivä 8.8.2021
12. Carruthers, T. J. B., Aioi, K. 2001. Measurement of light penetration in relation to seagrass. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/photosynthetically-active-radiation>. Hakupäivä 27.3.2021.

13. McCree, K. J. 2018. McCree - Action Spectrum. Saatavissa: <https://hortione.com/2018/10/mccree-photosynthesis-action-curve/>. Hakupäivä 24.3.2021.
14. LCW. 2021. LED Grow Light Buyer's Guide. Saatavissa: https://chilledgrowlights.com/education/led_buyers_guide. Hakupäivä 27.3.2021.
15. Fluence By OSRAM. 2021. About PAR, PPF, And PPF. Saatavissa: <https://fluence.science/science-articles/horticulture-lighting-metrics/>. Hakupäivä 27.3.2021.
16. EconoLux Industries Ltd. 2021. The McCree Curve Explained. Saatavissa: <http://econoluxindustries.com/McCree-curve.html>. Hakupäivä 24.4.2021
17. ShineRetrofits.com. 2014. A Brief History of LED Lighting. Saatavissa: <https://www.shineretrofits.com/knowledge-base/lighting-learning-center/a-brief-history-of-led-lighting.html>. Hakupäivä 26.3.2021.
18. Nakamura, Y. 2019. A Deep Tour on LED Phosphor Part I: What is LED Phosphor?. Saatavissa: <https://www.yujiintl.com/blogs/a-deep-tour-on-led-phosphor-part-i:-what-is-led-phosphor.html>. Hakupäivä 7.4.2021.
19. Papillon Holland. 2018. A Brief History of (Grow)Lights. Saatavissa: <https://www.papillonholland.com/papillon-knowledge-center/a-brief-history-of-growlights/>. Hakupäivä 17.4.2021.
20. Carnivero. 2021. Light Sources. Saatavissa: <https://www.carnivero.com/pages/light-sources>. Hakupäivä 17.4.2021.
21. Sager J. C., Wheeler, R. M. 2012. 2012 International Meeting on Controlled Environment Agriculture, Session 2 Plasma Lighting For Crop Production. Saatavissa: https://www.controlledenvironments.org/wp-content/uploads/sites/6/2017/06/ceug_programme-2012.pdf. Hakupäivä 17.4.2021.
22. Senerty Lighting Co.,Ltd. 2016. Plasma Grow Lamp. Saatavissa: <http://www.senerty.com/?Product57/Product232/Product242/283.html>. Hakupäivä 24.4.2021.
23. Steven. 2020. Why Are Grow Lights Purple? (And Are "Blurple" LEDs Effective?). Saatavissa: <https://growlightinfo.com/why-are-grow-lights-purple/>. Hakupäivä 25.4.2021.
24. Ptushenko V.V., Avercheva O.V., Bassarskaya E.M., Berkovich Yu.A., Erokhin A.N., Smolyanina S.O., Zhigalova T.V. 2015. Possible reasons of a decline in growth of Chinese cabbage under a combined narrowband red and blue light in comparison with illumination by high-pressure sodium lamp. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304423815301400>. Hakupäivä 26.4.2021
25. Kaukoranta, T., Jokinen, K., Näkkilä, J., Särkkä, L. 2017. LED-valotusta kasvihuoneeseen. Saatavissa: https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/538474/luke-luobio_13_2017.pdf. Hakupäivä 4.5.2021.

26. Fluence By OSRAM. 2021. Guide To Photo-Morphogenesis. Saatavissa: <https://fluence.science/science-articles/guide-to-photo-morphogenesis/>. Hakupäivä 25.4.2021.
27. VANQ LED. 2020. How to choose the best full spectrum LED grow lights for your crops?. Saatavissa: <https://www.vanqled.com/how-to-choose-the-best-full-spectrum-led-grow-lights-for-your-crops/>. Hakupäivä 25.4.2021.
28. Bridgelux, Inc. 2017. Bridgelux® EB Series™ Gen 2. Saatavissa: https://www.bridgelux.com/sites/default/files/resource_media/DS131%20Bridgelux%20EB%20Series%20Gen2%20Data%20Sheet%2020171020%20Rev%20A.pdf. Hakupäivä 10.4.2021.
29. Bridgelux, Inc. 2017. Bridgelux® SMD 2835 0.2W 3V. Saatavissa: https://www.bridgelux.com/sites/default/files/resource_media/DS74%20%20Gen2%20%20SMD%202835%200.2W%203V%20Data%20sheet%20Rev%20B.pdf. Hakupäivä 7.4.2021.
30. EN 62368-1:2014. Audio/video, information and communication technology equipment - Part 1: Safety requirements (IEC 62368-1:2014, modified). Brussels: European Committee for Electrotechnical Standardization.
31. ROHM Co., Ltd. 2021. LED Characteristics That Require Attention. Saatavissa: <https://www.rohm.com/electronics-basics/leds/led-characteristics>. Hakupäivä 10.4.2021.
32. MEAN WELL. 2020. 150W Constant Voltage + Constant Current LED Driver HLG-150H series. Saatavissa: <https://www.meanwell-web.com/content/files/pdfs/productPdfs/MW/HLG-150H/HLG-150H-spec.pdf>. Hakupäivä 5.4.2021.
33. MEAN WELL. 2020. 150W Constant Power Mode LED Driver XLG-150 series. Saatavissa: <https://www.meanwell-web.com/content/files/pdfs/productPdfs/MW/XLG-150/XLG-150-spec.pdf>. Hakupäivä 5.4.2021.
34. MEAN WELL. 2021. 84~150W Constant Voltage + Constant Current LED Driver ELG-150 series. Saatavissa: <https://www.meanwell-web.com/content/files/pdfs/productPdfs/MW/ELG-150/ELG-150-spec.pdf>. Hakupäivä 5.4.2021.
35. MEAN WELL. 2019. 150W Single Output Switching Power Supply CLG-150 series. Saatavissa: <https://www.meanwell-web.com/content/files/pdfs/productPdfs/MW/CLG-150/CLG-150-spec.pdf>. Hakupäivä 5.4.2021.
36. Digi-Key. 2021. Tuotehakemisto > Virtalähteet - ulkoiset/sisäiset (ei piirilevyllä) > LED-ohjaimet. Saatavissa: <https://www.digikey.fi/products/fi/power-supplies-external-internal-off-board/led-drivers/137?FV=-5%7C69588%2C-5%7C69724%2C-5%7C69728%2C-5%7C74357%2C-1%7C1866%2C->

- [8%7C137%2C1120%7C251357%2C1120%7C252046&quantity=0&Co-lumnSort=1000011&page=1&pageSize=25](#). Hakupäivä 5.4.2021.
37. Bastelgarage. 2021. Sonoff Pow R2 WiFi Switch mit Leistungsmessung 16A. Saatavissa: <https://www.bastelgarage.ch/sonoff-pow-r2-wifi-switch-mit-leistungsmessung-16a>. Hakupäivä 11.5.2021.
38. Arends T. 2021. Tasmota. Saatavissa: <https://github.com/arendst/Tasmota>. Hakupäivä 17.4.2021.
39. Winbond. 2019. 3V 32M-BIT SERIAL FLASH MEMORY WITH DUAL, QUAD SPI. Saatavissa: <https://www.winbond.com/resource-files/w25q32jv%20revh%2001072019%20plus.pdf>. Hakupäivä 1.5.2021.
40. Tasmota. 2021. Esptool. Saatavissa: <https://tasmota.github.io/docs/Esptool/>. Hakupäivä 30.4.2021.
41. Bridgelux, Inc. 2020. Product Simulator. Saatavissa: <https://bridgelux.com/product-simulator>. Hakupäivä 7.4.2021.
42. DIAL GmbH. 2016. Luxmeter App versus measuring device: Are smartphones suitable for measuring illuminance? Saatavissa: <https://www.dialux.com/en-GB/news-detail/luxmeter-app-versus-measuring-device-are-smartphones-suitable-for-measuring-illuminance>. Hakupäivä: 19.5.2021.

LIITE 1

ERILAISTEN VALAISIMIEN PPF- JA PPE-ARVOJA

Tyyppi	Teho (W)	Malli	PPF ($\mu\text{mol/s}$)	PPE ($\mu\text{mol/J}$)	Lähde ja kommentti
Suurpainena- trium	250	230V SE	450	1,8000	(1.)
Suurpainena- trium	400	Phillips MASTER Green- Power CG 400W 230V SE	725	1,8125	(1.)
Suurpainena- trium	600	Phillips MASTER Green- Power CG 600W 230V SE	1100	1,8333	(1.)
Suurpainena- trium	600	Phillips MASTER Green- Power 600W/400V SE	1150	1,9166	(1.)
Suurpainena- trium	1000	MASTER GreenPower 1000W 400V DE	1850	1,8500	(1.)
Loisteputki	36	MASTER TL-D Reflex/830 36W	47	1,3056	(1.)
Loisteputki	58	MASTER TL-D Reflex/830 58W	73	1,2586	(1.)
Keraaminen monimetalli	315	Phillips Master Colour	590	1,8730	(1.)
Rikkiplasma	700 – 3000	Yleinen esimerkki	910 - 3900	~1.3	(2.)
RF-viritetty halidilamppu	250 - 500	Yleinen esimerkki	150 - 500	~1,0	(2.)
Violetti LED	50	LEDTonic Z2	80	1,6	(3.)
COB LED	37,2	Bridgelux Vero 29 gen 8, BXRC-30E10K0-D-8x	102	2,7419	Bridgeluxin laskurilla saadut arvot, 1 050 mA virta. (4.)
COB LED	61,9	Bridgelux Vero 29 gen 8, BXRC-30E10K0-D-8x	162,6	2,6268	Bridgeluxin laskurilla saadut arvot, 1 700 mA virta. (4.)

SMD LED-moduuli	12,32	Bridgelux EB Series Gen2, BXEB-L0560Z-30E2000-C-B3	32,704	2,6545	Bridgeluxin laskurilla BXEN-30E-11L-3C-00-0-0 -ledimalin perusteella lasketut arvot. Moduulissa 112 lediä, 7 sarjassa, 16 rinnan. 640 mA virta. (4.)
SMD LED-moduuli	13,65	Bridgelux EB Series Gen2, BXEB-L0560Z-30E2000-C-B3	34,894	2,5563	Bridgeluxin laskurilla BXEN-30E-11L-3C-00-0-0 -ledimalin perusteella lasketut arvot. Moduulissa 112 lediä, 7 sarjassa, 16 rinnan. Nimellinen 700 mA virta. (4.)
SMD LED-moduuli	19,488	Bridgelux EB Series Gen2, BXEB-L0560Z-30E2000-C-B3	47,4208	2,4333	Bridgeluxin laskurilla BXEN-30E-11L-3C-00-0-0 -ledimalin perusteella lasketut arvot. Moduulissa 112 lediä, 7 sarjassa, 16 rinnan. 960 mA virta. (4.)
SMD LED	0,11	Bridgelux 2835 0,2 W 3 V Gen 2, BXEN-30E-11L-3C-00-0-0	0,292	2,6545	Datalehtiä vertailemalla tehty johtopäätös moduulin ledeistä. 40 mA, 2,75 V, 20 lm. Bridgeluxin käyttämä kerroin $\mu\text{mol/s/lm}$: 0,0146. (4, 5 ja 6.)
SMD LED	0,174	Bridgelux 2835 0,2 W 3 V Gen 2, BXEN-30E-11L-3C-00-0-0	0,4234	2,4333	Datalehtiä vertailemalla tehty johtopäätös moduulin ledeistä. 60 mA, 2,9 V, 29 lm. Bridgeluxin käyttämä kerroin $\mu\text{mol/s/lm}$: 0,0146. (4, 5 ja 6.)

1. <https://www.sanlight.com/en/about-ppf-and-ppfd/>. Hakupäivä 27.3.2021
2. https://www.controlledenvironments.org/wp-content/uploads/sites/6/2017/06/ceug_programme-2012.pdf. Hakupäivä 10.4.2021
3. <https://www.ledtonic.com/products/ledtonic-z2>. Hakupäivä 3.7.2021
4. <https://bridgelux.com/product-simulator>. Hakupäivä 7.4.2021
5. https://www.bridgelux.com/sites/default/files/resource_media/DS131%20Bridgelux%20EB%20Series%20Gen2%20Data%20Sheet%2020171020%20Rev%20A.pdf. Hakupäivä 27.3.2021
6. https://www.bridgelux.com/sites/default/files/resource_media/DS74%20%20Gen2%20%20SMD%202835%200.2W%203V%20Data%20sheet%20Rev%20B.pdf. Hakupäivä 7.4.2021