



Teppo Venermo

LED-valon spektritutkimus tomaateilla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinööriyö

1.2.2024

Tiivistelmä

Tekijä:	Teppo Venermo
Otsikko:	LED-valon spektritutkimus tomaateilla
Sivumäärä:	37 sivua + 3 liitettä
Aika:	1.2.2024
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine:	Elektroniikka
Ohjaajat:	Lehtori Janne Mäntykoski Kasvitieteen asiantuntija Aku Sarka

Insinööriyössä tutkittiin kolmen erilaisen valon spektrin vaikutuksia tomaattikasveissa. Tavoitteena oli kasvivalaisinmalliston kehittämiseksi havaita valon eri aallonpituuksien aikaansaamia eroavaisuuksia Saint Pierre -tomaattien fysiologisessa ja kemiallisessa käyttäytymisessä.

Kasvihuone Metropolian Urban Farm Labissa jaettiin valaistuserojen luomiseksi kolmeen eri osastoon, joilla kullakin oli neljä kasvia. Valaistusolosuhteet erosivat toisistaan ainoastaan kaukopunaisten valon määrän ja UV-säteilyn osalta. Referenssivalona käytettiin Valoyan Solray 385 -spektrillä varustettua RX600-valaisinta. Kasvien korkeus ja lehtien klorofyllipitoisuus mitattiin viikoittain biomassan määrän ja laadun määrittämiseksi. Tuloksina kirjattiin osastoittain kukinnan aloitus, hedelmien lukumäärä ja massa.

Huomioitavaa on, että mahdollisten genetiikkaeroavaisuuksien sekä kahdentoista kasvin kokonaisotannon takia opinnäytetyö ei täytä tieteellisen tutkimuksen vaatimuksia vaan antaa viitteellisiä koetuloksia valon eri spektreistä yhden tomaattilajikkeen yllä, eikä tuloksia voida siten yleistää. UV-säteilyä ja enemmän kaukopunaista säteilyä saaneet ryhmän A kasvit kasvoivat muita korkeammiksi, aloittivat kukinnan ja kypsyttivät hedelmät muita aiemmin ja antoivat suurimman sadon. UV-säteilyä sekä vähemmän kaukopunaista säteilyä saaneet kontrolliryhmä B:n kasvit antoivat korkeimmat klorofylliarvot ja tuottivat lukumääräisesti eniten tomaatteja, jotka tosin olivat pienikokoisimpia. Ilman UV-säteilyä jäänyt ryhmä C oli matalin, tuotti suurimmat tomaatit, mutta niitä oli vähiten. Lisäksi, tämän insinööriyön ulkopuolella, osalle kypsistä tomaateista tehtiin laadun määrittämiseksi elintarviketeknologian laboratoriossa aistinvarainen erotustesti sekä rakenne- ja värianalyysit, kuten myös kemialliset analyysit pH- ja °Brix-arvon sekä kokonaisantioksidanttikapasiteetin määrittämiseksi.

Avainsanat: LED, kasvivalaisin, spektri, tomaatti

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Teppo Venermo
Title: LED Light Spectrum Study on Tomatoes
Number of Pages: 37 pages + 3 appendices
Date: 1 February 2024

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Electrical and Automation Engineering
Professional Major: Electronics
Supervisors: Janne Mäntykoski, Senior Lecturer
Aku Sarka, Plant Specialist

This thesis study examined, for horticultural light R&D purposes, the effects of three different light spectrums on tomatoes. The aim for the examination was to detect divergence in light-induced, physical, and chemical plant behaviour of Saint Pierre -tomatoes.

The greenhouse at Metropolia's Urban Farm Lab was divided into three sections. Lighting and all growing conditions between the sections were kept identical except for near infra-red (NIR) and ultraviolet (UV) radiation's part. Valoya's RX600 fixture with Solray 385 spectrum was used as a reference light. Plant heights and the chlorophyll content of the leaves were measured weekly for biomass quantity and quality. Flowering and ripening time, and the number and the weight of the tomatoes were recorded and compared section-wise as results.

It must be noted, considering possible genetic variation and the sample of total twelve plants, this thesis study cannot be regarded as scientific research but a suggestive study of different light spectra on a tomato species and therefore the results cannot be generalised. The plants in the group A which got UV and more NIR radiation, grew the tallest, had the earliest flowering and ripening and gave the heaviest yield. The reference group B which got UV, and modest amount of NIR radiation, gave the highest SPAD-values and produced the most but the smallest tomatoes. Group C without UV was the shortest and produced the largest, but the least tomatoes. Additionally, outside the scope of this thesis, the quality of the tomatoes was evaluated by means of a sensory separation testing. Also, texture and chemical analysis were made for mature tomatoes to measure density, pH- and °Brix-value, as well as antioxidant capacity.

Keywords: LED, horticultural lighting, spectrum, tomato

The originality of this thesis has been checked using Turnitin Originality Check service.

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Hohtodiodi valonlähteenä	2
	2.1 Toimintaperiaate ja valmistusprosessi	2
	2.2 Valon väri	4
	2.3 Valkoinen valo	6
	2.4 LED-valaisimen osat	8
3	LEDien kehityshaasteita	10
4	Laiteteoriaa	11
5	Tutkimusjärjestelyt	16
	5.1 Valaistus	16
	5.2 Ilmasto	19
	5.3 Ravinneliuos	22
	5.4 Kasvualusta ja kastelujärjestelmä	22
	5.5 Tuholaistorjunta	23
6	Tulokset	23
	6.1 Korkeusmittaukset	24
	6.2 Klorofyllimittaukset	27
	6.3 Kukinta ja sato	29
	6.4 Hedelmien laatu	30
	6.5 Tiivistelmä mittaustuloksista	32
7	Yhteenveto	32

Liitteet

Liite 1: HSY:n vesianalyysi

Liite 2: Tomaattien korkeusmittaukset

Liite 3: Tomaattien klorofyllimittaukset

Lyhenteet

- CCT: *Correlated Colour Temperature*. Värilämpötila. Luokittelee valkoisen valon värisävyn mukaan.
- CoB: *Chip on Board*. LEDien valmistustekniikka. Tuote koostuu useiden sirujen muodostamasta matriisista.
- CRI: *Colour Rendering Index*. Värintoistoindeksi. Luokittelee valaisimen kyvyn toistaa värejä.
- DIP: *Dual Inline Package*. Elektronisten komponenttien valmistustekniikka. Komponentit ladotaan piirilevylle porattuihin reikiin.
- EC: *Electrical Conductivity*. Sähkönjohtavuus. Kuvaa aineen kykyä johtaa sähköä.
- eV: Elektronivoltti. Energian yksikkö. Käytetään usein atomi- ja ydinfysiikassa.
- IR: *Infra-Red*. Infrapunainen. Aallonpituudeltaan 800–1000 nanometrin sähkömagneettinen säteily.
- LED: *Light Emitting Diode*. Valodiodi.
- MOCVD: *Metal Organic Chemical Vapour Deposition*. Piikiekkojen käsittelyprosessi, jossa puskurikerroksen päälle kerrostetaan puolijohdemaateriaalia.
- NPK: *Nitrogen, Phosphorus and Kalium*. Kasviravinteiden sisältämät pääravinteet typpi, fosfori ja kalium prosenttiyksiköissä.

- NIR: *Near Infra-Red*. Kaukopunainen. Aallonpituudeltaan 700–800 nanometrin sähkömagneettinen säteily.
- ppm: Parts per million. Miljoonasosa.
- PWM: *Pulse Width Modulation*. Pulssinleveysmodulaatio. LEDejä himmentään sammuttamalla ja sytyttämällä niitä korkealla taajuudella.
- R&D: *Research and Development*. Tutkimus- ja kehitystoiminta.
- SMD: *Surface Mount Device*. Elektronisten komponenttien valmistustekniikka. Komponentit ladotaan piirilevyn pinnalle.
- SPAD: *Soil Plant Analysis Development*. Menetelmä kasvien lehtien klorofyllipitoisuuden määrittämiseksi.
- UV: *Ultraviolet*. Aallonpituudeltaan 10–400 nanometrin sähkömagneettinen säteily.
- UVA: UVA-säteily. Aallonpituudeltaan 315–400 nanometrin sähkömagneettinen säteily.

1 Johdanto

Valo on kasvien ensisijainen energianlähde yhteyttämisprosessissa, mutta välittää kasveille myös tietoa ympäröivistä olosuhteista ja sääntelee kasvien fysiologisia sekä kemiallisia toimintoja. Muista valonlähteistä poiketen nykyaikaisilla LED-valaisimilla on mahdollista tuottaa intensiivistä valoa hyvin kapealla spektrin kaistalla, mikä on avannut mahdollisuudet kasveille merkityksellisten aallonpituuksien tutkimiselle. Valtaosa tutkimuksista on keskittynyt spektrin keskialueelle näkyvään siniseen, keltavihreään ja punaiseen valoon välille 400...700 nm, mutta tässä opinnäytetyössä tutkitaan kolmen testiryhmän kautta UVA- (385 nm) sekä kaukopunasäteilyn (730 nm) aiheuttamia vaikutuksia yleisenä satokasvina indikaattoriksi valitussa tomaatissa.

Tämä tutkimusprojekti toteutettiin ammattikorkeakoulu Metropolian ja valaisinvalmistaja Greenlux Lighting Solutions Oy:n yhteistyönä. Yhtiö on erikoistunut yleisvalaistuksen lisäksi myös Valoya-merkkisten kasvivalaisinten valmistukseen. Spektrikokeessa hyödynnettiin yhtiön valaisimia ja tutkittiin niiden muun valon ohella emittoimien 385 ja 730 nanometrin säteilyn vaikutuksia tomaatin kasvuun, kukintaan sekä hedelmäntuottoon. Projektin tavoitteena oli saavuttaa tuloksia, joita voidaan soveltaa kasvivalaisinten tuotekehityksessä.

Huomioitavaa on, että koska kokeen indikaattoreina toimineiden tomaattien genetiikka ei ollut yksiselitteisen identtinen ja kokonaisuutena oli suhteellisen pieni (12 kpl), koetulokset ovat suuntaa antavia, eikä niitä voida yleistää. Näin ollen varsinaisia johtopäätöksiä ei tehdä, mutta kaikki tulokset esitellään huolellisesti. Havaituille ilmiöille pyritään löytämään selvittäviä tekijöitä kirjallisuudesta. LED-tekniikan kehityksen takia saatu tieto perustuu osittain viimeaikaisiin tutkimuksiin ja siten verkkoaineistoon.

Insinööritö painottuu tutkimuksen mahdollistavaan LED-tekniikkaan, eikä vertailua muihin valonlähteisiin tehdä. Myös muu projektissa hyödynnetty tekniikka, eli kasvuhuone- ja kasviparametrien mittaamiseen ja optimointiin käytetyt työkalut ja apuvälineet, esitellään teoriaosuudessa lyhyesti. Tomaatin viljelyyn

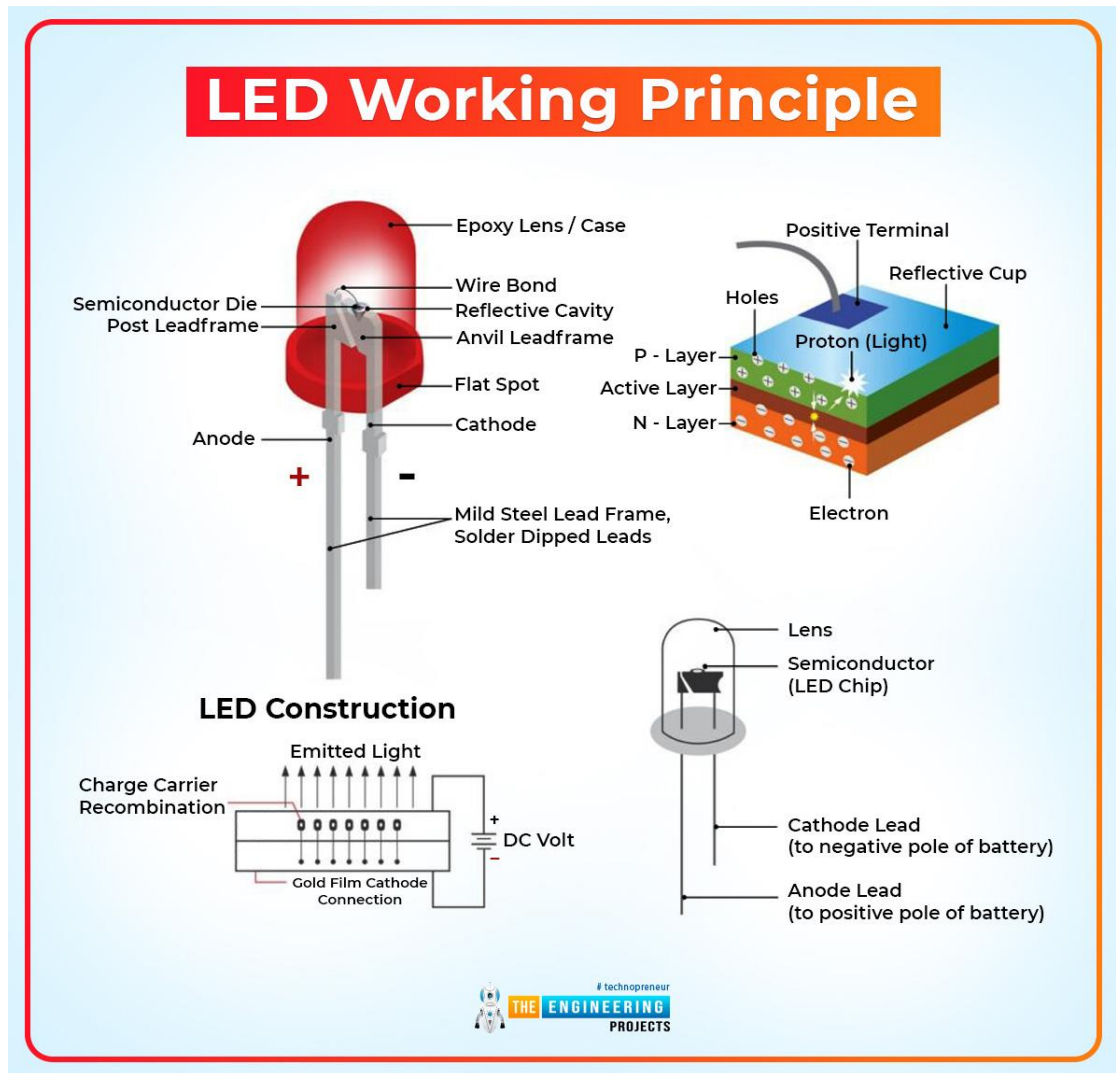
liittyviä agronomisia selvityksiä ei insinööriyössä tehdä, mutta kasvuolosuhteita kuvaillaan luvussa 5.

Projektin aikana tehtiin useita havaintoja testiryhmien eroavaisuuksista. Kaukopunaiseen säteilyyn linkittyvät ilmiöt olivat selkeämmin havaittavissa kuin UV-säteilyyn liittyvät erot, jotka vaikuttivat tapahtuvan osittain solutasolla visuaalisen tarkastelun ulottumattomissa.

2 Hohtodiodi valonlähteenä

2.1 Toimintaperiaate ja valmistusprosessi

Elektroluminesenssi on prosessi, jossa materiaalista emittoituu valoa vasteena sen läpi kulkevalle sähkövirralle. Hohto- tai valodiodi eli LED (Light Emitting Diode) on tasajännitteellä toimiva puolijohdekomponentti. Valo syntyy diodin sisällä olevassa p- ja n-puolijohdetyyppien liitoksessa, joka emittoi säteilyä, kun siihen johdetaan myötäsuuntainen bias- eli etujännite. Anodilta katodille kulkeva virta kuljettaa elektroneja ja elektroniaukkoja kohti liitoskohtaa, jossa ne yhdistyvät, minkä seurauksena elektronit siirtyvät alemmalle energiatasolle. Tämä vapauttaa energiaa lämmön lisäksi fotoneina, jotka säteilevät näkyvänä valona. [1.] Valodiodin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Valodiodin rakenne ja toimintaperiaate [2].

Valmistusprosessin ensimmäinen vaihe käsittää alustamateriaaliekon puhdistuksen ja kiillotuksen. Pii ja germanium ovat yleisiä pohjasubstraatteja. Kiillotuksen jälkeen kiekko pinnoitetaan vikojen vähentämiseksi ja laadun parantamiseksi ohuella puskurikerroksella. [1.]

Seuraava valmistusprosessin vaihe on nimeltään epitaksia (epitaxy). Menetelmä on yleensä MOCVD (Metal Organic Chemical Vapour Deposition), jossa paineistettua ja kuumennettua, puolijohdemateriaalia sisältävää, kaasua kerrostetaan puskurikerroksen päälle. Kerroksen paksuus vaikuttaa syntyvän valon väriin. [1.]

Kolmas vaihe on seostaminen (doping), jossa epitaksiaalikerros seostetaan epäpuhtauksilla, kuten sinkillä ja tyrellä, p- ja n-alueiden muodostamiseksi. Menetelmänä käytetään yleisimmin ioni-istutusta, jossa seostus toteutetaan suurienergisten säteiden avulla. [1.]

Seostuksen jälkeen on vuorossa sputterointi (sputtering), jossa valodiodi päällystetään korkeaenergisien ionisuihkun avulla sähköä johtavalla metallikerroksella kontaktipintojen luomiseksi. [1.]

Viides vaihe on etsaus (etching). Metallikerroksen päälle luodaan fotolitografian avulla kuvioita, jotka päällystetään valonestokerroksella. Valonestokerrokseen syövytetään kuvioita UV-valon avulla, ja plasmaan pohjautuvan kuivaetsauksen avulla kuvio siirretään diodin pinnalle. [1.]

Etsauksen jälkeen suoritetaan kapselointi, joka suojaa valodiodia liialta kosteuden aiheuttamalta korroosiolta ja fysikaaliselta rasitukselta sekä tehostaa lämmön haihtumista. Epoksia käytetään yleisesti pakkausmateriaalina. Pakkauksessa on kontaktipinnat diodin liittämiseksi virtapiiriin. [1.]

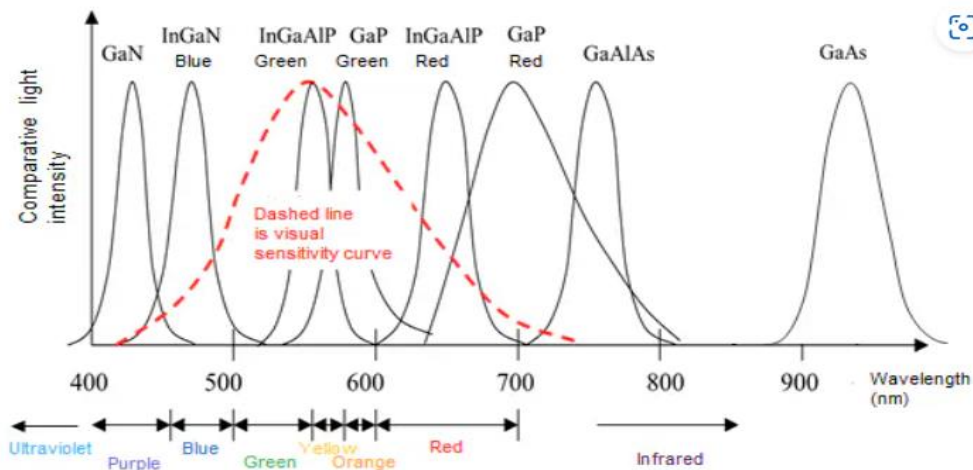
2.2 Valon väri

Säteilevän valon väri riippuu fotonien energiasta eli käytettyjen materiaalien kaistanrakoenergiasta (bandgap energy). Punaiset, oranssit ja keltaiset valodiodit on valmistettu materiaaleista, joiden energiarako on verrattaen pieni. Siniset ja vihreät diodit sisältävät puolijohteita, joiden kaistanrakoenergia on suurempi, kuten taulukossa 1 on esitetty. [3.]

Taulukko 1. Kaistanrakoenergiat ja syntyvän valon väri vaihtelevat yhdistekoh-
taisesti. Eri yhdisteillä voidaan tuottaa kaikkia spektrin värejä infrapunaisesta
ultraviolettisäteilyyn. [3.]

Puolijohde	Energiarako (T=300K) [eV]	Aallonpituus λ [nm]	Väri
GaAs	1,4	885	Infrapunainen
GaAsP/GaAlAs	1,6–1,8	720–780	Kaukopunainen
GaP	1,8–2,26	549–700	Vihreä-keltainen- oranssi-punainen
InGaAlP	1,9–2,3	539–653	Kirkas vihreä- keltainen-oranssi- punainen
InGaN	2,1–3,2	385–590	Kirkas ultravio- letti-sininen-vih- reä
GaN	3,4	365	Ultravioletti-sini- nen

Sähkövirta diodin läpi kasvaa energiaraon suuretessa, jolloin myös säteilyn in-
tensiteetti kasvaa. Eri yhdisteillä luodut spektrit pääsääntöisesti limittyvät keske-
nään, kuten kuvassa 2 on havainnollistettu.



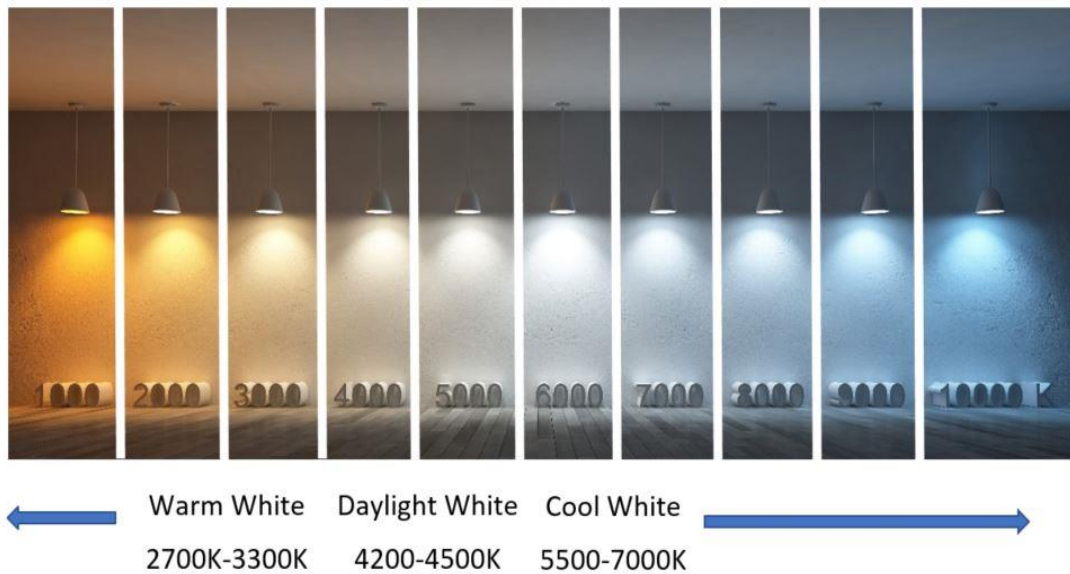
Kuva 2. Puolijohdeyhdisteet tuottavat valoa kapealla spektrin kaistalla [3].

Valmistusmateriaalit kuuluvat alkuaineiden jaksollisen järjestelmän ryhmiin kolme, neljä ja viisi. Puolijohdeiden väliset pitoisuussuhteet vaikuttavat syntyvän valon väriin, jota voidaan edelleen muokata hohtodiodien pintaan lisätyillä kalvoilla tai pinnoitteilla.

2.3 Valkoinen valo

Valkoinen LED-valo luodaan leventämällä kapeaspektrisen sinisen LEDin kaistaa luminesenssikonversion avulla. Fosforipinnoitteen lisääminen sirun pintaan on menetelmänä joustava ja edullinen. Valkoinen valo saadaan aikaan myös yhdistämällä värillisiä, eli punaisia, vihreitä ja sinisiä, diodeja keskenään. Tätä vaihtoehtoa käytetään, kun halutaan säätää valon väritasapainoa. [4. s. 2.]

Valkoinen valo voidaan luokitella värilämpötilan perusteella. Värilämpötilan (Correlated Colour Temperature, CCT) yksikkö on kelvin (K), ja valo jaetaan sen perusteella kuvan 3 mukaisesti kolmeen pääluokkaan: lämmin (< 3300 K), neutraali (3300–5500 K) ja kylmä (> 5500 K). [5.]



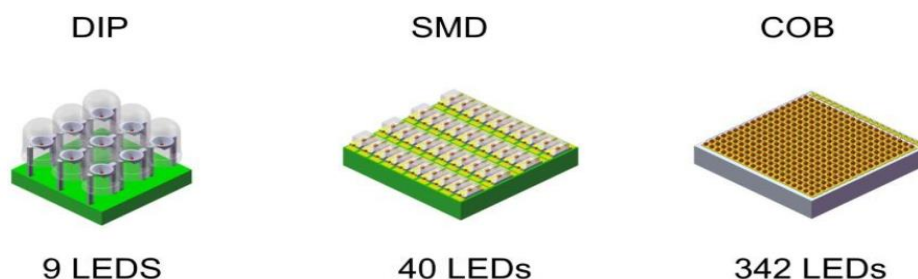
Kuva 3. Valkoisen valon värielämpötilat tuhannen Kelvinin välein [5].

Päivänvalon värielämpötila on neutraali 4200–4500 K [5]. Kokeessa käytettyjen Valoya RX-600 -valaisinten värielämpötila oli 4500 K, joka siis vastaa päivänvaloa ja siten soveltuu hyvin kasvien kaikkiin eri kasvuvaiheisiin.

Värintoistoindeksi (Colour Rendering Index, CRI) kuvaa nimensä mukaisesti valaisinten kykyä toistaa värejä. Indeksien laskemiseksi kahdeksan eri värin toistumista verrataan referenssivalossa sekä määritettävässä valossa, ja poikkeamista ratkaistaan neliöllinen keskiarvo. Lampun valon tulee sisältää kaikkia spektrin aallonpituuksia ihmissilmän näköalueelta, jotta värit toistuvat luonnollisina. Värintoistoindeksi saa arvoja väliltä 0...100. [5.] Kokeessa käytettyjen Valoya RX 600 -valaisinten värintoistoindeksi oli sekä Solray 385 - että Solray X -spektrille 95.

2.4 LED-valaisimen osat

Valodiodit voidaan luokitella valmistusmenetelmän ja koon perusteella, suurimmasta alkaen, kolmeen ryhmään: DIP- (Dual In-line Package), SMD- (Surface Mount Device) ja CoB- (Chip on Board) LEDeihin. Diodien kokoeroa on havainnollistettu kuvassa 4.



Kuva 4. Diodien mahdollinen määrä 10 mm · 10 mm:n alalla eri valmistusmenetelmin [6].

CoB-LEDit koostuvat yhdestä piiristä, kahdesta johtimesta ja useasta LED-si-rusta, jotka on liitetty suoraan väliaineeseen kuten silikonikarbidiin tai safiiriin. CoB-LEDit ovat kirkkaita, luovat tasaisen valon, kuluttavat suhteessa vähän energiaa ja ovat pitkäikäisiä tehokkaan lämmönsiirtymisen ansiosta. [6.]

LED on valonlähteenä pienikokoinen ja tarvitsee hyvän hyötysuhteen sekä pitkän elinkaaren säilyttääkseen jäähdytyksen, joka kasvattaa rungon kokoa. Valaisimen jäähdytys toteutetaan joko passiivisesti sopivia muotoja ja oikeanlaisia materiaaleja, kuten alumiinia, sen rungossa hyödyntäen. Jäähdytys voidaan toteuttaa myös aktiivisesti jäähdytinpuhaltimen avulla, mikä lisää valmistus- ja käyttökustannuksia. [4, s. 2.] Kokeen kaikki valaisimet olivat passiivijäähdytteisiä.

Optiikka on erittäin tärkeä osa LED-valaisinta, sillä hyvin suunniteltu ja toteutettu valon suuntaaminen pitää hyötysuhteen korkeana. Vaikka komponentit ja kokoonpano olisivatkin laadukkaita, huono optiikka heikentää kokonaisuuden valaistusominaisuuksia selvästi aiheuttaen valon katoamista sekä sirontaa.

[4, s. 6.] Toisin kuin muut valonlähteet, diodit säteilevät valoa tiettyyn suuntaan, mikä lisää valon kohdistettavuutta, jota voidaan edelleen parantaa heijastimen tai linssin avulla. Kasvivalaisimen on tarkoitus luoda laaja ja mahdollisimman tasainen valokeila kasvustoon, mikä toteutetaan useissa tapauksissa avautumiskulmaltaan noin 120°:n linssin avulla. Lasin lisäksi borosilikaatti on hyvän transmittanssinsa, eli läpäisy-suhteensa, sekä lämmönkestävyytensä vuoksi yleinen linsseissä käytetty materiaali.

LED-valaisimet tarvitsevat toimiakseen liitäntälaitteen eli virtalähteen, joka muuntaa verkkojännitteen tasavirraksi. Diodien määrä, tyyppi ja sähköiset arvot määrittävät tarvittavan virtalähteen spesifikaatiot. Liitäntälaitteen avulla voidaan kontrolloida LEDien säädettäviä ominaisuuksia, kuten kirkkautta, väriämpötilaa tai väritasapainoa. [4, s. 7.]

Valon kirkkautta säädetään liitäntälaitteen ohjaimen tai kanttiaaltotekniikkaa hyödyntävän pulssileveysmodulaation (Pulse Width Modulation, PWM) avulla. Järjestelmään liitettyjä ledejä sytytetään ja sammutetaan korkealla taajuudella, millä voidaan alentaa niiden valon tasoa. [4, s. 8.]

Kokeen kaikkiin liitäntälaitteisiin asennettiin potentiometrit 0–10 V:n ohjausjännitettä varten, minkä jälkeen ne olivat himmennettävissä pulssileveysmodulaation avulla.

3 LEDien kehityshaasteita

LEDien valmistuksessa on todistettu suuriakin laadullisia eroja valaistusvoimakkuuden ja elinkaaren suhteen jopa saman tuotantoerän komponenteissa. Diodin pakkaamisprosessi on materiaalien laatutekijöiden lisäksi tärkein tehokkuuteen ja luotettavuuteen vaikuttava tekijä. Laadullisten tekijöiden kehittäminen ja valmiiden tuotteiden testaaminen kulurakenteet huomioiden onkin yksi LED-valmistajien haasteista. [7, s. 24.]

Jotta valon syntymekanismeja puolijohteissa voidaan ymmärtää paremmin, uusia kehittyneempiä diagnoosimenetelmiä ja matemaattisia malleja tarvitaan [7, s. 22]. Muiden LEDien kanssa kilpailevien valonlähteiden osalta kvanttiominaisuuksien osa-alueet hallitaan, mutta valodiodien suhteen siinä ollaan yhä kaukana jäljessä [7, s. 23].

Lupaavimmat LED-valon tuotossa käytetyt yhdisteet ovat safiiri, piikarbidi (SiC), indiumfosfidi (InP), galliumarsenidi (GaAs), alumiinigallium (AlGa), galliumnitridi (GaN) sekä alumiinigallium-indiumfosfidi (AlGaInP). Suurten alumiini- ja indiumpitoisuuksien käyttö vihreän ledin p-n-liitoksessa parantaa tehokkuutta. Ilman kallista tutkimus- ja kehitystyötä valontuotto-ominaisuuksiltaan tehokkaimmat materiaalit kuitenkin saattavat jäädä löytämättä. Koska esimerkiksi maapallon indiumvarannot ovat suppeat, diodien tuotantokustannusten hallinta liittyy oleellisesti tähän osa-alueeseen. [7, s. 24.]

LEDien tuotantotekniikat ovat jäykkiä ja erikoistuneita tietyn materiaalin käsittelyyn. Esimerkiksi galliumarsenidin käsittelyssä erinomaista laatua tekevät tuotantotekniikat toimivat huonosti galliumnitridiprosesseissa. Tämä rajoittaa kokeiluluonteisen tieteellisen tutkimuksen mahdollisuuksia oleellisesti. [7, s. 24.]

Keltaiset fosforit, kuten kaliumfluorisilikaatti, muuntavat sinistä LED-valoa valkoiseksi heikolla hyötysuhteella. Onkin tärkeää kehittää fosforeita edelleen, jotta niiden kykyä absorboida ja muuntaa aallonpituudeltaan 370–470 nanometrin foneita saadaan parannettua edelleen. Myös tarkemmat tutkimustulokset punaisten ledien ja fosforien yhdistämisestä olisivat hyödyksi. Lisäksi olisi hyödyllistä tutkia täydentävien värien yhdistelemistä spektriin edistyksellisten fosforien kehittämiseksi. [7, s. 24.]

Myös materiaalien, kontaktipintojen ja sirun heijastavien pintojen optisten ominaisuuksien tutkimus on tärkeää. Liitoskohdan geometriaa kehittämällä voidaan valo eristää tehokkaammin käyttötarkoitukseensa. Myös monimutkaisempien rakenteiden, kuten fotonisten kristallien, soveltaminen tuottaa keskipitkän aikavälin haasteita tehokkuuden parantamiseksi. [7, s. 25.]

4 Laiteteoriaa

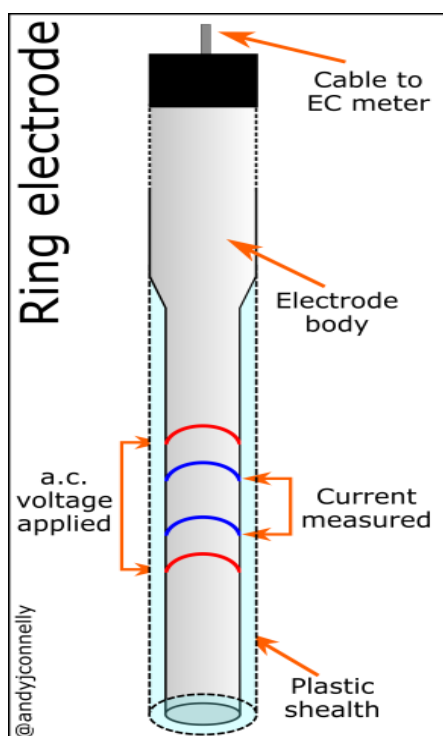
Kasvuhuoneparametrien optimointiin ja seurantaan käytettiin useita elektronisia laitteita, jotka esitellään lyhyesti tässä luvussa. Ne ovat sisäkasvatusprojektissa välttämättömiä tai vähintäänkin hyödyllisiä työkaluja.

pH-mittari

Saksankielinen sana *potenz* tarkoittaa vahvuutta, ja H viittaa vetyionien määrään. pH-mittarilla voidaan määrittää nesteen happamuus- tai emäksisyystaso sähköisen jännitteen avulla. pH-arvo on negatiivinen logaritmi vetykonsentraatiosta. Mittarissa on kaksi elektrodia, joista toinen upotetaan nesteeseen sähköpiirin muodostamiseksi. Nesteeseen upotettava elektrodi on nimeltään anturielektrodi. Toinen elektrodi on nimeltään referenssielektrodi ja sisältää ainetta, jonka pH-arvo ja sähköinen potentiaali tunnetaan. Kaliumkloridi on yleinen referenssielektrodissa käytetty yhdiste. Mittausjännite saadaan vertaamalla referenssi- ja anturielektrodien jännitteitä keskenään. [8.] pH-luku saa yksidesimaalisia arvoja väliltä 0–14.

EC-mittari

Konduktanssi eli sähkönjohtavuus (Electric Conductivity) kuvaa materiaalin kykyä johtaa sähkövirtaa tietyn välimatkan yli. Si-yksikkö on siemensia per metri (S/m). Sähkönjohtavuuden avulla voidaan määrittää esimerkiksi liuoksen suolatai epäpuhtauspitoisuuksia. Potentiometrinen, edistyneempi, EC-mittari koostuu neljästä elektrodista kahden sijaan. Ne on valmistettu sylinterimäiseen muotoon platinasta ja asetettu konsentrisesti mittapähän, kuten kuvassa 5 on esitetty. Ulompi elektrodipari johtaa testattavaan aineeseen sinimuotoista jännitettä, mikä saa aikaan sähkövirran, joka mitataan sisemmällä elektrodiparilla. [9.]

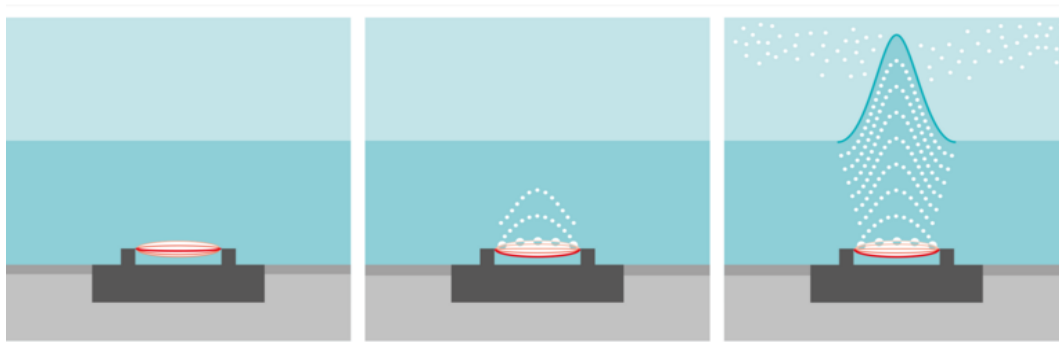


Kuva 5. Kahden elektrodiparin mittapää [9].

Koska mitattu arvo on verrannollinen lämpötilaan, mittari sisältää myös lämpötila-anturin ja mikroprosessorin, joka laskee lämpötilakompensoidun sähkönjohtavuusarvon mitatusta sähkövirrasta [9]. Kokeen mittalaitteessa, Bluelab Pro Connectissa, oli omat erilliset mittapääät sekä näyttöpaneelit lämpötila-, EC- ja pH-antureille. EC-arvon yksiköksi konfiguroitiin mikrosiemenssiä per senttimetri ($\mu\text{S} / \text{cm}$).

Ultraäänikostutin

Ultraäänikostutin muuttaa sähkön mekaaniseksi energiaksi muuntajan sekä piezosähköisen signaalinmuuntimen avulla [10]. Metallinen tai keraaminen kalvo värähtelee veden pinnan alla ultrakorkealla 1–3 MHz:n oskillointitaajuudella ja muuttaa ääniaaltojen avulla, atomisoitumisen seurauksena, veden muutaman mikrometrin kokoisiksi kupliksi eli vesihöyryksi [11]. Toimintaperiaate on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Ultraäänikostuttimen toimintaperiaate [12].

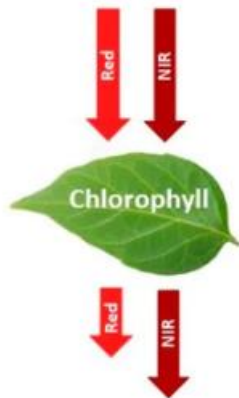
Tehokkaammissa kostutinmalleissa korkeammat höyrystymistehot saavutetaan yhdistämällä useita signaalinmuuntimia samaan piiriin. Koetta varten asennetussa kostuttimessa oli viisi keraamista värähtelijää.

Laite toimii tehokkaimmillaan ollessaan muutaman sentin veden pinnan alla. Kostuttimiin on saatavissa kellukkeita, joiden avulla korkeusasema pysyy optimaalisena veden pinnan korkeudesta riippumatta.

Klorofyllimittari

SPAD-mittarilla (Soil Plant Analysis Development) voidaan määrittää kasvien lehtien klorofyllipitoisuuksia. Läpäisysuhteeseen, eli transmittanssiin, perustuva mittari lähettää punaista ($\lambda = 650 \text{ nm}$) ja infrapunaista ($\lambda = 940 \text{ nm}$) säteilyä kasvin lehden läpi. Lehtien klorofylli absorboi punaista valoa, mutta ei niinkään infrapunaista, kuten kuvassa 7 on esitetty. Kolminumeroinen SPAD-arvo saadaan vertaamalla eri aallonpituuksien läpäisysuhteita keskenään. [13.]

Transmittance-based chlorophyll meter

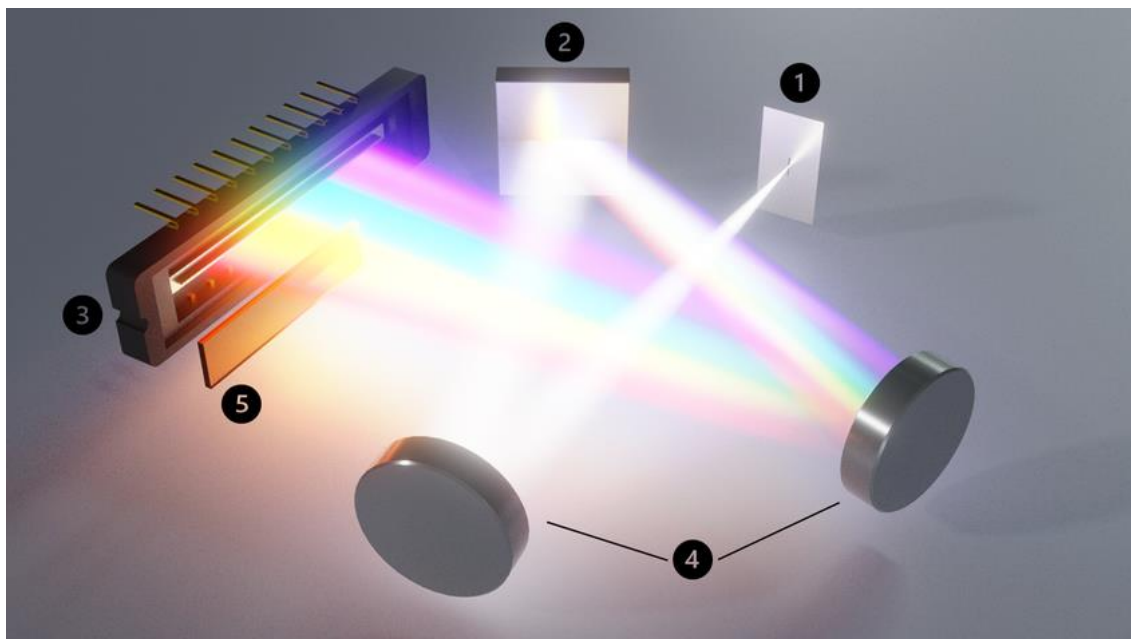


Kuva 7. Klorofyllimittarin toimintaperiaate [14].

Klorofylli korreloi typen määrään lehdessä, minkä arvioiminen on laitteen perimmäinen tarkoitus. Typpi yhdistetään yleisesti rehevään kasvuun, ja sen osuus eri lannoiteohjelmissa vaihtelee ravinteista eniten. [13].

Optinen spektrometri

Optisella spektrometrillä mitataan elektromagneettista säteilyä ihmissilmän näköalueella sekä sen lähetyvillä UV- ja IR-alueella. Laite pilkkoo valon alkutekijöihinsä ja hyödyntää aallonpituuden funktiota tunnistuen eri aallonpituuksien intensiteetit totaaliemissiosta [15]. Optisen spektrometrin pääkomponentit on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Optisen spektrometrin komponentit: sisääntuloaukko (1), diffraktiohila (2), optinen tunnistin (3), koverat peilit (4) ja suodatin (5) [16].

Valo ohjataan laitteen sisään aukosta, jonka koko määrittää, millaista valomäärää instrumentilla voidaan mitata ja mikä on laitteen resoluutio eli tarkkuus. Pienemmällä sisääntuloaukolla saavutetaan parempi resoluutio. Valo ohjataan linssein ja korkeamman asteluvun suodattimen läpi aukosta sisään kehämäisessä muodossa. Valon sädekimppu kollimoidaan peilin avulla. Peilistä yhdensuuntaiset valonsäteet heijastuvat käännettävään diffraktiohilaan, jossa ne, optisen dispersion mukaisesti, hajoavat eli dispergoituvat. Hilaa kääntämällä määritetään, mitkä aallonpituudet ohjataan seuraavalle peilille. Syntyneet monokromaattiset valonsäteet fokusoidaan koveran pallomaisen peilin kautta tunnistimelle, joka muuntaa vastaanotetut fotonit sähköisiksi signaaleiksi. [15.] Nykyaikaisissa optisissa spektrometreissä kuvasta 8 puuttuva mikroprosessori tulkitsee kunkin aallonpituuden voimakkuuden piirtäen niistä kuvaajan näyttöpaneelille ja laskien eri aallonpituuksien suhteet automaattisesti.

5 Tutkimusjärjestelyt

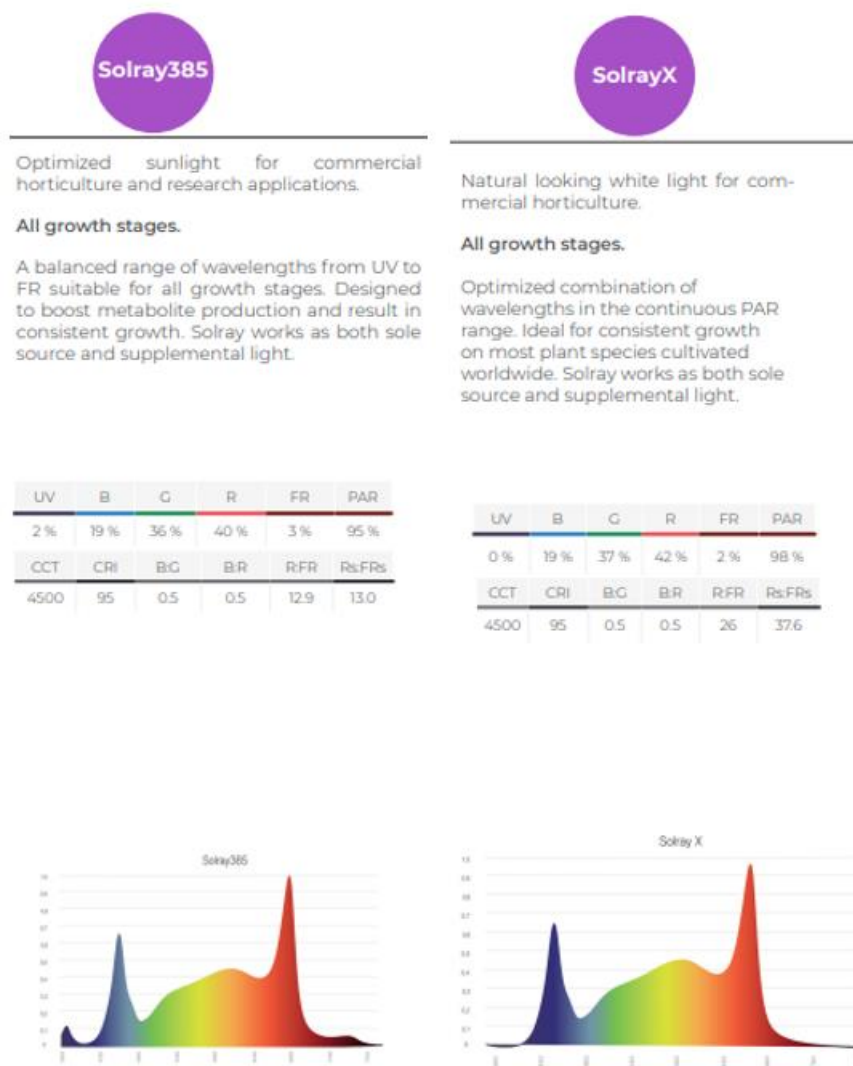
Greenlux Lighting Solutions toimitti tomaatinsiemenet (*Solanum lycopersicum* L.) projektia varten. Lajike oli Saint Pierre. Siemenpussissa oli 100 siementä. Hedelmäntuottoajaksi oli ilmoitettu 120 vuorokautta ja kasvien korkeudeksi 80 cm sekä leveydeksi 60 cm. Siemenistä valikoitiin 24 mahdollisimman samankokoista siementä, jotka idätettiin tarkoitusta varten valmistetuissa kivivillakuutioissa. Itämisprosentti oli 100 %, joten 24 kandidaatista valikoitiin 12 mahdollisimman identtistä taimenalkua kokeeseen.

Taimet siirrettiin kasvuhuoneeseen kokojärjestyksessä siten, että suurimmat taimet laitettiin osastolle C ja pienimmät taimet tulivat osastolle A, jossa suuremman kaukopunasäteilyn vuoksi oli oletettavissa kasvien venyminen korkeammiksi.

5.1 Valaistus

Greenlux Lighting Solutions toimitti tutkimuslaboratorioon seitsemän valaisinta koetta varten. Kasvuhuoneen koko oli 3600 · 1120 · 2800 mm (l · s · k), ja se jaettiin eri valaistusolosuhteiden luomiseksi kolmeen yhtä suureen osastoon kooltaan 1200 · 1120 · 2800 mm. Kaikki valaisimet kiinnitettiin samaan 40 · 40 mm:n alumiiniputkesta valmistettuun telineeseen, joka ripustettiin korkeusaseman säätöä varten taljapyörien kautta kulkeviin naruihin. Telineeseen kiinnitettiin myös 20 · 20 mm:n alumiiniset kiinnikeputket valkoisesta, valoa läpäisemättömästä, muovikalvosta valmistettuja väliverhoja varten. Siten valaisinripustimen alla tila tuli jaetuksi osastoihin, kun taas ripustimen yläpuolinen tila jäi yhteiseksi kaikille osastoille ja poistoilmakanavalle.

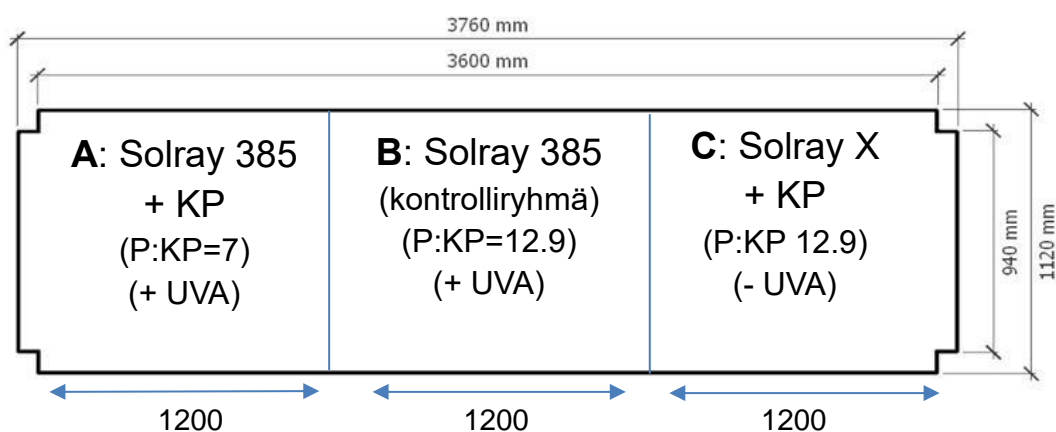
Jokaiseen osastoon sijoitettiin yksi Valoya RX600 -valaisin, jonka maksimiteho oli 653 W. Kahdessa valaisimista oli kokeen kontrollivalona käytetty Solray 385 -spektri, kun taas yhdessä sovellettiin Solray X -spektriä, joka eroaa edellisestä siten, että kaukopunaista valoa emittoituu vähemmän eikä se säteile UV-aallonpituuksia. Molemmat spektrit on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Kokeessa käytetyt RX600-valaisinten spektrit [17].

Kuten kuvasta 9 voidaan todeta, Solray 385 -spektrissä UV-säteilyn määrä oli kaksi prosenttia kaikesta valaisimen tuottamasta säteilystä. Solray X -spektri ei sisältänyt UV-säteilyä.

Lisäksi kasvuhuoneen päätyosastoille asennettiin kaukopunaista aallonpituutta (730 nm) säteilevät Valoyan valaisinmalliston BX90- ja C120-lisävaloparit. Lisävalaisimiin asennettiin PWM-potentiometrit, joiden avulla punaisten ja kaukopunaisten aallonpituuksien suhde (P:KP) säädettiin vastaamaan kuvassa 10 esitettyjä lukuja 7 sekä 12.9.

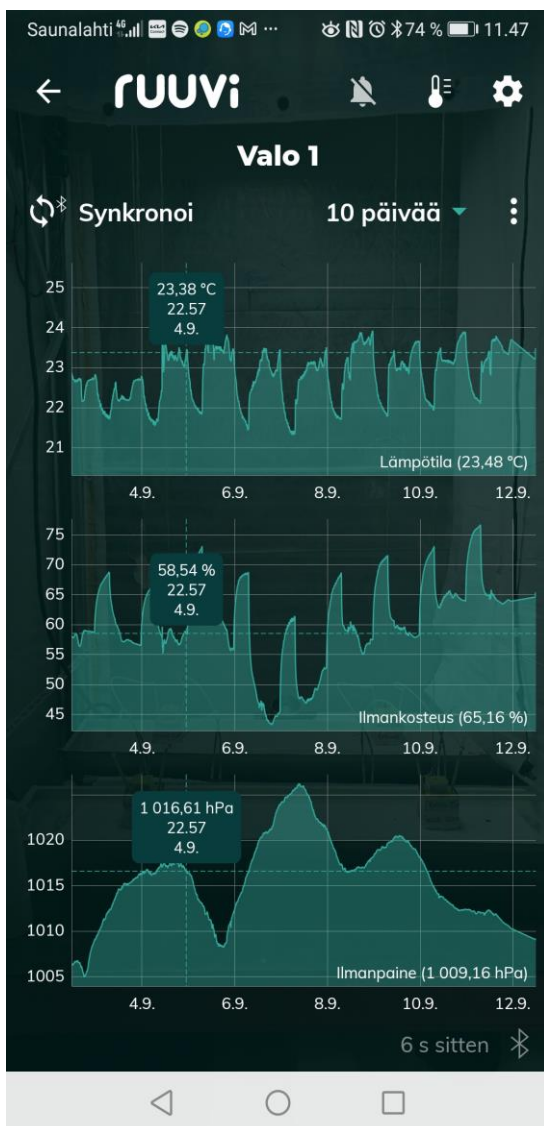


Kuva 10. Pohjapiirros eri valaistusalueista.

Kaikki valonsäädöt suoritettiin optisen spektrometrin NPRTek PG200N avulla. Tutkimuksen alussa valaisinten tehot asetettiin siten, että jokaiselta osastolta itujen tasolta mitattiin PPFD-luku (Photosynthetic Photon Flux Density) $185 \mu\text{mol} / (\text{s} \cdot \text{m}^2)$. Suunnitelmana oli kasvien kukintavaiheen alettua säätää valotehot siten, että jokaiselta osastolta kasvien latvojen tasolta mitataan $330 \mu\text{mol} / (\text{s} \cdot \text{m}^2)$, mikä toteutui lopulta ilman säätöä tomaattien kasvettua odotettua enemmän korkeutta lähemmäs valaisimia. Valojaksoksi ajastettiin 16 tuntia pimeän jakson ollessa 8 tuntia vuorokausittain.

5.2 Ilmasto

Ilman lämpötilaa, kosteutta ja painetta tarkkailtiin reaaliajassa, tai vaihtoehtoisesti tallennettuna datana, langattomien Ruuvi-sensoreiden avulla, jotka lähettivät dataa myös kuvassa 11 esitetyn matkapuhelinsovelluksen kautta.



Kuva 11. Matkapuhelimen kuvakaappaus ilmastoparametreista [18].

Kullakin osastolla oli oma taginsa, joka sisälsi liike-, lämpötila-, ilmankosteus- ja ilmanpaineanturin [18]. Tagit oli ripustettu narulla 60 cm:n korkeuteen kunkin kasvatusosaston keskelle. Anturit lähettivät mittausdatan 90 sekunnin välein Bluetooth-yhteydellä keskusyksikön kautta etätallentimelle.

Lämpötila

Tavoitelämpötilaksi asetettiin valojakson osalta 22–24 °C ja yöksi laboratorion huoneenlämpö 20–21 °C. Kasvuhuoneessa käytettiin aktiivista ilmanvaihtoa

poistamaan yhteismaksimiteholtaan 2379 W:n valaisinten aiheuttamaa lämpökuormaa [19].

Kasvuhuoneeseen suunniteltiin ja asennettiin kapasiteetiltaan 108 m³ / h kanavapuhaltimella varustettu 100 mm:n tuloilmakanavisto tuomaan viilentävää huoneilmaa kasvuhuoneeseen ja toisaalta pienentämään tilan alipainetta sekä tuomaan tilaan tarvittaessa kosteutta. Kanavapuhallin sijoitettiin kasvatuslaiturin alle, josta imetty viileä ilma ohjattiin kolmen poistoventtiilin kautta kuhunkin kasvuhuoneosastoon.

Lämmennyt ilma imettiin ulos kasvuhuoneen katon rajasta. Kaikille osastoille yhteinen poistoilmapuhallin, Can-Fan Iso Max 160, oli maksimivaihtokapasiteetiltaan 746 m³ / h, mikä riitti laskennallisesti vaihtamaan kasvuhuoneen ilman kerran minuutissa. Tämä oli lämmönhallinnan kannalta riittävästi, sillä päivälämpötilat pysyivät hyvin kontrollissa maksimiarvon oltua 24,18 °C.

Kasvuhuoneen keskiosastolla B lämpötila oli valojakson aikana noin puoli celsiusastetta päätyosastoja korkeampi, mikä johtui huoneilmaa vasten sijainneiden seinien määrästä; päätyosastoilla oli kolme viileämpää seinää, kun taas keskiosastolla niitä oli vain kaksi.

Ilmankosteus

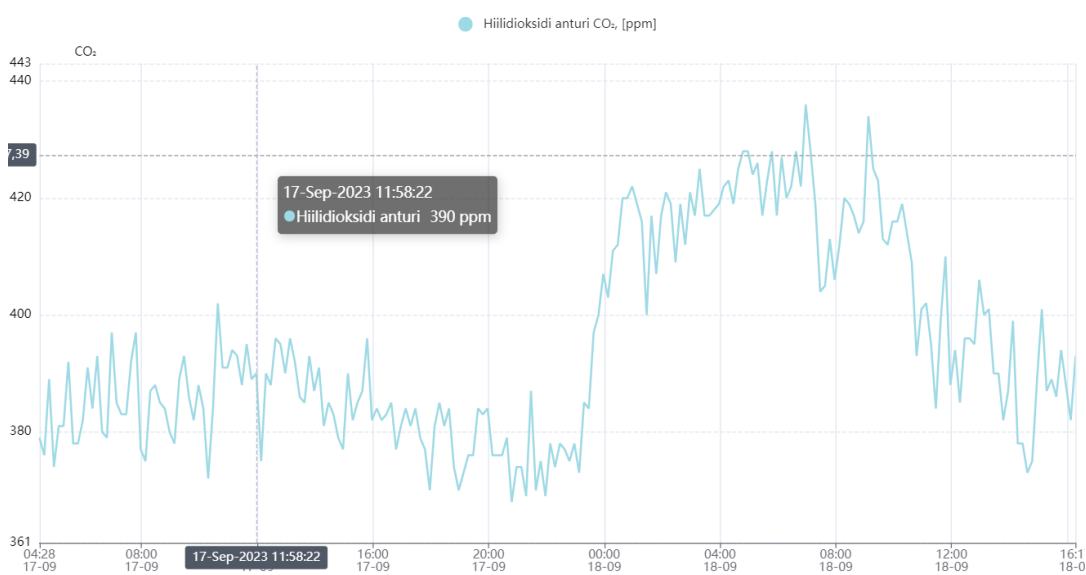
Ilmankosteus on ilman vesihöyrykonsentraatio. Tavoitekosteus asetettiin välille 70–80 % RH. Koska sisäilma on etenkin pienille kasveille liian kuivaa, käytettiin kasvuhuoneessa ilmankostutinta. Ultraääni-ilmankostutin asetettiin kellukseen päälle vesisammioon kasvatuslaiturin ja tuloilmapuhaltimen alle, mistä vesihöyryä siirrettiin kolmihaaraisen tuloilmakanaviston kautta eri kasvatusosastoille.

Järjestely lisäsi kasvuhuoneen ilmankosteutta, joka muutoin seuraili ulkoilman ilmankosteutta, yhdeksästä prosentista yhteentoista prosenttiyksikköön. Silti ulkoilman ollessa erityisen kuivaa valojakson aikana jäätii tavoitearvoista selvästi, kuten kuvasta 11 on todettavissa.

Hiilidioksidipitoisuus

Atmosfäärissä oli vuonna 2023 hiilidioksidia 0,0441 % eli 441 ppm [20]. Tavoite kasvuhuoneen hiilidioksidikonsentraatiolle asetettiin kasveille aktiivisen valoisan jakson osalta keskimääräiseen arvoon 400 ppm. Kasvien kuluttaessa hiilidioksidia yleinen suositus on vaihtaa kasvuhuoneen ilma vähintään kerran minuutissa riittävän pitoisuuden varmistamiseksi. [20.]

Hiilidioksidiarvoja mitattiin ensin reaaliajassa Vaisala GMP252 -anturilla, joka yhdistettiin USB-liittimellä tietokoneeseen. Viikolla seitsemän kasvuhuoneeseen asennettiin seurannan kehittämiseksi langaton Aranet CO₂ -anturi, minkä jälkeen hiilidioksidipitoisuutta tarkkailtiin tietokoneen ruudulta etäyhteydellä [21]. Monitorinäkömää on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Kuvaaja kasvuhuoneen hiilidioksidipitoisuudesta [21].

Kasvukauden mittaustulosten minimiarvo oli 353 ppm maksimiarvon oltua 443 ppm. Valoisan, kasveille aktiivisen ajan keskiarvo jäi kuitenkin alle 400 ppm:n eli hiilidioksidipitoisuudelle asetettu tavoite ei näin ollen täyttnyt.

5.3 Ravinneliuos

Koska tomaatin ravinnetarpeet muuttuvat elinkaaren aikana, ravinneliuos sekoitettiin kolmikomponenttisesta Terra Aquatica -ravinnevalmisteesta, joka on epä-organisen mineraalivalmiste. Laaditun lannoiteohjelman mukaisesti pääravintoaineiden suhde oli ensin niin sanotulla NPK-arvolla mitattuna 20-7-29, mutta reseptiä muutettiin viikolla seitsemän lukemiin 15-10-28 ja viikolla yksitoista edelleen arvoihin 18-11-32.

Ravinneliuoksen vesi otettiin hanasta, ja vesi tulee Päijänteestä. Veden pH (8,4) ja EC-arvot (0,2 mS / cm) mitattiin ennen kokeen aloittamista. Tarkempi HSY:n vedenlaatuanalyysi on esitetty liitteessä 1.

Ravinneliuoksen parametreja mitattiin ja säädettiin Bluelab Pro Connect -laitteella, joka koostui kolmesta erillisestä mittapäädästä, keskusyksiköstä ja neljästä annostelupumpusta. Kolme pumpuista annosteli ravinteita ja yksi pH:n säätöliuosta. Kaikki kolme mittausta olivat jatkuvia. Pumpuille suoritettiin priorisointi ja kalibrointi ennen käyttöönottoa sekä kaksi kalibrointia projektin aikana.

Sähkönjohtavuusanturille suoritettiin yhden pisteen kalibrointi arvossa $EC = 2,77 \text{ mS / cm}$. Kasvien ravinnetarpeiden kasvaessa EC-arvoa nostettiin viikoittain ja asteittain arvosta 0,9 lukemaan 2,1 annostelupumppujen ohjelmoinnin avulla.

pH-anturi kalibroitiin kahdessa mittapisteessä: $pH = 7.0$ ja $pH = 4.0$. Projektin aikana pH-arvo pyrki nousemaan ensimmäisen kuukauden ajan, minkä jälkeen, ilmeisimmin juurten aineenvaihduntatuotteiden takia, pH-arvo pyrki laskemaan. pH-arvo pidettiin pääsääntöisesti välillä 5,5–6,5. Ravintoliuoksen lämpötilaa mitattiin resistiivisellä lämpötila-anturilla.

5.4 Kasvualusta ja kastelujärjestelmä

Projekti päätettiin toteuttaa vesiviljelynä ilman orgaanista kasvualustaa. Kasvualustaksi valittiin viljelytarkoitukseen valmistettu kivivilla, joka on rakenteeltaan huokoinen materiaali, joten kasvien juuret saavat siinä kasvaessaan runsaasti tarvitsemaansa happea. Kivivilla sitoo tehokkaasti vettä, mutta myös kuivuu nopeasti, mikä tarjoaa juurille sopivan kosteustason ja vähentää liikkakastelun mahdollisuutta [22].

Kastelujärjestelmäksi valittiin kiertävä tippukastelujärjestelmä. Vesitankin tilavuus oli 100 litraa. Vesipumppu, Kärcher P3 Garden, varustettiin halkaisijaltaan yhden tuuman imuletkulla. Painelinjasto rakennettiin 20 mm:n PVC-putkesta, johon liitettiin kaksi 6 mm:n NETAFIM-suutinta, -letkua ja -kastelutikkua kutakin kasvia kohden. Suutinten läpäisykapasiteetti oli kaksi litraa tunnissa. Pumppu ajastettiin toimimaan ensin kolmasti vuorokaudessa kolme minuuttia kerrallaan, jolloin kullekin kasveille siirtyi yhteensä kuusi desilitraa vettä päivittäin. Tomaatikasvien vartuttua suuremmiksi kastelujakson pituutta kasvatettiin neljännellä viikolla neljään minuuttiin ja kymmenennellä viikolla viiteen minuuttiin. Viikolla kahdeksan ohjelmoitiin neljäs ja kahdenneltoista viikolla viides päivittäinen kastelukerta. Pumpattavan kasteluliuoksen määrää säädettiin siten, että kullakin kastelukerralla noin 10 % siitä valui juuristoa huuhdellen kouruja pitkin takaisin vesitankkiin.

5.5 Tuholaistorjunta

Biologista tuholaistorjuntaa suoritettiin Biotus Oy:n tuotteilla ennaltaehkäisevästi. Kunkin kasvin juurelle ja oksistoon sijoitettiin yksi pussillinen sekä petopunkkeja että jauhiaiskiilukaisia, joilla torjutaan tomaateilla yleisiä tuholaisia, ja jotka tappavat ravinnoksi käyttämänsä hyönteiset.

Kasvuhuoneessa havaittiin ainoastaan viikoilla kuusi ja seitsemän harsosääskiä, jotka käyttivät ravinnokseen kivivillan pinnalla ja vesikourussa kasvanutta levää. Viikon seitsemän jälkeen tuholaisia ei havaittu.

6 Tulokset

Kokeen kaksitoista kasvia idätettiin siemenistä, joten niiden genetiikka ei ollut välttämättä täysin identtinen, minkä takia varsinaisia johtopäätöksiä ei tehdä. Tuloksia ei myöskään voi yleistää. Kaikki havainnot liittyen tomaattien kasvuun kuitenkin analysoidaan huolellisesti. Havainnoille pyrittiin löytämään tukea kirjallisuudesta, mikä osoittautui osittain hankalaksi osuvien tutkimusten vähyyden vuoksi. Etenkin muun kuin verkkoaineiston löytäminen oli vaikeaa.

Viikoittaisten korkeusmittausten tulokset on esitetty taulukossa 2 (luku 6.1) ja klorofyllimittausten tulokset taulukossa 3 (luku 6.2). Kunkin osaston tulokset on merkitty omalla värillään. Molemmat taulukot on ohjelmoitu laskemaan jokainen viikkokohtainen keskiarvotulos kuten myös kaikkien mittaustulosten keskiarvo oikeanpuoleisiin sarakkeisiin.

6.1 Korkeusmittaukset

Tomaattien kasvua seurattiin 16 viikon ajan kirjaamalla kunkin kasvin korkeus ja valokuvaamalla yksi kunkin ryhmän keskiarvoa parhaiten kuvaava kasvi viikoittain. On kuitenkin todettava, että tomaatin kohdalla kiihtynyt korkeuskasvu ei ole tutkimusten ulkopuolella erityisen toivottava ominaisuus, kuten salaateilla, joilla pituuskasvu lisää satoa. Suurempi tomaattiterttujen välinen etäisyys vaikeuttaa optimaalisten valaistusolosuhteiden luomista keinovalolla; mikäli valaisimia joudutaan nostamaan ylemmäs, jäävät alimmat kasvin osat helposti liian heikolle valolle.

Kasvien korkeus määritettiin ensimmäistä viikkoa lukuun ottamatta senttimetrin tarkkuudella kasvavan latvuksen tasolta. Lähtötilanteessa taimet sijoitettiin kasvuhuoneen eri osastoille siten, että osastolle A asetettiin pienimmät taimet ja osastolle C suurimmat taimet. Huomionarvoista on, että neljännellä viikolla ryhmän A keskiarvopituus ylitti muiden ryhmien vastaavan arvon, kuten taulukossa kaksi on viikon neljä kohdalla lihavoitu.

Taulukko 2. Viikoittaiset korkeusmittausten tulokset ryhmittäisine keskiarvoineen.

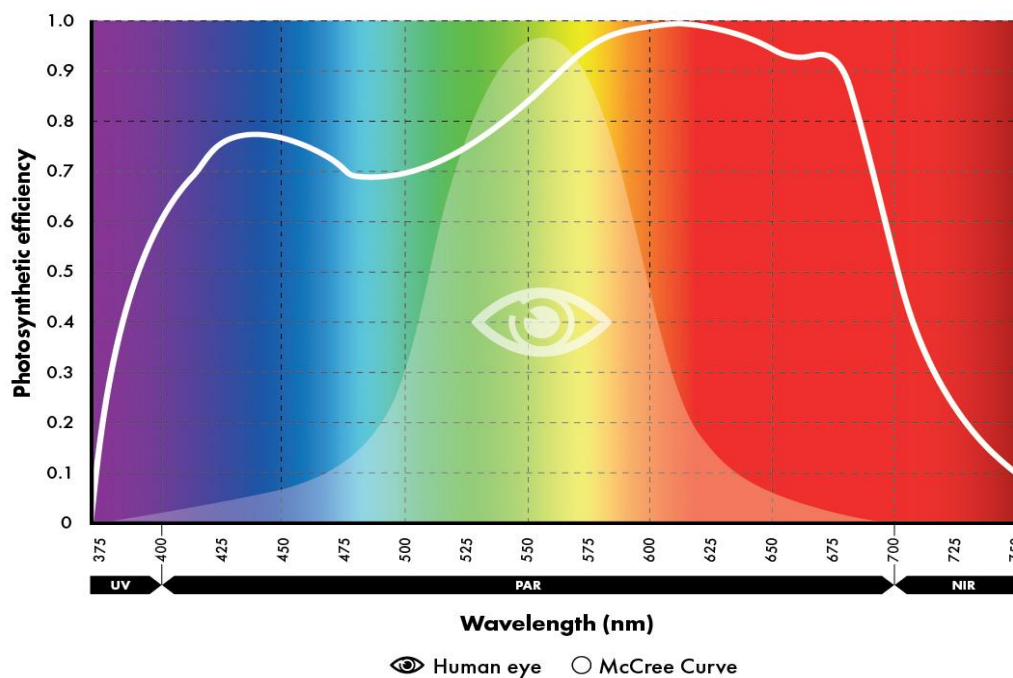
	Osasto A				Osasto B				Osasto C				Viikkokohtaiset keskiarvot ryhmittäin		
	(P:KP=7 + UV)				(P:KP=12.9 + UV)				(P:KP=12,9 – UV)				A	B	C
Kasvi nro.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
Viikko															
1	4	4,5	5	4	4,5	6	4,5	5,5	5	6	5	6	4,25	5,13	5,5
2	8	7	7	6	7	8	7	8	7	7	7	8	7	7,5	7,25
3	12	12	11	11	11	12	12	11	11	11	11	12	11,5	11,5	11,25
4	19	18	18	19	17	18	18	17	17	17	18	19	<u>18,5</u>	<u>17,5</u>	<u>17,75</u>
5	33	28	27	30	30	25	26	25	27	28	26	27	27,67	26,5	27
6	45	39	40	39	39	35	36	36	38	38	37	39	40,75	36,5	38
7	61	52	51	53	48	44	48	47	50	45	47	53	54,25	46,75	48,75
8	77	66	65	69	63	59	63	67	60	64	60	65	69,25	63	62,25
9	92	80	77	85	80	73	73	76	76	77	73	75	83,5	75,5	75,25
10	108	98	91	100	92	91	84	92	92	93	88	94	99,25	89,75	91,75
11	117	110	93	112	95	98	98	102	97	107	91	106	108	98,25	103,3
12	129	122	104	126	104	104	108	114	104	125	99	117	120,3	107,5	111,3
13	142	129	116	135	109	115	116	129	115	138	106	118	130,5	117,3	119,3
14	163	138	128	143	122	130	122	143	131	153	110	121	143	129,3	127,8
15	167	150	148	150	128	154	134	150	144	167	120	130	153,8	141,5	140,3
16	168	168	162	163	157	154	143	154	145	165	140	140	165,3	152	147,5
Kaikkien mittaustulosten keskiarvot ryhmittäin													77,39	70,3	70,33

Testiryhmä A, joka koostui alussa pienimmistä taimista, sai kaksi prosenttia säteilyä UV-alueella ja lisäksi suuremman määrän kaukopunaista valoa (punainen: kaukopunainen = 7). Ryhmän A kasvit kasvoivat lopulta keskimäärin 13,3 cm korkeammiksi kuin kontrolliryhmä B ja 17,8 cm korkeammiksi kuin testiryhmä C. On hyvin dokumentoitu, että suurempi kaukopunaisen ja punaisen valon välinen suhde mallintaa luonnon varjostusefektiiä, jossa kasvien lehdet suodattavat auringon säteilyä punaista ja kaukopunaista valoa eri suhteissa. Varjoon jääneet kasvit, tai kasvin osat, saavat kohonneen aallonpituuksien suhteen laukaisemana signaalin kasvaa enemmän pituutta pois varjosta. [23, s. 837.]

Toinen teoria, joka tukee havaintoja, on "Emerson enhancement effect". Sen mukaan kasveille yhtä aikaa annettu kaukopunainen ja alle 680 nanometrinen säteily tehostavat toistensa vaikutuksia yhteyttämisprosessin osalta. [24.]

Kontrolliryhmä B sai ryhmän A tavoin kaksi prosenttia UV-säteilyä, mutta maltillisemman määrän kaukopunaista valoa (punainen: kaukopunainen = 12,9). Ryhmän kasvit venyivät lopulta keskimäärin 4,5 cm ryhmän C kasveja pidemmiksi, mutta ero ei ollut merkittävä.

Ryhmä C sai saman määrän kaukopunaista (punainen: kaukopunainen = 12,9) säteilyä kuin kontrolliryhmä B, mutta ei UV-säteilyä, ja jäi keskiarvopituudeltaan lyhyimmäksi. Selitys asialle voisi olla se, että ryhmät A ja B hyödynsivät 385 nanometrinen UV-säteilyä energianlähteenä. Asiaa voidaan tarkastella kuvassa 13 esitetyn Mc Cree -kuvaajan avulla.



Kuva 13. Mc Cree -kuvaaja näyttää kasvien suhteellisen yhteyttämistehokkuuden eri aallonpituuksilla [25].

Mc Cree -kuvaajasta voidaan havaita, että 385 nanometrin kohdalla yhteyttäminen tehokkuuskerroin on noin 0,4. Lisäksi UV-säteilyn suurien energisyyden takia fotoneilla on muita spektrin osa-alueita enemmän painoarvoa. 730 nanometrin kohdalla tehokkuuskerroin on noin 0,2.

6.2 Klorofyllimittaukset

Klorofyllimittaukset suoritettiin Konica Minolta SPAD502Plus -mittalaitteella viikoittain samalta korkeudelta kunkin kasvin kahdesta eri lehdestä lehden kolmannes kärjestä tyveen päin. Kirjattu lukema oli näiden mittaustulosten keskiarvo. Tulokset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Tomaattien kasvikohtaiset klorofyllimittaukset SPAD-arvoineen.

	Osasto A (P:KP=6,9 + UV)				Osasto B (P:KP=12,9 + UV)				Osasto C (P:KP=12,9 – UV)				Viikkokohtaiset keskiarvot ryhmittäin		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	A	B	C
Kasvi															
VKO.															
1	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
2	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
3	35,8	29,9	31,1	28,6	27,8	30,5	30,4	33,9	28	30,6	29,8	28,4	31,4	30,7	29,2
4	38,9	38,9	37,8	38,2	41,6	41,2	37,9	39,2	37,6	36,5	35	38,5	38,5	40	36,9
5	44,2	45,4	41,6	41,5	44,9	47,6	46,6	49	47,2	44,8	42,7	43,8	43,2	47	44,6
6	45,6	46,8	46,3	47,1	48,2	48,7	49,1	51,5	47,6	45,1	43,6	43	45,5	49,4	44,8
7	43,3	42,6	42,8	46,2	52,9	48,5	48	52,7	47,7	47,8	45,4	45,4	43,7	50,5	46,6
8	52,4	52,3	53,6	55,8	58	51,9	58,9	57,9	57,7	49,6	48,2	54,7	53,5	56,7	52,6
9	55,2	50,8	49,7	56,8	56,2	58,7	51	56	52,5	55,9	55,2	61,7	55	55,5	56,3
10	60	59,8	51,7	52,8	53,3	56,7	54,3	58,1	61	64,1	58	60,7	56,1	55,6	61
11	49,8	50,7	49,4	46,1	54,6	52,4	49,9	49	50,1	45,7	45,6	52,8	49	51,5	48,6
12	51,9	44,4	51,6	48,5	58,1	50,3	54,5	59,3	46,4	47,3	48,1	39,1	49,1	55,6	45,2
13	46,9	46,7	45,2	45,8	49,5	59,2	53,9	51,9	39,1	43,1	43,8	31,9	46,2	53,6	39,5
14	34,9	38,2	48	42,9	44,8	42,8	45,6	44,9	38,4	43,7	47,1	34,4	41	44,5	40,9
15	41,6	40,2	35,4	37,5	47,1	37,6	38,5	34,5	41,9	47,4	34,7	34,7	38,7	39,4	39,7
16	38,3	33,3	34,6	23,8	39,9	42	39,5	39,7	31,5	37	39,2	33,4	32,5	40,3	35,3
Kaikkien mittaustulosten keskiarvot ryhmittäin												44,45	47,87	44,36	

Solray 385 -spektrin alla kasvanut kontrolliryhmä B antoi useimmilla viikoilla korkeimmat SPAD-arvot. Sen kaikkien viikoittaisten mittausten keskiarvotulos oli muita korkeampi, 47,87. Lisäksi kontrolliryhmän kasvit näyttivät valokuvatarkastelussa muita vihreämmiltä. Ryhmien A ja C kaikkien mittausten keskiarvot olivat hyvin lähellä toisiaan (44,45 / 44,36).

6.3 Kukinta ja sato

Kasvit A1 ja A4 aloittivat kukintansa 36 vuorokauden iässä ja kasvi A3 vuorokautta myöhemmin. Kaikki loput kasvit aloittivat kukintansa 38 vuorokauden kuluttua itämisestä. A-ryhmän kasvit saivat kaukopunaista säteilyä muita enemmän. Havainto vahvistaa käsitystä siitä, että kasvanut kaukopunaisten säteilyn määrä nopeuttaa kukkien muodostumista joillakin pitkän päivän kasvilajeilla, kuten tomaatilla [26].

Hedelmät poimittiin kasvuhuoneesta viidellä eri kerralla ja yhteenlasketut tulokset on esitetty taulukossa 4. Viimeisellä poimintakerralla ryhmissä oli mukana yhteensä 19 vihreää, raakaa, tomaattia, jotka jätettiin pois tuloksista. Ryhmän A tomaatit valmistuivat keskimäärin puolitoista vuorokautta muita nopeammin, mikä ehdottaa, että kaukopunaisten valon lisäys tietyssä suhteessa saattaa nopeuttaa kukkien muodostumisen lisäksi myös hedelmien kypsymistä ja siten koko elinkaarta, mikä olisi kaupallisessa kasvatustoiminnassa merkittävä etu. Ensimmäiset kypsät tomaatit poimittiin 109 vuorokauden kuluttua itämisestä.

Suurimman sadon tuotti ryhmä A. Kaukopunaisten säteilyn onkin todettu lisäävän tomaattisatoa 16 % luonnonvalon lisänä kasvihuoneolosuhteissa [27]. Lukumäärällisesti eniten hedelmiä tuotti kontrolliryhmä B. UV-säteilyä saaneet kasvit tuottivat enemmän hedelmiä kuin ilman sitä jääneet kasvit.

Taulukko 4. Tomaattien lukumäärät ja massat ryhmittäin.

Hedelmien lukumäärät ja massat ryhmittäin			
Kasviryhmä	Lukumäärä	Massa [g]	Keskiarvo [g]
A	86	7456	86,7
B	99	7003	70,7
C	67	6233	93,0

Suurimmat tomaatit tuotti ryhmä C, mutta sato jäi A- ja B-satoa kevyemmäksi pienimmän hedelmälukumääränsä vuoksi. A-sato oli muita satoja 6,7 % ja 19,6 % suurempi.

6.4 Hedelmien laatu

Metropolian bio- ja kemiantekniikan insinööriyöntekijä Johanna Ranta toteutti tomaateilla suunnittelemansa kuuden analyysin sarjan. Osalle kypsistä tomaateista tehtiin aistinvarainen erotustesti ja °Brix-, pH- ja tekstuurianalyysit sekä tiheys- ja värimittaukset. Tulokset esitellään tiivistetysti taulukossa 5. Aistinvaraisessa erotustestissä etenkin ryhmä B erottui ryhmästä C.

Lisäksi Metropolian laboratorioanalytiikan opiskelijaryhmä teki osalle kypsistä tomaateista kokonaisantioksidanttikapasiteettianalyysin mitaten ryhmäkohtaiset FRAP- ja DPPH-arvot. Nämäkin tulokset on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Tulokset laboratorioanalyseista.

Tomaateille tehtyjen analyysien keskimääräiset tulokset			
Osasto	A	B	C
Analyysi (n=4)			
°Brix (T=22,9 °C)	4,13	3,93	3,95
pH (T=22,9 °C)	4,563	4,623	4,621
Tiheys [kg/m ³]	1023,3	1027	1036,5
Tilavuus [ml]	78	67	79
Massa [g]	80	69	82
Tekstuuri (puhkaisuvoima [g])	920,3	762,4	685,4
FRAP [μmol/g]	90	120	90
DPPH (inhibition ratio [%])	35	>50	40

6.5 Tiivistelmä mittaustuloksista

Saaduista tuloksista laadittiin ryhmäkohtaista vertailua varten tiivistelmä.

Ryhmä A (P:KP = 7 + UVA)

- korkeimmat kasvit
- aikaisin kukinta ja hedelmien kypsyminen
- suurin sato
- suurin °Brix-arvo (käytetään erityisesti liuenneiden sokerien mittaamiseen)
- vahvin tekstuurianalyysissä (kuoriosan puhkaisuanalyysi).

Kontrolliryhmä B (P:KP = 12,9 + UVA)

- suurin keskimääräinen SPAD-arvo
- eniten tomaatteja
- pienimmät tomaatit
- erottui aistinvaraisesti ryhmästä C
- korkein FRAP-arvo (120 µmol/g)
- korkein DPPH-arvo (>50 % inhibition ratio).

Ryhmä C (P:KP = 12,9 – UVA)

- matalin kasviryhmä
- suurimmat tomaatit
- vähiten tomaatteja
- pienin sato
- heikoin kuori tekstuurianalyysissä
- punaisimmat tomaatit (CIEL*a*b -väriavaruus)
- erottui aistinvaraisesti kontrolliryhmästä B.

7 Yhteenveto

Greenlux Lighting Solutions Oy:n ja Metropolian yhteinen spektritutkimus voidaan jälkikäteen todeta hyödylliseksi. Projektin aikana pystyttiin havaitsemaan useita koeryhmiin liittyviä, todennäköisimmin valon synnyttämiä, eroavaisuuksia. Etenkin kaukopunaista säteilyä enemmän saaneeseen ryhmään liittyviä huomioita kertyi useita: Aallonpituuden jo dokumentoituja vaikutuksia kasvien korkeuskasvun sääntelijänä, fotosynteesin tehostajana, tomaatin kukinnan aikaistajana sekä sadon lisääjänä ja makeuttajana tuli todettua myös käytännössä [23, s. 837; 24; 26; 27]. Lisäksi tehtiin havaintoja kaukopunaisten säteilyn vaikutuksesta hedelmien kypsyymisaikaan.

385 nanometrinen UV-säteily todettiin osallistuvan yhteyttämiseen. Havainnot säteilyn mahdollisista muista vaikutuksista liittyvät tomaattien makuun, määrään, kokoon, väriin ja joko kuoren rakenteeseen tai paksuuteen, mutta johtopäätöksiä ei tehdä.

Projektin mittaustulokset ovat pääsääntöisesti johdonmukaisia ja hyvin linjassa keskenään. Lisäksi elintarvikelaboratoriossa pienemmällä otannalla tehdyt analyysit hedelmien tilavuuden ja massan osalta ovat samansuuntaiset kuin kaikkien tomaattien punnituksista saadut tulokset.

Kokeesta saatu sato olisi voinut olla paljon suurempikin, mutta projektin aikana kohdattiin ongelmia, joiden takia sato ei ollut optimaalinen. Kasveissa ilmeni alkua viikolta neljä ilmeisimmin magnesiumin puutosta, jonka korjaaminen vei liian kauan aikaa, ja jonka takia kaikki kasvit pudottivat osan kukinnoistaan. Ilmiötä esiintyi yhtäläisesti kaikissa valaistusolosuhteissa ja kasveissa. Lisäksi pH-elektrodin toimintahäiriö viikolla yhdeksän aiheutti ravintoliuoksen automaattisen säädön arvoon 4,2, mikä varmasti vaikutti negatiivisesti uusien kukintojen syntymiseen.

LED-valo ei tuottanut ongelmia. Tomaatit viihtyivät hyvin kaikkien Valoyan valaisinten alla ja kasvoivat reilusti siementoimittajan ilmoittamien mittojen ohi.

Tomaateista piti kasvaa 80 cm korkeita ja 60 cm leveitä sekä kypsyttää tomaatit 120 vuorokaudessa. Niistä tuli lopulta 140–168 cm korkeita ja 75–90 cm leveitä, ja ensimmäinen erä kypsiä tomaatteja poimittiin 109 vuorokauden kuluttua itämisestä.

Tehtyjen havaintojen pohjalta tutkimusta olisi helppo jatkaa valaistuksen erilaisilla säädöillä optimaalisten aallonpituussuhteiden löytämiseksi. Kaukopunaista lisävalaistusta olisi myös mahdollista jaksottaa erilaisilla sykleillä. Mutta mikäli sadontuotto priorisoidaan, projektista saatujen tietojenkin avulla olisi mahdollista kehittää entistä paremmin Saint Pierre -tomaatille soveltuva kasvivalaisinmalli. Sen spektri sisältäisi UVA-säteilyä ja olisi erikseen säädettävä 730 nanometrin säteilyvoimakkuuden osalta. Sama kokonaisspektri voitaisiin toki luoda myös Solray 385 -spektrin ja projektissa käytettyjen himmennettävien BX90- ja C120-lisävalaisinten avulla, jolloin lisäetuna saavutetaan parempi valojakauma.

Lähteet

- 1 Wan, Martin. 2023. A Comprehensive Guide to Light-Emitting Diodes (LEDs). Verkkoaineisto. Ledyilightning. <[https:// www.ledylighting.com/a-comprehensive-guide-to-led/#LED_Manufacturing_Process](https://www.ledylighting.com/a-comprehensive-guide-to-led/#LED_Manufacturing_Process)>. Päivitetty 18.3.2023. Luettu 24.9.2023
- 2 Watson, David. 2018. Introduction to LED. Verkkoaineisto. The engineering projects. <<https://www.theengineeringprojects.com/2018/10/introduction-to-led-light-emitting-diode.html>>. 4.10.2018. Luettu 23.9.2023.
- 3 The wavelength range of LEDs. Verkkoaineisto. Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation. <<https://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/semi-conductor/knowledge/e-learning/discrete/chap5/chap5-3.html>>. Luettu 22.9.2023.
- 4 Säynäjoki, Henri. 2012. Valaisintuotteiden päivittäminen. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 5 Williams, Shakir. 2017. LED Lighting: What is Color Temperature? Verkkoaineisto. HomeElectrical. <<https://www.homeelectrical.com/led-technology-what-color-temperature.6.html>>. 8.8.2017. Luettu 27.9.2023.
- 6 Rice, Christian. 2017. What Are "COB" LEDs and Why Do They Matter? Verkkoaineisto. Siliconlightworks. <<https://siliconlightworks.com/resources/what-are-cob-leds>>. 10.12.2017. Luettu 4.10.2023.
- 7 Mottier, Patrick. 2009. LEDs for lightning applications. London: ISTE Ltd.
- 8 pH Meter Principles And Applications: An Overview. 2022. Verkkoaineisto. Hudson Robotics Inc. <<https://hudsonrobotics.com/ph-meter-principles-and-applications/>>.10.5.2022. Luettu 5.10.2023.
- 9 Connelly, Andy. 2017. Conductivity of a solution. Verkkoaineisto. Wordpress. <<https://andyjconnelly.wordpress.com/2017/07/14/conductivity-of-a-solution/>>. 10.5.2017. Luettu 5.10.2023.
- 10 Putra, P.W.; Sunu, I.W.; Temaja, N.; Sugiarta, I.M.; Sugina, I.W. & Suihya, J. 2019. Investigation on application of ultrasonic humidification for air conditioning system. Verkkoaineisto. IOP Publishing. <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1450/1/012050/pdf>>. 2019. Luettu 7.10.2023.

- 11 Maged, N.; Algahtani, M. & El-Shafier, H. 2021. Development and Evaluation of an Ultrasonic Humidifier to Control Humidity in a Cold Storage Room for Postharvest Quality Management of Dates. Verkkoaineisto. Pubmed. <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33926023/>>. 26.4.2021. Luettu 10.10.2023.
- 12 UltraSonic Air Humidification. Verkkoaineisto. Stulzoceania. <<https://www.stulz.com/en-de/products/detail/ultrasonic/>>. Luettu 13.10.2023.
- 13 Padilla, F.M.; Gallardo, M.; Pena-Fleitas, R.; de Souza, M.T. & Thompson, R.B. 2018. Proximal Optical Sensors for Nitrogen Management of Vegetable Crops: A Review. Verkkoaineisto. Pubmed. <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29958482/>>. 28.6.2018. Luettu 19.10.2023.
- 14 Gianquinto, G.; Sambo, P. & Borsato, D. Determination of SPAD threshold values for the optimisation of nitrogen supply in processing tomato. Verkkoaineisto. International Society for Horticultural Science. <https://www.ishs.org/ishs-article/700_26>. Luettu 27.10.2023.
- 15 The Basic Working Principle of a Spectrometer. 2016. Verkkoaineisto. Azom. <www.azom.com/article.aspx?ArticleID=13364>. 1.12.2016. Luettu 24.10.2023.
- 16 Spectrometer working principles. Verkkoaineisto. Ossila. <<https://www.ossila.com/pages/spectrometer-working-principles>>. Luettu 24.10.2023.
- 17 Valoya Product Brochure. 2023. Verkkoaineisto. Greenlux Lighting Solutions. <https://www.valoya.com/wp-content/uploads/2023/09/EN_Product-Brochure_2023.1-5.pdf>. 2023. Luettu 5.11.2023.
- 18 Langaton lämpötila, ilmankosteus ja ilmanpaineanturi – RuuviTag. 2023. Verkkoaineisto. Ruuvi. <<https://ruuvi.com/fi/ruuvitag/>>. Luettu 5.11.2023.
- 19 Watson, J.A.; Gomez, C.; Buffington, D.E.; Bucklin, R.A.; Henley, R.W. & McConnell, D.B. 2019. Greenhouse ventilation. Verkkoaineisto. University of Florida. <<https://edis.ifas.ufl.edu/publication/AE030>>. 26.11.2019. Luettu 27.10.2023.
- 20 Poudel, M. & Dunn, B. 2023. Greenhouse Carbon Dioxide Supplementation. Verkkoaineisto. Oklahoma State University. <<https://extension.okstate.edu/fact-sheets/greenhouse-carbon-dioxide-supplementation.html>>. 9/2023. Luettu 27.10.2023.

- 21 Aranet CO2 and Temperature sensor. 2023. Verkkoaineisto. Aranet <<https://aranet.com/products/aranet-co2-and-temperature-sensor/>>. Luettu 5.11.2023.
- 22 Kivivilla. Verkkoaineisto. Helsingin Puutarhatarvike. <www.helsinginpuutarhatarvike.fi/category/40/kivivilla>. Luettu 9.11.2023
- 23 Campbell, N.A.; Reece, J.B.; Urry, L.A.; Cain, M.L.; Wasserman, S.A.; Minorsky, P.V. & Jackson, R.B. 2008. Biology. International ed., 8th ed. San Francisco: Pearson/Benjamin Cummings.
- 24 Govindjee, R.G. & Hoch, G. Emerson enhancement effect in chloroplast reactions. Verkkoaineisto. National institutes of health. <www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC550018/pdf/plntphys00410-0010.pdf>. Luettu 5.12.2023.
- 24 Mc Cree curve. Verkkoaineisto. Floraldaily. <<https://www.floraldaily.com/article/9269513/entire-par-range-has-a-function-for-the-crop/>>. Luettu 23.11.2023.
- 25 Runkle, Eric. 2019. Including far red in an LED lighting spectrum. Verkkoaineisto. Michigan State University. <<https://www.canr.msu.edu/floriculture/uploads/files/FR%20in%20lighting%20spectrum.pdf>>. 9.9.2019. Luettu 4.12.2023.
- 26 Halper, Mark. 2023. Far red boosts tomato yields but requires more energy. Verkkoaineisto. Ledsmagazine. <<https://www.ledsmagazine.com/horticultural-lighting/article/14294198/far-red-boosts-tomato-yields-but-requires-more-energy20>>. 22.5.2023. Luettu 4.12.2023.

Liite 1: HSY:n vesianalyysi 2/2023



HSY
Vedenpuhdistus
Käyttölaboratorio



Keskimääräinen vedenlaatu Pitkäkosken ja Vanhankaupungin
vedenpuhdistuslaitoksilla 1.1. - 30.6.2023

Analyysi	Yksikkö	Menetelmä	Puhdistettu vesi		Laatutavoite/ vaatimus ^{c)} enimmäisarvo
			Pitkäkoski	Vanha- kaupunki	
Lämpötila	°C	Sis. menetelmä	4,7	4,0	
Alkaliteetti, HCO ₃ ⁻	* mmol/l	SFS-EN ISO 9963-1:1996**	0,73	0,72	
Ammoniumtyppi, NH ₄ -N	* mg/l	ISO 7150-1:1984**	0,09	0,09	0,5
Kokonaiskloori	* mg/l	SFS-EN ISO 7393-2:2018	0,42	0,47	
Kokonaiskovuus	* °dH	SFS 3003:1987	3,0	3,0	
Org. kokonaishiili, TOC	* mg/l	SFS-EN 1484:1997	1,7	2,0	b)
Permanganaattiluku	* # mg/l	SFS 3036:1981	4,1	4,7	
pH	*	SFS 3021:1979	8,5	8,4	6,5–9,5
Sameus	* FNU	SFS-EN ISO 7027:2016	<0,05	<0,05	a)
Sähkönjohtavuus	* µS/cm	SFS-EN 27888:1994	158	160	2500
Rauta, Fe	* µg/l	SFS 3028:1976	27	<10	200
Alumiini, Al	* # µg/l	SFS-EN ISO 17294-2:2016	4	<3	200
Fluoridi, F ⁻	* # mg/l	Sis. menetelmä DA	<0,1	<0,1	1,5
Kadmium, Cd	* # µg/l	SFS-EN ISO 17294-2:2016	<0,02	<0,02	5,0
Kalium, K	* # mg/l	SFS-EN ISO 11885:2009	1,5	1,5	
Kalsium, Ca	* # mg/l	SFS-EN ISO 11885:2009	20	20	
Kloridi	* # mg/l	Sis. menetelmä DA	5,9	5,6	250
Kromi, Cr	* # µg/l	SFS-EN ISO 17294-2:2016	<0,05	<0,05	50
Kupari, Cu	* # µg/l	SFS-EN ISO 17294-2:2016	0,2	1,0	2000
Lyijy, Pb	* # µg/l	SFS-EN ISO 17294-2:2016	<0,1	<0,1	10
Magnesium, Mg	* # mg/l	SFS-EN ISO 11885:2009	1,7	1,8	
Mangaani, Mn	* # µg/l	SFS-EN ISO 11885:2009	4	<3	50
Natrium, Na	* # mg/l	SFS-EN ISO 11885:2009	7,9	7,7	200
Sinkki, Zn	* # µg/l	SFS-EN ISO 11885:2009	<5	<5	
Sulfaattirikki	# mg/l	Sis. menetelmä DA	8,5	8,7	
Heterotrofinen pes.luku 22°C	* pmy/ml	SFS-EN ISO 6222:1999	0	0	
<i>Escherichia coli</i>	* mpn/100 ml	SFS-EN ISO 9308-2:2014	0	0	0
Koliformiset bakteerit	* mpn/100 ml	SFS-EN ISO 9308-2:2014	0	0	0
Haju, laim.luku 25°C		Sis. menetelmä	0,0	0,0	a)
Maku, laim.luku		Sis. menetelmä	0,0	0,0	a)

* Näyte tutkittu akkreditoidulla menetelmällä, mittausepävarmuudet saa pyydettyäessä

** Muunneltu menetelmä

Analyysi teetetty alihankintana Metropolilab-laboratoriossa.

Se on FINAS-akkreditointipalvelun akkreditoima testauslaboratorio T058, akkreditointivaatimus on standardi SFS-EN ISO/IEC 17025.

a) Käyttäjien hyväksyttävissä eikä epätavallisia muutoksia

b) Ei epätavallisia muutoksia

c) Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista 1352/2015 sekä muutos 683/2017

Liite 2: Tomaattien korkeusmittaukset [cm]

	Osasto A				Osasto B				Osasto C				Viikkokohtaiset keskiarvot ryhmittäin		
	(P:KP=7 + UV)				(P:KP=12.9 + UV)				(P:KP=12,9 – UV)				A	B	C
Kasvi nro.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
VKO.															
1	4	4,5	5	4	4,5	6	4,5	5,5	5	6	5	6	4,38	5,13	5,5
2	8	7	7	6	7	8	7	8	7	7	7	8	7	7,5	7,25
3	12	12	11	11	11	12	12	11	11	11	11	12	11,25	11,13	10,88
4	19	18	18	19	17	18	18	17	17	18	18	19	18,38	17,38	17,88
5	33	28	27	30	30	25	26	25	27	26	28	27	27,67	26,5	27
6	45	39	40	39	39	35	36	36	38	38	37	39	40,75	36,5	37,75
7	61	52	51	53	48	44	48	47	50	45	47	53	54,25	46,75	48,75
8	77	66	65	69	63	59	63	67	60	64	60	65	69,25	63	62,25
9	92	80	77	85	80	73	73	76	76	77	73	75	83,5	75,5	75,25
10	108	98	91	100	92	91	84	92	92	93	88	94	99,25	89,75	91,75
11	117	110	93	112	95	98	98	102	97	107	91	106	108	98,25	103,3
12	129	122	104	126	104	104	108	114	104	125	99	117	120,3	107,5	111,3
13	142	129	116	135	109	115	116	129	115	138	106	118	130,5	117,3	119,3
14	163	138	128	143	122	130	122	143	131	153	110	121	143	129,3	127,8
15	167	150	148	150	128	154	134	150	144	167	120	130	153,8	141,5	140,3
16	168	168	162	163	157	154	143	154	145	165	140	140	165,3	152	147,5
Kaikkien mittaustulosten keskiarvot ryhmittäin													77,39	70,3	70,33

Liite 3: Tomaattien klorofyllimittaukset

	Osasto A (P:KP=7 + UV)				Osasto B (P:KP=12.9 + UV)				Osasto C (P:KP=12,9 – UV)				Viikkokohtaiset keskiarvot ryhmittäin		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	A	B	C
Kasvi nro.															
VKO.															
1	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
2	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
3	35,8	29,9	31,1	28,6	27,8	30,5	30,4	33,9	28	30,6	29,8	28,4	31,4	30,7	29,2
4	38,9	38,9	37,8	38,2	41,6	41,2	37,9	39,2	37,6	36,5	35	38,5	38,5	40	36,9
5	44,2	45,4	41,6	41,5	44,9	47,6	46,6	49	47,2	44,8	42,7	43,8	43,2	47	44,6
6	45,6	46,8	46,3	47,1	48,2	48,7	49,1	51,5	47,6	45,1	43,6	43	45,5	49,4	44,8
7	43,3	42,6	42,8	46,2	52,9	48,5	48	52,7	47,7	47,8	45,4	45,4	43,7	50,5	46,6
8	52,4	52,3	53,6	55,8	58	51,9	58,9	57,9	57,7	49,6	48,2	54,7	53,5	56,7	52,6
9	55,2	50,8	49,7	56,8	56,2	58,7	51	56	52,5	55,9	55,2	61,7	55	55,5	56,3
10	60	59,8	51,7	52,8	53,3	56,7	54,3	58,1	61	64,1	58	60,7	56,1	55,6	61
11	49,8	50,7	49,4	46,1	54,6	52,4	49,9	49	50,1	45,7	45,6	52,8	49	51,5	48,6
12	51,9	44,4	51,6	48,5	58,1	50,3	54,5	59,3	46,4	47,3	48,1	39,1	49,1	55,6	45,2
13	46,9	46,7	45,2	45,8	49,5	59,2	53,9	51,9	39,1	43,1	43,8	31,9	46,2	53,6	39,5
14	34,9	38,2	48	42,9	44,8	42,8	45,6	44,9	38,4	43,7	47,1	34,4	41	44,5	40,9
15	41,6	40,2	35,4	37,5	47,1	37,6	38,5	34,5	41,9	47,4	34,7	34,7	38,7	39,4	39,7
16	38,3	33,3	34,6	23,8	39,9	42	39,5	39,7	31,5	37	39,2	33,4	32,5	40,3	35,3
Kaikkien mittaustulosten keskiarvot ryhmittäin												44,45	47,87	44,36	