



Luonnonvara- ja
biotalouden
tutkimus 13/2017

LED-valotusta kasvihuoneeseen

Tutkimustuloksia ja kokemuksia 2016

Timo Kaukoranta, Kari Jokinen, Juha Näkkilä ja Liisa Särkkä

LED-valotusta kasvihuoneeseen

Tutkimustuloksia ja kokemuksia 2016

Timo Kaukoranta, Kari Jokinen, Juha Näkkilä ja Liisa Särkkä

Kaukoranta, T., Jokinen, K., Näkkilä, J. ja Särkkä, L. 2017. LED-valotusta kasvihuoneeseen. Tutkimustuloksia ja kokemuksia 2016. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 13/2017



ISBN: 978-952-326-369-7 (Painettu)

ISBN: 978-952-326-370-3 (Verkkojulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkojulkaisu)

URN: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-370-3>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Timo Kaukoranta, Kari Jokinen, Juha Näkkilä, Liisa Särkkä

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2017

Julkaisuvuosi: 2017

Kannen kuva: Timo Kaukoranta

Painopaikka ja julkaisumyynti: Juvenes Print, <http://luke.juvenesprint.fi>

Lyhyesti

Timo Kaukoranta, Kari Jokinen, Juha Näkkilä ja Liisa Särkkä
Luonnonvarakeskus

Vuosikymmenen kehityksen jälkeen LED-valaisimet ovat saavuttaneet riittävän sähkön käytön hyötysuhteen ja valon tuoton, jotta ne voivat vähitellen syrjäyttää kasvihuoneista 30 vuotta hallinneen kaasupurkausvalaistuksen. Kokeissa ja käytännössä kasvihuoneissa on viimeisen vuoden aikana osoitettu, että LED-valaisimilla voidaan tällä hetkellä saavuttaa 30–50 % säästö valaistuksen sähkön käytössä. Muutos kasvihuoneissa on nyt alkamassa ja on hyvä aika auttaa tiedonvaihtoa muutoksen toteuttamisessa.

Kehitys jatkuu edelleen, mutta hidastuen. LED-valaisimia kasvihuoneisiin tarjoavat nyt monet kumppaneina vakavasti otettavat yritykset Euroopasta, Pohjois-Amerikasta ja Aasiasta. Suomessa valaisimia tarjoaa toistaiseksi kuitenkin vain muutama yritys.

LED-valaisimien käytöstä on kuultu kokemuksia suomalaisilta viljelijöiltä. Viljelyssä on muutettava muutakin kuin valaisimet, mutta viljelijöiden kokemuksen mukaan valaisimet ovat nyt toimivia Suomen oloissa.

Kaasupurkausvalaisimilla, kuten HPS, valon spektri on jokseenkin valaisimen ominaisuuksien sanelema, mutta nyt valaisimia todella suunnitellaan kasvien spektrivaatimusten mukaan. Rajoituksena ei ole enää valaisimen tekniikka, vaan tieto kasvatuksessa taloudellisesti parhaiten toimivasta spektristä. Spektri on erityisen tärkeä Suomessa, jossa keskitalvella ei ole juuri lainkaan auringon valoa. Etelämpänä ja muina vuodenaikoina auringon valo korjaa valaisimien vajavaista spektriä.

Korvattaessa korkeapainenatrium- eli HPS-valaisimet LED-valaisimilla siirretään suuri osa kustannuksista sähkökustannuksista pääomakustannuksiksi. Haarukoimme odotettujen kokonaisinvestointien suuruusluokkaa, korvausinvestoinnin kannattavuutta ja investoinnin ajoituksen merkitystä.

LED-valaisimien alempi lämmöntuotto mahdollistaa valotuksen laajemman käytön myös kilpailevilla tuotantoalueilla. Arvioimme, miten se vaikuttaa kilpailuasetelmaan suomalaisen tuotannon kanssa.

Alempi lämmöntuotto ja spektrin muokkaaminen tuovat myös mahdollisuuden ruukkuvihannesten kerrosviljelyyn. Kerrosviljelyssä kasvit ovat kasvihuoneen yhden kerroksen sijasta monessa kerroksessa kokonaan keinovalolla kasvavina. Se on erityisen kiinnostavaa Suomessa, jossa auringon valoa on hyvin vähän lokakuusta tammikuuhun. Kerrosviljelyn kannattavuudessa suhteessa kasvihuoneviljelyyn on kaksi keskeistä asiaa: sähkön käytön tehokkuus sekä lämmön- ja kosteuden vaihdon kustannukset verrattuna kasvihuoneviljelyyn.

Lopulta arvaillaan tulevaisuuden mahdollisuuksia, jotka juontuvat LED-valaistuksen toteutuksen joustavuudesta.

Tämä Luken raportti vuonna 2017 on myös ruotsinkielisenä nimellä 'Ledbelysning i växthus' kirjoittajina Kaukoranta, Jokinen, Näkkilä, Särkkä, Lindqvist.

Asiasanat: Kasvihuoneviljely, kasvihuonevalaistus, LED, HPS, energia.

Sisällys

1. Johdanto	5
2. Säteily, PAR, yhteyttäminen.....	6
2.1. Auringon säteilyteho, sähköteho, valon intensiteetti ja määrä.....	6
3. Valaisimet	9
3.1. Valaisimista lämpöä	9
3.2. Tavallisimpia LED-valaisimien spektrejä	10
3.3. Valaisimien elinikä	12
3.4. Luotettavuus: valon intensiteetin säilyminen, rikkoutuminen, värien säilyminen.....	12
3.5. Valotuksen suunnittelu	16
4. Kokemukset viljelyssä	20
4.1. Tomaatti.....	20
4.2. Kurkku	21
4.3. Salaatit, yrtit.....	24
5. LED-investoinnin kannattavuus	27
5.1. Vaaditusta takaisinmaksuajasta valaisimen hintaan	27
5.2. Hyötysuhde paranee – kannattaako lykätä investointia	30
6. Kerrosviljelyn kilpailukyky	32
6.1. Kerrosviljely.....	32
6.2. Sähkökustannuksen vertailu	33
7. Investointitarve LED-valotukseen ja vaikutus energian kulutukseen.....	37
8. Valon käyttö kasvustossa ja kasvin ohjaaminen valolla.....	39
8.1. Valon vaikutus pidemmällä aikavälillä yhteyttämiskapasiteettiin	39
8.2. Valon aallonpituuskaistojen käyttö yhteyttämiseen	41
8.3. Valon aallonpituuskaistojen käyttö kasvin säätöön	42
8.4. Valon värien käyttöä laadun tekemiseen täytyy parantaa	45
9. LED-valotus eurooppalaisessa kasvihuonetuotannossa.....	48
9.1. Kilpailijoiden energian käytön strategia	48
9.2. CO ₂ -päästöjen erot	51
10. Valotustekniikan tulevaisuus.....	53
10.1. Valon hinnan kehityssuunta.....	53
10.2. Muusta valaistuksesta vielä uusia ideoita.....	54
Viitteet ja aiheeseen liittyvää oheiskirjallisuutta	58
Kiitokset	60

1. Johdanto

LED-valaisimet tulevat HPS-valaisimien rinnalle

Intensiivinen kasvien valottaminen alkoi Pohjoismaissa käyttäen korkeapainenatriumlamppuja (HPS). HPS-valaisimien lämpöteho suhteessa kasvien yhteyttämiseen sopivan valon voimakkuuteen on niin suuri, että voimakasta valotusta on voitu käyttää vain Suomessa ja Norjassa. Kasvihuoneviljelyn valta-alueilla Keski-Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa on käytetty pieniä tehoja tasoittamaan pilvisiä jaksoja. Vuosien kehittämisen jälkeen LED-teknologialla voidaan nyt tehdä valaisimia, jotka tuottavat riittävästi valoa kasvihuonekäyttöön ja joiden sähkön käytön tehokkuus valon tuotossa on oleellisesti parempi kuin HPS-valaisimissa. LED-teknologia on lopulta tuomassa valotuksen kasvihuoneviljelyn valtavirtaan, mikä on tuonut paljon uusia valaisinvalmistajia markkinoille ja lisännyt vahvasti tutkimusta kasvien valotuksesta. HPS-valotuksen aika ei kuitenkaan näytä päättyvän piankaan. Se hallitsee edelleen valtaosaa valotuksesta ja HPS-valotuksen ala, yksin tai yhdistettynä LED-valotukseen kasvaa edelleen.

Toistuuko elektroniikkatuotteiden markkinoiden tavallinen kehityskaari

LED-teknologia on osa puolijohdeteknologiaa ja siten osa globaalia elektroniikkateollisuutta. Jos LED-valoteknologian kehitys seuraa elektroniikkateollisuuden yleisiä toimintamalleja, alussa on runsaasti pieniä edelläkävijäyrityksiä. Teknologian noustessa laajaan käyttöön, johtaviksi nousevat ne yritykset, joiden tuotekehitys ja markkinointivoima ovat parhaat. Kehityksen alkuvaiheessa, ja osittain edelleen, vakavasti otettavien kasvihuoneisiin valaisimia tuottavien yritysten määrää on rajoittanut toisaalta korkealaatuisen LED-teknologian hinta ja toisaalta tarve selvittää eri kasveille ja kasvatusympäristöille optimaalinen valon värien suhteet ja valon kokonaisvoimakkuus.

Niiden selvittäminen ei ole erityisen kallista teknologiakehityksen mittapuulla tarkasteltuna – muutamien satojen tuhansien eurojen hintaluokkaa – mutta kasvien kanssa toimiminen vaatii tietämystä ja aikaa. Lopulta, kun teknologia ja tieto valojen käytöstä kasvien kasvatuksessa vakiintuvat, suuret yritykset todennäköisesti dominoivat markkinoita. Toisaalta tehokkaat ja nopealiikkeiset, alihankintana valaisimia teettävät yritykset voivat nousta markkinoimaan erilaisia valaisimia viljelijöille.

LED-valaisimia tuottavia yrityksiä Euroopassa

Vuonna 2016 maailmassa toimii muutama kymmenen kasvihuoneiden LED-valaisimia valmistavaa yritystä, joilla on laajempaa näyttöä valaisimien käytöstä viljelmillä. Euroopassa toimivat ainakin nämä yritykset: suomalaiset *Netled* ja *Valoya*, hollantilaiset *Philips* ja *Lemnis Oreon*, ruotsalainen *Heliiospectra*, saksalaiset *AUVL*, *Union Power Star* ja USA:sta *PARsource*, *Illumitex*, *Fluence Bioengineering*, *LumiGrow*. Eräät japanilaiset ja korealaiset yritykset ovat katsoneet Suomen markkinoita. Kaikki pystyvät periaatteessa tarjoamaan valaisimia pienitehoisista välivaloista erityyppisiin ylävaloihin. Suomessa myös *Kasvua* on tarjonnut LED-valotusratkaisuja. Suomalainen yritys *ArrantLight* on valmis tuottamaan valaisimia myös kasvien valottamiseen.

Tietoa yrityksissä ja yksityiskohtia tutkimuksesta

Nyt kun olemme vielä kasvihuoneiden valotusteknologian voimakkaassa muutosvaiheessa, on kiinnostavaa koota uusin tieto. Teknologiaa kehittävät yritykset ja sitä testaavat laajalti viljelijät. Julkuesta tutkimuksesta nousee juuri nyt uutta tietoa valon spektrin käyttömahdollisuuksista ja uusista valotussovelluksista.

Kiitokset viljelijöille

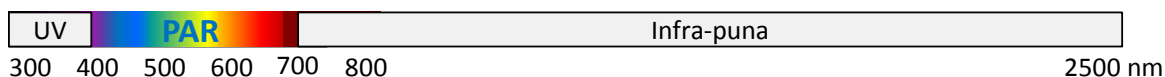
Kiitämme erityisesti viljelijöitä, jotka kertoivat kokemuksistaan LED-valotuksen käyttöönotosta sekä alan tunteville Kjell Brännäsille Maa- ja metsätalousministeriöstä ja Juha Ossille Pohjanmaan ELY-keskuksesta.

2. Säteily, PAR, yhteyttäminen

2.1. Auringon säteilyteho, sähköteho, valon intensiteetti ja määrä

Fotosynteettisesti aktiivinen säteily – PAR

Auringon kokonaissäteilyn (globaalisäteily) energiasta tai fotoneista on 45–50 % kasvien yhteyttämisessä käyttökelpoista eli fotosynteettisesti aktiivista (PAR = photosynthetically active radiation, aallonpituus 400–700 nm) (Kuva 1). Pieni osa kokonaissäteilystä on ultraviolettialueella (UV-A 315–400 nm, UV-B 280–315 nm), ja vajaa puolet säteilystä on infrapuna-alueella (IR = infra red, 700–2500 nm), jota kasvit eivät käytä yhteyttämisessä. Infrapunaisen kaistan alussa on kaukopunaisen alue (FR = far red, 710–850 nm). PAR-säteilynkään käyttö kasveissa ei ole erityisen tehokasta. Vain pieni osa kasviin tulevasta energiasta sitoutuu kemialliseksi energiaksi ja loppu muuttuu lopulta lämmöksi kasveissa tai kasvihuoneen rakenteissa (Taulukko 1).



Kuva 1. Auringon valon spektri.

Kasvien kehitykseen vaikuttavat myös valon aallonpituuskaistojen (band) keskinäiset suhteet, kuten punaisen ja sinisen valon sekä punaisen ja kaukopunaisen suhde. Infrapunasäteily lämmittää kasveja, mutta se vaikuttaa epäsuorasti myös kehitykseen, koska kasvin osien lämpötila vaikuttaa kasvisolujen laajuuskasvuun ja niiden ottamaan osuuteen yhteyttämisen tuottamasta rakennusmateriaalista. UV-säteily vaikuttaa kasvien pinnan ja vahakerroksen paksuuteen sekä kasvien väritymiseen.

Taulukko 1. Auringon tai tyypillisen valaisimen kokonaissäteilyn (W/m^2) energiasta UV-, PAR- ja infrapunasäteilyn osuus. Suuruusluokka auringon tai valaisimen tuottamasta säteilystä, joka sitoutuu yhteyttämisessä tai muuttuu lämmöksi.

	UV %	PAR %	IR %	Sitoutuu yhteytt. %	Säteilystä lämmöksi %
Aurinko	4	49	47	3	97
HPS-valaisin	0	30–40	50–70	3	97
LED-valaisin	0	80–95	5–20	5	95

Auringon wateista ja sähkö-wateista valomooleja

Auringon ja eri valaisimien PAR-säteilyn intensiteetin mittaamisessa on käytännössä vakiintunut fotosynteesissä käyttökelpoisten fotonien virta per ja pinta-ala (photosynthetic photon flux density, PPFD). Tavallinen yksikkö on $\mu\text{mol/s/m}^2$ (mikromooleja neliölle sekunnissa, mikro = miljoonasosa). Auringon kokonaissäteilyn voimakkuudesta (irradianssi, intensiteetti) W/m^2 voi laskea auringon tuottaman PAR-säteilyn intensiteetin mikromooleina. Auringon valon valotehokkuus on 2,3. Se vaihtelee jonkun verran pilvisyyden ja auringon korkeuden mukaan, mutta käytännössä sillä ei ole merkitystä. Paljon merkityksellisempää on arvio siitä, kuinka paljon auringon säteilystä tulee kasveihin.

Auringon PAR-säteily : $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s} = 2,3 \times \text{Kokonaissäteily } \text{W}/\text{m}^2$

Uusien HPS-polttimoiden valotehokkuus sähköstä PAR-säteilyksi (electricity to photon conversion efficiency) on 1,5–1,85 $\mu\text{mol}/\text{J}$ ($\mu\text{mol}/\text{J} = [\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}] / [\text{W}/\text{m}^2]$). Suurin se on 1000 watin polttimoita käytettäessä.

Nykyisten LED-valaisimien valotehokkuudeksi ilmoitetaan 1,5–2,6 $\mu\text{mol}/\text{J}$ (Taulukko 2). Parhaat LED-valaisimet siis tuottavat kasvihuoneeseen PAR-säteilyä ja lämpöä samassa suhteessa kuin aurinko. Tosin auringon lämpö tulee kokonaan lämpösäteilynä ja LED-valaisimen lämpö karkeasti puoliksi säteilynä. Toinen puoli johtuu tai ajetaan valaisimen tuulettimella ilmaan, jos sitä ei nestejäähdytyksellä siirretä suoraan valaisimesta kasvihuoneesta ulos.

Taulukko 2. Valotehokkuus μmol PAR-säteilyä / J energiaa tai μmol PAR-säteilyä / kWh energiaa). Valaisimissa energia on sähköenergiaa. kWh = 3 600 000 J. mol = 1 000 000 μmol .

	Valotehokkuus $\mu\text{mol} / \text{J}$	Valotehokkuus mol / kWh
Aurinko	2,3	8,28
HPS-valaisin	1,6–1,85	5,76–6,66
LED-valaisin	1,5–2,6	5,4–9,36

Yhteyttämisen määrä per aika (vuorokausi, viikko, kuukausi) ja siitä syntyvä kasvu on suunnilleen suoraan suhteessa kertyneeseen PAR-säteilyn määrään, kun säteilyn taso on kohtuullinen. Valon käytön tehokkuuteen tietysti vaikuttaa CO₂-pitoisuuden ja lämpötilan suhde ja haihduntastressi.

Valaisimen tai auringon tuottaman PAR-säteilyn summan (määrän) voi arvioida taulukon 3 mukaan. PAR-säteilyn summasta päivässä mooleina käytetään termiä Daily Light Integral (DLI). DLI:n yksikkö on mol/m^2 (fotoneja moolia neliölle).

Taulukko 3. PAR-säteilyn summan (S) mooleina arviointi auringon kokonaissäteilyn summasta (R) tai valaisimen sähkötehosta ja käyttöajasta. Mittayksiköt on merkitty mukaan hakasuluissa. (mol = 1 000 000 μmol)

Säteilylähde	Säteilyn yksikkö	PAR-kertymä mol/m^2
Aurinko	kWh/m^2	$S = R \times \text{Läpäisevyys} / 100 \times 3,6 \times \text{Valotehokkuus}$ $[\text{mol}/\text{m}^2] = [\text{kWh}/\text{m}^2] \times [\%] / 100 \times 3,6 [\text{MJ}/\text{kWh}] \times [\mu\text{mol}/\text{J}]$
Aurinko	MJ/m^2	$S = R \times \text{Läpäisevyys} / 100 \times \text{Valotehokkuus}$ $[\text{mol}/\text{m}^2] = [\text{MJ}/\text{m}^2] \times [\%] / 100 \times [\mu\text{mol}/\text{J}]$
Valaisin	W/m^2	$S = \text{Sähköteho} \times \text{Käyttöaika} \times 0,0036 \times \text{Valotehokkuus}$ $[\text{mol}/\text{m}^2] = [\text{W}/\text{m}^2] \times [\text{h}] \times 0,0036 [\text{MJ}/\text{Wh}] \times [\mu\text{mol}/\text{J}]$
Valaisin	kWh/m^2	$S = \text{Sähköenergia} \times 3,6 \times \text{Valotehokkuus}$ $[\text{mol}/\text{m}^2] = [\text{kWh}/\text{m}^2] \times 3,6 [\text{MJ}/\text{kWh}] \times [\mu\text{mol}/\text{J}]$

Kasvihuoneen säätödatasta arvioidun auringon PAR-summan tarkkuutta heikentää jonkun verran se, että kasvihuoneiden kokonaissäteilyn anturit eivät ole yleensä tarkkoja. Ne ovat epästandardeja, vinossa ja likaisia. 10 prosentin virhe on tavallinen. Anturi näyttää jokseenkin oikein, jos säätöjärjestelmä pilvettömän keskikesän päivän jälkeen näyttää säteilykertymäksi 8,1–8,3 kWh/m² tai 29–30 MJ/m² ja päivittäinen säteilykäyrä on symmetrinen aurinkoajan mukaisen keskipäivän suhteen. Vaikka säteilysumma ei olisi aivan oikein, se voidaan karkeasti korjata korjauskertoimella, kunhan säätöjärjestelmän antama päivän säteilykäyrä on symmetrinen suhteessa aurinkoajan mukaiseen keskipäivään. Kasvihuoneen lasin läpäisevyys kohtisuoraan voi olla yli 90 %, mutta päivän aikana lasin alle tulee auringon säteilystä vain 60 (talvi) – 80 % (kesä). Varjostusverhojen eteen vedetty osa ottaa siitä osan pois. Esim. 40 % reikää varjostusverhossa päästää 40 % läpi.

Taulukon 3 kaavoja voi käsitellä normaalisti, joten auringon ja valaisimen säteilysummia voi laskea yhteen, ja kaavoista voi ratkaista tarvittavan valotuksen sähkötehon tai valotusajan, kun halutaan saavuttaa tietty valosumma mol/m²/vrk. Esimerkiksi, jos aikaisemman kokemuksen mukaan viljelyssä käytetään ylävalon asennustehona 200 W/m² HPS-valaisimista (hyötysuhde 1,8 µmol/J) ja valotusaika on 20 h/vrk, saadaan HPS-valaisimista säteilysumma (S):

$$S = 200 \text{ W/m}^2 \times 20 \text{ h} \times 0,0036 \text{ MJ/Wh} \times 1,8 \text{ µmol/J}$$

$$S = 26 \text{ mol/m}^2/\text{vrk}$$

Jotta sama säteilysumma (S) saavutetaan LED-valaisimella, LED-valaisimen (jos valotehokkuus on 2,3 µmol/J ja valotusaika 20 tuntia) sähkötehon on oltava:

$$\text{Sähköteho} = S / (\text{Käyttöaika} \times 0,0036 \times \text{Valotehokkuus})$$

$$\text{Sähköteho} = 26 / (20 \times 0,0036 \times 2,3) = 157 \text{ W/m}^2$$

Hyvän LED-valaisimen spektristä johtuen sen moolit käytetään kasvuun yleensä vähän paremmin kuin HPS-valaisimen tuottamat moolit, joten 157 watin tehosta voi vielä nipistää joitakin kymmeniä prosentteja pois.

3. Valaisimet

3.1. Valaisimista lämpöä

Lämpö pois passiivisesti johtumalla tai aktiivisesti tuulettimella tai nestejäähdytyksellä

Osassa suuritehoisista valaisimista on tuuletin lämmön siirtämiseen aktiivisesti nielusta ilmaan. Lämpö voi johtua myös nestekierto, joka vie lämpöä pois. Periaatteessa valaisimet, joissa on aktiivinen jäähdytys, voidaan tehdä pienemmiksi. Vaikka ylimääräiset liikkuvat osat lisäävät valaisimien vika-mahdollisuuksia, valmistajien mukaan tuuletin kestää LED-valaisimen normaalin käyttöä. Tuuletin ei kuluta merkittävää osaa suuritehoisen valaisimen kokonaistehosta eikä lisää merkittävästi suuritehoisen valaisimen hintaa.

Lämpöä infrapunasäteilynä tai ilmavirtauksessa, jopa puhallettuna kasveihin

Kun lämpö siirtyy passiivisesti valaisimen rungosta ilmaan, siirtymismekanismi on johtuminen ilmaan ja lämmenneen ilman kulkeutuminen edelleen ilmavirtauksen mukana (konvektio). Osa lämmöstä siirtyy valaisimesta säteilemällä (infrapunasäteily) ilman läpi, jolloin se kulkee suoraan lähimpään kasvin pintaan tai kasvihuoneen pintaan.

Suuritehoisen LED-valaisimen tuulettimen suuntaamisella voi olla merkittävä vaikutus lämmön hyödyntämiselle kylmässä ilmastossa. Tuuletin voi suunnata lämmön ylöspäin pois kasveista tai alaspäin kasveja kohti. Valaisimista ilmaan johtuvan tai poispäin kasveista tuuletetun lämmön hyödyntämistä voi parantaa kierrättämällä ilmaa kasvihuoneen tuulettimilla, mutta tämän merkityksestä lämmön hyödyntämisessä ei ole vielä kokemusta.

HPS-valaisin lähettää moninkertaisesti enemmän infrapunasäteilyä kuin LED-valaisin

HPS-polttimon tuottaman säteilyn (valon) spektri on lähes kokonaan PAR-alueella, mutta valaisimen sähkötehosta vain noin 30 % muuttuu PAR-valoksi. Loppu lämmittää polttimoa ja valaisimen kuorta. HPS-polttimon pintalämpötila on 350–400 °C, HPS-valaisimen kuoren 60–80 °C.

Nykyisten LED-valaisimien tuottama säteily on haluttaessa kokonaan PAR-alueella. Pieni osa voi olla tarkoituksella kaukopunaisen alueella tai jopa UV-alueella. Valaisimen ledien tuottamassa säteilyssä ei ole, mahdollisen kaukopunaisen lisäksi, infrapunasäteilyä, mutta LED-valaisinkin lämpenee ilman aktiivista jäähdytystä noin 40–50 °C lämpöiseksi, ahtaassa paikassa jopa kuumemmaksi.

Koska valaisimen lähettämä infrapunasäteily on suhteessa valaisimen pintalämpötilan neljanteen potenssiin (lämpötila kelvin-asteina, kelvin = 273 + celsius), HPS-valaisin lähettää moninkertaisesti enemmän infrapunasäteilyä kuin LED-valaisin. Infrapunasäteily pysähtyy kasvien lehtiin ja hedelmiin sekä kasvihuoneen rakenteisiin lämmittäen niitä. LED-valaisimien muodosta, ja mahdollisesta aktiivisesta jäähdytyksestä, riippuen suurempi osa sen tuottamasta lämmöstä johtuu ilmaan kulkematta suoraan kasveihin.

100 W asennustehoa on sekä HPSillä että LEDeillä lähes 100 W lämpöä

LED-valaisimen LEDeistä lähettämä säteily on lähes kokonaan PAR-säteilyä, toisin kuin HPS-valaisimen säteily. Valaisimen tai auringon PAR-säteilystäkin kuitenkin vain 3–5 % muuttuu yhteyttämisessä kemialliseksi energiaksi, joka käytetään kasvuun. Loppu imeytyy kasveihin lämpönä. Tämän vuoksi 100 wattia valotuksen asennustehoa on noin 95 wattia lämpöä riippumatta siitä, onko valaisin HPS- vai LED-tyyppinen. Ero lämmön tuotossa on siinä, että 100 watin HPS-valaisin voidaan tällä hetkellä korvata 50–70 watin LED-valaisimella.

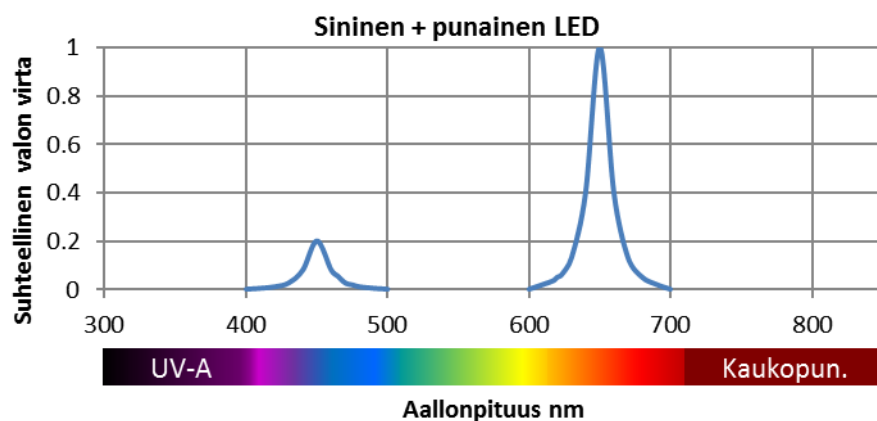
Lämmön tuoton näkökulmasta 100 watin tehoinen HPS-valaisin on siis 95-wattinen säteilylämmitin. 50 watin LED-valaisin on 40–60-asteinen lämpöputki tai, jos siinä on puhallin lämmön poistoon, pienitehoinen lämpöpuhallin.

3.2. Tavallisimpia LED-valaisimien spektrejä

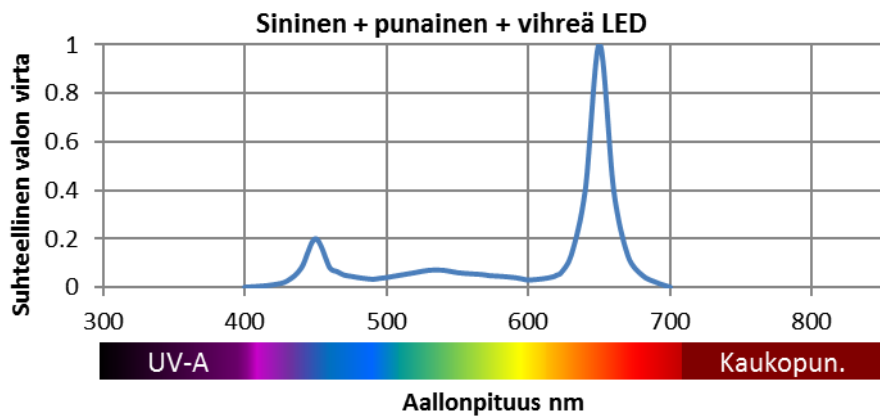
LED- ja HPS-valaisimien spektrejä

Kuvissa 2–5 on joitakin tavallisia LED-valaisimessa käytettyjä spektrejä. Käyrän korkeus havainnollistaa valon voimakkuutta aallonpituuksittain. Kaikki spektrit on standardoitu jakamalla valaisimen suurimman valon voimakkuuden arvolla ($\mu\text{mol/s/nm}$), jolloin lopputulos on valon suhteellinen voimakkuus välillä 0–1. Tuotetun valon spektriin ei suoraan vaikuta LED-valaisimen teho, joka nyt 2016 on 40 watista 650 wattiin.

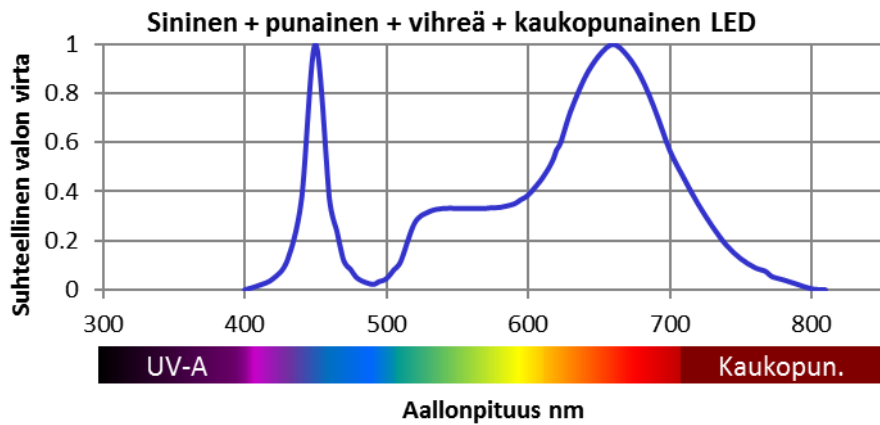
- Yleisin spektri vihannesviljelyyn sopiville LED-valaisimille on 80–90 % syvänpunaista täydennettynä 10–20 % määrällä sinistä (Kuva 2).
- Näitä voidaan täydentää pienellä määrällä vihreää tai valkoista, jolloin spektri on jatkuva (Kuva 3).
- Vihreän lisäksi lisätään PAR-säteilyä pidempiaaltoista kaukopunaista (Kuva 4).
- HPS-valaisimien spektriä täydentämään tarjotaan sinistä valoa tuottavia LED-valaisimia (Kuva 5), jotka ripustetaan HPS-valaisimien rinnalle.
- LED-valaisimilla voidaan tuottaa myös valkoista valoa – valoa, jossa on sekoitus fotoneja sinisestä, vihreästä ja punaisesta. Valo tulee yleensä fosforilla pinnoitetusta LEDistä. Sekoituksen tuottaman valon sävyä kuvataan värilämpötilalla, jonka yksikkö on kelvin (K).



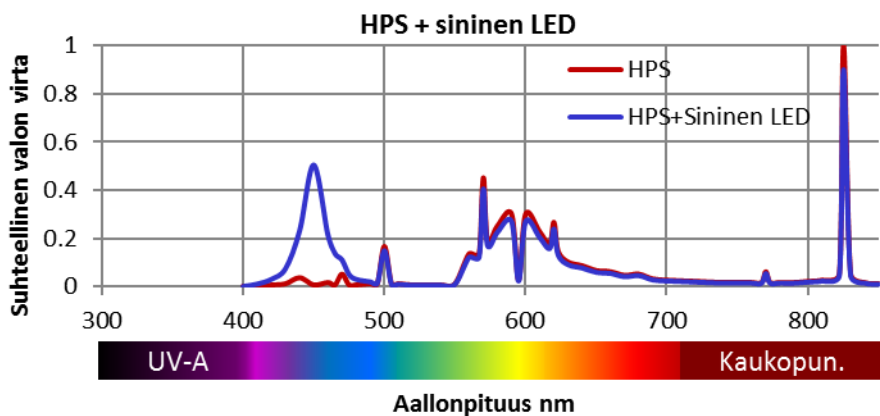
Kuva 2. Sinistä ja syvänpunaista valoa tuottavan LED-valaisimen tyypillinen spektri.



Kuva 3. Sinistä, syvän punaista ja vihreää valoa tuottavan LED-valaisimen tyypillinen jatkuva spektri.



Kuva 4. Sinistä, punaista, enemmän vihreää ja kaukopunaista tuottavan LED-valaisimen tyypillinen jatkuva spektri.



Kuva 5. Kasvuvaloksi suunnitellun HPS-valaisimen spektri (punainen viiva) HPS-valaisimen spektri täydennettynä sinisellä LED-valolla (sininen viiva).

3.3. Valaisimien elinikä

25 000–35 000 tuntia ennen kuin valon intensiteetti alenee alle 90 prosenttiin alkuperäisestä

Valaisinvalmistajat kertovat, että tämän hetken korkealaatuisten valaisimien valon intensiteetti alenee 90 prosenttiin alkuperäisvoimakkuudesta noin 25 000 tunnissa. Suomalaisessa ympärivuotisessa vihanneksen kasvihuonekasvatuksessa se on vajaan viisi vuotta. Kesto aika 70 prosentin voimakkuuteen on noin kaksi kertaa pidempi kuin 90 prosentin voimakkuuteen. Ajamalla LEDejä alemmalla jännitteellä tai tehokkaalla jäähtelyksellä keston 90 prosentin tehoon esitetään olevan jopa 35 000 tuntia. Alemmalla jännitteellä LEDien hyötysuhde ($\mu\text{mol/J}$) voi jäädä yhtä alhaiseksi kuin uuden HPS-valaisimen hyötysuhde. LED-valaisin voi silti olla parempi, jos LED-valaisimen viljelykasville räätälöidyn spektrin vuoksi LED-valosta saadaan irti enemmän kasvua grammaa tai kappaletta per joule sähköä. Tämä ei selviä valoa mittaamalla, vaan kokeilemalla valaisimia kasvatuksessa.

Komponentit

LED-valaisimessa (luminaire, fixture) on valoa tuottavat LEDit (diodi), heijastimet ja linssit (lens) LEDien valon suunnan ohjaamiseen, virtalähde (driver), lämpönielu (heat sink), mahdollisesti tuuletin (fan), valaisinrunko (housing), kiinnittimet (mounting), liitin (connection) jokaisesta valaisimesta kasvihuoneen sähkölinjaan tai useiden valaisimien kytkemiseksi sarjaan. Tehokkaissa LED-valaisimissa käytetään yksittäisten piiriin juotettujen LEDien ohella myös COB-ledejä (circuit on board), joissa LEDit on pakattu yhdeksi valaisevaksi levyksi. Valoa tuottavat LEDit voivat olla suojattuja vettä ja likaa vastaan lasilla, jossa on heijastusta estävä pinnoite.

LED-valaisimia voi himmentää ilman viivettä

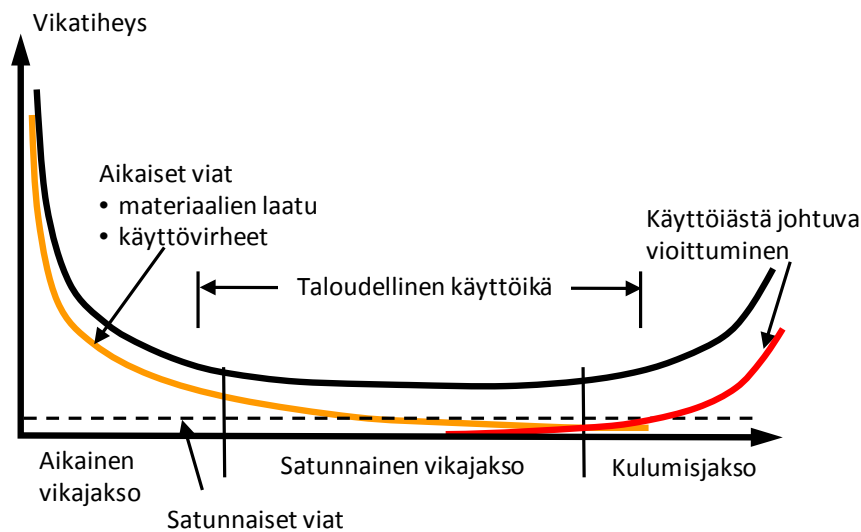
LEDejä voidaan himmentää, jos valaisimen virtalähde mahdollistaa sen. Kasvihuoneessa himmennuksen tavoitteena tietysti on säätää hetkellistä valon voimakkuutta sekä tavoitella kasvun kannalta optimaalista päivittäistä valosummaa (daily light integral). Yksittäisten valaisimien tai valaisinryhmien säätämiseksi valaisimiin voi olla langaton yhteys.

3.4. Luotettavuus: valon intensiteetin säilyminen, rikkoutuminen, värien säilyminen

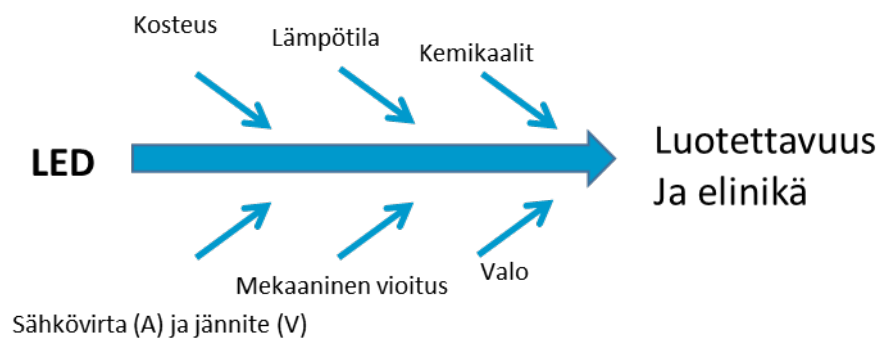
LED-valaisimen luotettavuus

Siirryttäessä LED-tekniikan käyttöön suurimpia teknisiä haasteita ovat LED-sirujen ja valaisimien luotettavuus. Viime aikoina on julkaistu yksityiskohtaisia raportteja luotettavuuden eri osa-alueista ja niiden mittauksissa käytetyistä menetelmistä (U. S. Department of Energy 2011, 2014, Osram 2013, Lumileds 2016).

LEDeissä ja muissa teknisissä laitteissa esiintyviä vikoja kuvataan yleensä kuppimallin avulla (Kuvat 6 ja 7). Vikojen esiintyminen voidaan jakaa ajallisesti kolmen vaiheeseen: aikainen, satunnainen ja kulumisjakso. LED-valaisimien osalta aikaisen vaiheen vikatiheyden suuruus riippuu kunkin valmistajan laatu- ja testausjärjestelmästä. Mikäli LED-valaisimien eri komponenttien valmistus- ja kokoonpanossa on laadunvalvonta suoritettu perusteellisesti, on todennäköistä, että aikaisessa vaiheessa esiintyy valaisimissa vähän vikoja. Satunnaisen vikajakson aikana, jolloin LED-valaisimet ovat käyttökohteessa, on vikatiheys yleensä pienin. Käyttöään kasvaessa vikatiheys yleensä kasvaa aiheuttaen valaisimen valon intensiteetin heikkenemisen.



Kuva 6. Kuppimalli kuvaa teknisissä laitteissa kuten LED-valaisimissa esiintyvää vikatiheyttä laitteen elinkaaren aikana.



Kuva 7. Merkittävimmät sisäiset ja ulkoiset tekijät, jotka vaikuttavat LED-valaisimen luotettavuuteen ja elinikään.

Luotettavuus: valotehokkuuden säilyminen, rikkoutuminen, värien säilyminen

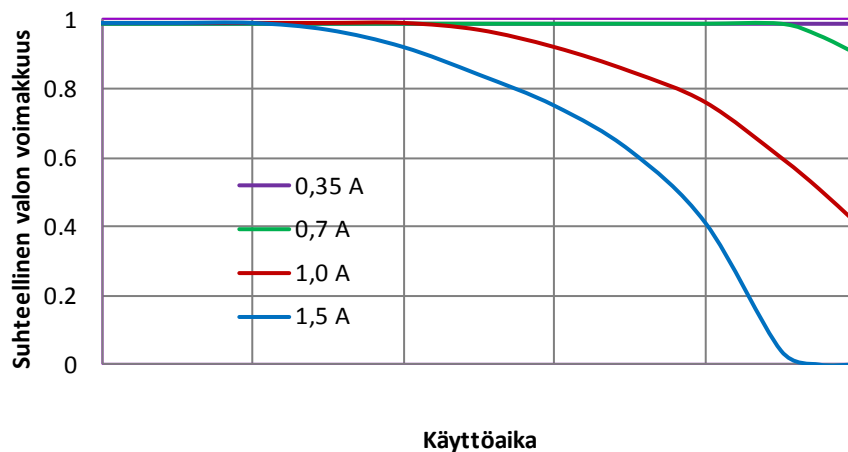
LED-valaisimen luotettavuus jaetaan kolmeen osa-alueeseen: valotehokkuuden säilyminen, valaisimen äkillinen rikkoutuminen ja LED-spektrin värien säilyminen.

Valotehokkuus laskee käyttötuntien myötä

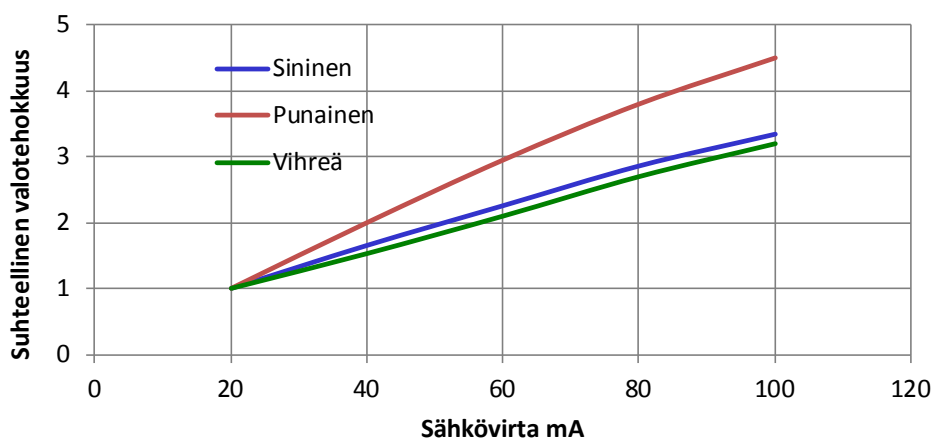
Tekijät, jotka vaikuttavat LED-sirun valotehokkuuden säilymiseen, tunnetaan nykyisin melko hyvin. Valotehokkuuden säilymisen mittaamiseksi ajan suhteen on standardoitu menetelmä (IES LM-80) ja sirun mittausarvot toimittaa luotettava valaisinvalmistaja.

Kaikkien LED-sirujen valotehokkuus heikkenee käyttötuntien mukana, mutta heikkenemisen nopeus riippuu esimerkiksi LED-valaisimeen johdetusta sähkövirran (A) voimakkuudesta (Kuva 8) ja käytetystä jännitteestä (V). Kun LED-sirun valotehokkuus on heikentynyt 70 % (L70), niin sirun katsotaan olevan viimeistään valon tuoton kannalta elinkaarensa lopussa. Kun tietty valmistaja antaa LED-sirun L70-arvoksi esimerkiksi 50 000 tuntia, vastaa se tietyllä todennäköisyydellä sirun luotettavaa käyttöikää.

Valmistettaessa LED-valaisimia voi valmistaja kasvattaa LED-sirun valotehokkuutta käyttämällä suurempaa sähkövirtaa (A) (Kuva 9) tai suurempaa jännitettä (V). On myös huomattava, että punaisen LED-sirun valotehokkuus on suurempi kuin sinisen sähkövirran ollessa samansuuruinen. Valotehokkuuden ja valaisimen käyttöajan suhteen tehdään siis kompromissi.



Kuva 8. Valaisimen suhteellisen valotehokkuuden muutos käyttöaikana erilaisilla LED-sirun käyttövirran mukaan. Valaisimen käyttöikä loppuu, kun suhteellinen valotehokkuus laskee alle tavoitellun tason, esim. 0,9. Voimakkuuden laskiessa alle 0,7, on valaisin viimeistään elinkaarensa lopussa.



Kuva 9. Valaisimessa käytetyn sähkövirran vaikutus LED-sirun valotehokkuuteen.

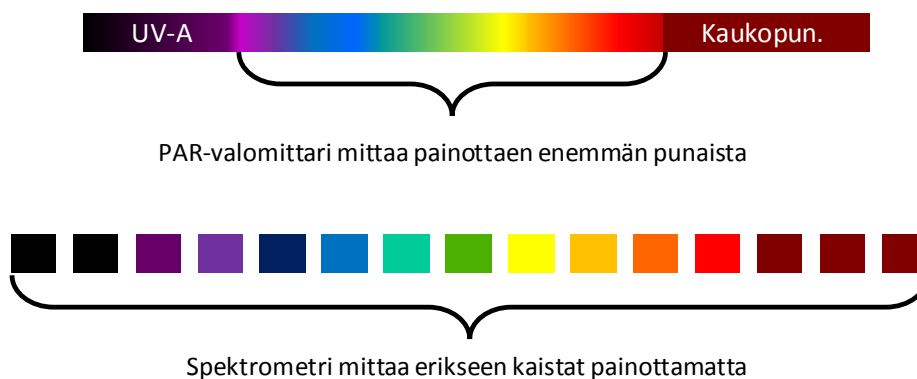
Yleensä LED-valaisimen valmistaja mitoittaa laitteen sähkövirran ja jännitteen suuruuden sellaiseksi, että valaisimen valotehokkuus on riittävän suuri ja toisaalta valotehokkuus säilyy luvatus ajan. Koska valaisimen valotehokkuus riippuu laitteessa käytetystä sähkövirran suuruudesta ja jännitteestä, niin laitteen LED-sirujen L70-arvo ei välttämättä kuvaa valaisimen valotehokkuuden säilymistä tunteina. Koko valaisimen valotehokkuuden säilyminen on laitevalmistajan vastuulla ja se tulisi ilmoittaa valaisimen kuvauksessa.

Kaikki valaisimen LED-sirut tuottavat aina lämpöä ja sirun valotehokkuuden säilyminen on riippuvainen siitä, miten korkeassa lämpötilassa siru toimii. Valaisimen lämpötilaan vaikuttavat sekä valaisimen rakenne, että valaisinta ympäröivän ilman lämpötila. Heikosti lämpöä johtava valaisimen rakenne nostaa sirun käyttölämpötilaa ja lyhentää sirun käyttöikää. Tätä edesauttaa ympäröivän ilman korkea lämpötila.

Sirun lisäksi valaisimessa voi olla optisia elementtejä kuten linsejä ja heijastimia, joiden teho heikkenee ajan kuluessa aiheuttaen valotehokkuuden pienenemistä erityisesti kuumassa ja kosteassa ympäristössä kuten kasvihuoneessa.

PAR-valomittarilla tai spektrometrilla mitataan PAR-säteilyn intensiteetti

Teknisesti koko valaisimen tuottama yhteyttämässä käyttökelpoinen PAR-valon intensiteetti kytetään mittaamaan suhteellisen luotettavasti *PAR-valomittariin* kiinnitetyllä yhteyttämisvasteen mukaan painotetulla anturilla (quantum sensor). Valomittarin näyttämä mittayksikkö on $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. PAR-valomittari ei erota spektrin eri kaistojen osuutta, ja se painottaa enemmän punaista kuin sinistä valoa (Kuva 10). Painotus kuvaa sitä, miten tehokkaasti kasvit suunnilleen käyttävät valon aallonpituuksia yhteyttämässä. LED-valolla voidaan kuitenkin pyrkiä vaikuttamaan erikseen valon kaikilla kaistoilla, joten parasta on mitata erikseen valon kaistat *spektrometrillä*. PAR-valomittari on kohtuuhintainen ja helppo käyttää. Spektrometri on valaisintoimittajan tai paikallisen korkeakoulun osastomistason laite.



Kuva 10. PAR-valomittari kertoo koko PAR-säteilyn intensiteetin, spektrometri kertoo PAR-säteilyn aallonpituuskaistojen intensiteetit erikseen.

Valaisimen äkillinen rikkoutuminen

Äkillinen rikkoutuminen aiheutuu yleensä valaisimissa olevien sähkökomponenttien kuten muuntajan, ajurien ja sähköä johtavien liitosten hajoamisesta. Tällöin valaisin alkaa esimerkiksi vilkkua tai sammuu kokonaan, vaikka LED-siru on edelleen toimintakelpoinen. Laitteelle myönnetyn takuun laajuudesta ja sopimusehdoista riippuen valmistaja voi toimittaa tilalle uuden valaisimen.

Eri väristen LEDien tehon heikkeneminen eri tahtiin muuttaa valaisimen spektriä

Ihmissilmän havaitsema LED-valaisimen tuottama väri muodostuu useimmiten usean erillisen sirun tuottamasta valosta kuten punaisesta ja sinisestä. Kun tietyn värisessä sirussa tapahtuu muutos, muuttuu koko valaisimen lähettämän valon spektri. Jos esimerkiksi siniset sirut ovat laadullisesti heikkoja, niin LEDin valo ajan myötä muuttuu violetista punaisempaan suuntaan. Toisaalta valkoista valoa tuottavien fosforipinnoitettujen LEDien pinnan rapautuminen ja/tai fosforimateriaalissa tapahtuvat kemialliset muutokset aiheuttavat aluksi valkoisena näkyvän valon muuttumisen keltaiseksi ja/tai vihreäksi.

Merkittävä kasvihuonevalaisimessa tapahtuva spektrin muutos aiheuttaa usein muutoksia kasvin kasvussa ja kehityksessä, varsinkin talviaikaan, jolloin valotus on pääasiassa keinovaloa. Esimerkiksi valaisimessa olevan sinisen valon heikentyminen voi lisätä kasvien pituuskasvua. Vastaavasti punaisen valon heikentyminen vähentää kasvien yhteyttämistä ja kasvien kokoa. LED-valaisimessa tapahtuvat spektriinmuutokset voivat muuttaa myös kukinnan virittymis- ja kestoaikaa ja kukkien lukumäärää varsinkin silloin, kun viljelyssä käytetty valoresepti perustuu räätälöityyn ja hyväksi koettuun valospektriin.

3.5. Valotuksen suunnittelu

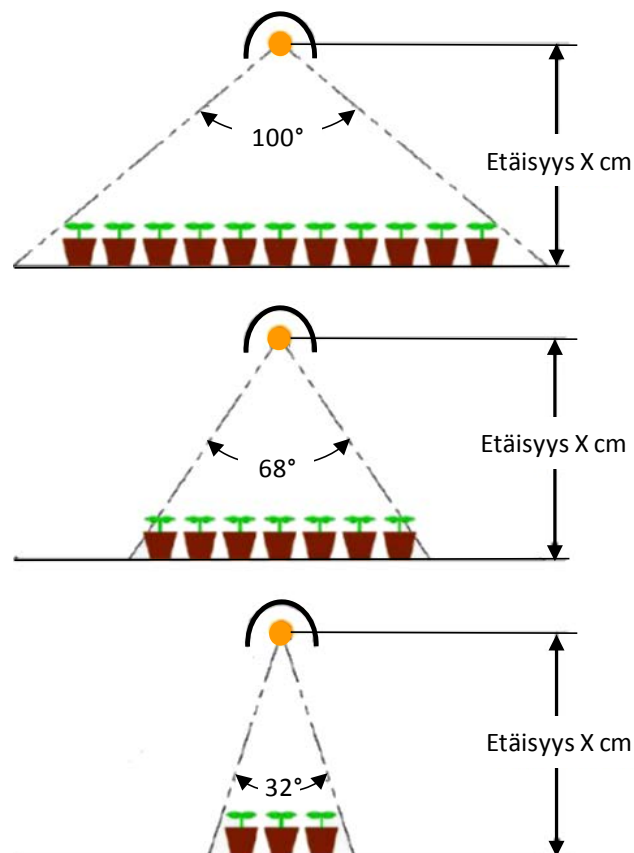
Valotuksen suunnittelu valaisimien valinnan pohjana

Siirryttäessä LEDien käyttöön kasvihuoneviljelyssä keskeistä on hyvä valotuksen suunnittelu. Suunnittelu perustuu koko kasvuston tarvitsemaan PAR-säteilyn voimakkuuteen ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) eikä yksittäisen valaisimen arvoihin.

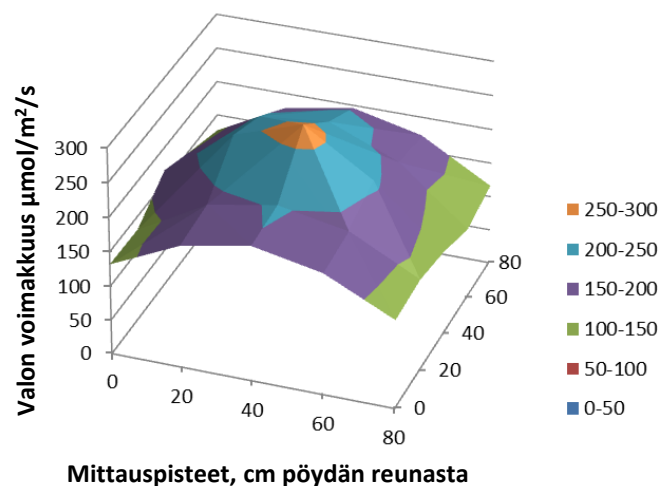
Markkinoilla olevien LED-valaisimien valottama alue vaihtelee paljon (Kuva 11). Osa valaisimista on jopa spotti-tyyppisiä, joiden valokeila on erittäin kapea ja niiden rakenne perustuu tehokkaaseen optiseen rakenteeseen. Kun valaisimen valon avautumiskulma on kapea, kohdistuu sen lähettämä PAR-säteily pienemmälle pinta-alalle kuin valaisimesta, jonka valokeila on laajempi valaisimien etäisyyden ollessa samansuuruinen valotettavasta pinnasta. Koko halutun viljelypinta-alan tasaisen valotuksen aikaansaamiseksi tarvitaan kapeakeilaisia valaisimia enemmän kuin valaisimia, joiden valon avautumiskulma on laajempi.

Yksittäisen valaisimen tuottama valovirta ($\mu\text{mol}/\text{s}$) on vakio. Vietäessä valaisin kauemmas valotettavasta pinnasta jakautuu valo suuremmalle pinta-alalle. Mitä laajempaa kasvuston pinta-alaa yksittäisellä valaisimella valotetaan, sitä alhaisemmaksi valon intensiteetti ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) laskee.

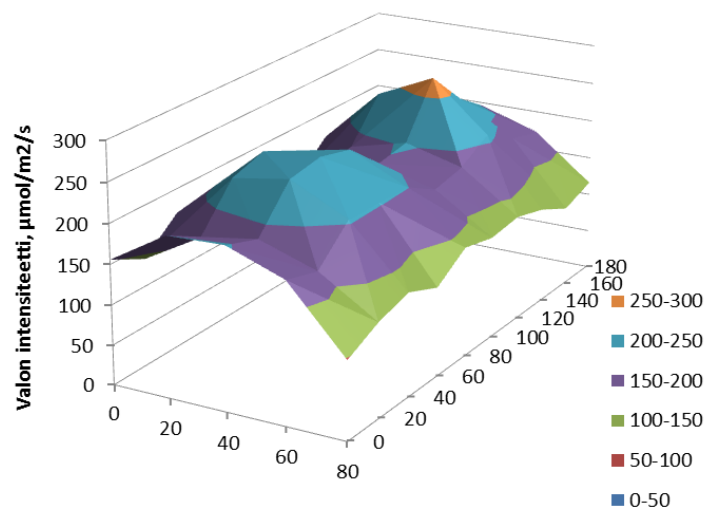
Jos yksittäisen LED-valaisimen lähettämän valon jakauma painottuu valaisimen keskialueelle, niin yhden valaisimen käyttö ei riitä valaisemaan koko viljelypöytää leveyssuunnassa. Tällöin reuna-alueella valon intensiteetti saattaa olla merkittävästi pienempi kuin keskialueella (Kuva 12). Pyrittäessä mahdollisimman tasaiseen valotukseen viljelypöydällä, tulee rinnakkain asennettujen valaisimien valokeilojen täydentää riittävästi toisiaan, jotta koko kasvuston saama valo on mahdollisimman tasainen (Kuva 13).



Kuva 11. Kun valaisimen etäisyys valotettavasta pinnasta on vakio, riippuu valotettavan pinta-alan laajuus LED-valaisimen lähettämän valon avautumiskulmasta. Kun valolähteen lähettämä valovirta on vakio ($\mu\text{mol}/\text{s}$), on valon intensiteetti ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) sitä pienempi mitä laajemmalla alalla valo jaetaan.



Kuva 12. Viljelypöydän keskelle sijoitetun LED-valaisimen valon voimakkuuden jakauma pöydän pinnalla. Yksittäisen valaisimen tuottama valon intensiteetti pöydän reuna-alueilla on jopa $100 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ pienempi kuin pöydän keskellä, jolloin kasvien kasvu on hitaampaa pöydän reunalla kuin keskellä (Lähteenä käytetty Luke Piikkiön mittaustuloksia).



Kuva 13. Kahden peräkkäin sijoitetun LED-valaisimen valon intensiteetin jakauma viljelypöydän pinnalla. Peräkkäin asetettujen LED-valaisimien keskinäinen valokatve ei ole riittävä, jotta valon voimakkuuden jakauma mahdollistaisi kasvien tasaisen kasvun viljelypöydän keskellä (Lähteenä käytetty Luke Piikkiön mittaustuloksia).

Eri väristen LEDien valo voi jakautua epätasaisesti – spektri muuttuu valoalueen laidalla

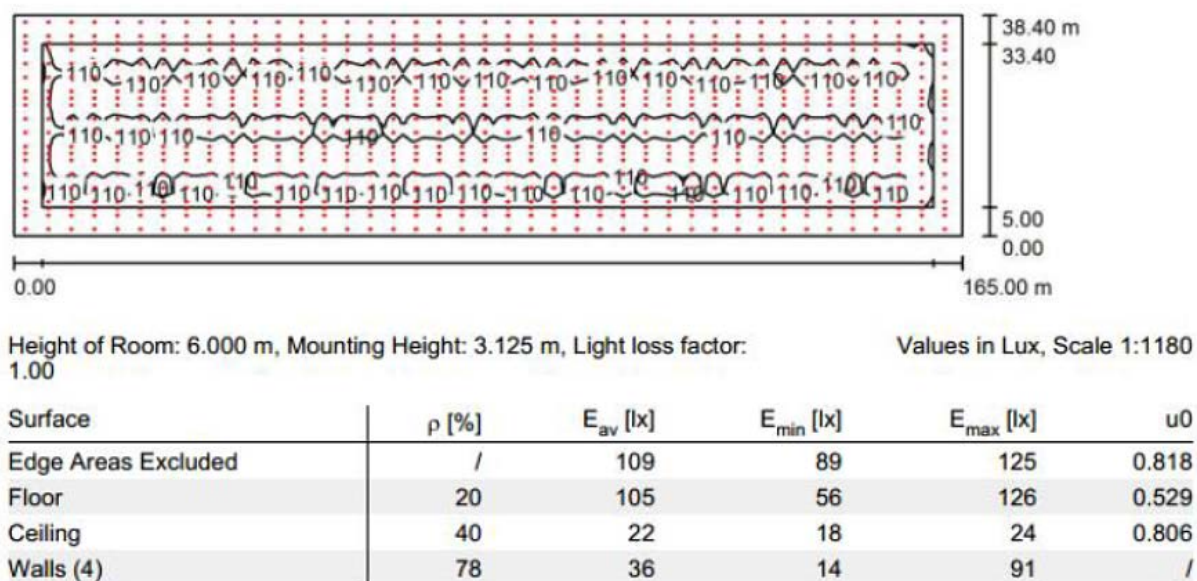
LED-valaisimen tekninen toteutus vaikuttaa myös yksittäisen valaisimen tuottaman valon tasalaatuisuuteen. Heikkolaatuisen LED-valaisimen spektri ei ole tasainen koko valotettavalla pinnalla, mikä saattaa vaikuttaa kasvuun. Esimerkiksi punaisten ja sinisten LEDien valon avautumiskulma voi olla erilainen.

Valosuunnittelu on osa hankintaa

Luotettava valaisintoimittaja tekee valosuunnitelman, josta ilmenee vähintään valotuksen voimakkuuden tasaisuusjakauma tietyllä pinta-alalla. Riittävän tarkan pystysuuntaisen valotusjakautuman

laskenta edellyttää vielä tällä hetkellä suurta laskentakapasiteettia, eikä sitä rutiininomaisesti ole vielä käytössä. Ammattitaidolla laaditusta valotussuunnitelmasta käy ilmi tarvittavien valaisimien määrä ja niiden keskinäinen sijoittelu.

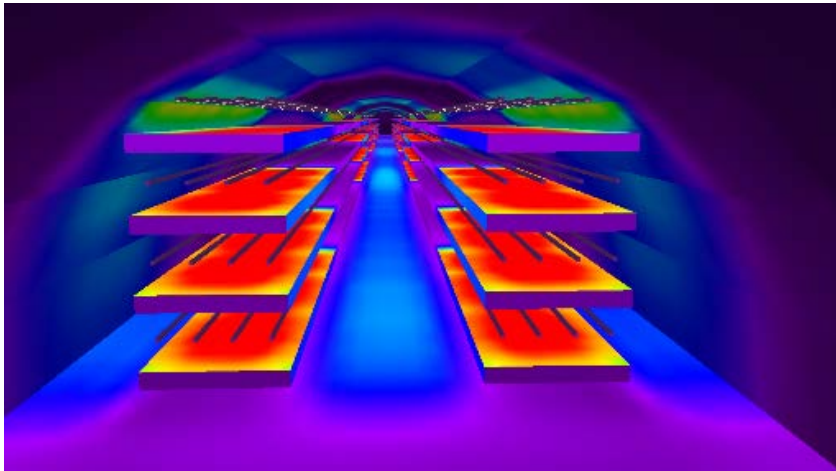
Ammattimaisesti tehty valosuunnittelu ja kustannuslaskelma ovat erityisen tärkeitä rakennettaessa korkeiden kasvustojen kuten kurkun ja tomaatin valotusta. Niiden valaistusratkaisut poikkeavat sekä teknisiltä ratkaisuiltaan että kustannuksiltaan merkittävästi pöydällä viljeltävistä kasveista. Nykyisin yleisesti ylävaloina käytettäviä suurpainenatrium-valaisimia (HPS) täydennetään usein LED-välivaloilla, jolloin LED-välivalojen tuottama valon intensiteetti tulee suhteuttaa ylävalojen tuottamaan valoon (Kuva 14).



Kuva 14. Valosuunnitelma kasvihuoneeseen, jossa olemassa olevaa suurpainenatrium-valotusta (HPS) on täydennetty LED-välivalotuksella. Punaiset pisteet kuvaavat LED-valaisimien sijoittelua kasvihuoneessa. Lattiatasolla valon voimakkuuden tavoitteena on $110 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Suunnitelmassa on huomioitu valon jakautuminen kasvihuoneen eri kohdissa (Lähde: Netled Oy, Niko Kivioja).

Suurella viljelypinta-alalla tarvitaan riittävästi valoa sekä pysty- että vaakasuunnassa, jolloin tarvittavien valaisimien määrää on lähes mahdoton arvioida silmämääräisesti. Liian niukka valotus heikentää sadontuottoa ja liian suuri valaisimien määrä suhteessa valotarpeeseen lisää tarpeettomasti pääomakustannuksia. Korkeissa kasvustoissa on tärkeää, että kasvuston alaosa saavat riittävästi valoa, koska alalehdet tuottavat yhteyttämistuotteita, jotka kulkeutuvat kasvaville hedelmille.

Kun valosuunnitelma on tehty ja valaisimet asennettu voidaan viljelytilan valon jakautuma kuvantaa (Kuva 15). Mikäli valon jakauma ja voimakkuus eivät ole tyydyttävällä tasolla, kyetään kuvan perusteella tekemään valaisimien uudelleen sijoittelua.



Kuva 15. Lontoon metroon toteutettu kerrosviljelyratkaisu (yläkuva). Kun tilaan asennetut valaisimet on kytketty toimintaan, niiden tuottama valon tasaisuus voidaan kuvantaa (alakuva). Viljelypöydän punaisella alueella valon intensiteetti on $90 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (Lähde: Valoya Oy, Lars Aikala).

4. Kokemukset viljelyssä

4.1. Tomaatti

Tomaatin valottamisesta on kokemuksia Suomessa

Tomaatilla LED-valaisimia on käyttänyt noin vuoden ajan kymmenkunta viljelijää Pohjanmaalla. Pääosin LED-valaisimia on käytetty välivaloina. Joissakin tapauksissa myös ylävalaisimiksi on vaihdettu LED-valaisimet.

Tomaatille 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ välivaloista ja 180 – 440 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ylävalosta

Käytetyt välivalaisimet ovat olleet riviväliin yhdelle tai kahdelle korkeudella asennettuja pitkittäisiä tankoja, joissa on punaisia ja sinisiä LEDejä suhteessa 5:1. Käytetty asennusteho LED-välivalotukselle on 40–50 W/m^2 . Valaisimilla energian muuntotehokkuus (sähköstä valoa) on 2,1 $\mu\text{mol}/\text{J}$. Välivaloilla tuotettu valon intensiteetti on siis 105 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, mikä vastaa Tanskassa ja Hollannissa käytettyä intensiteettiä. Tämä on siis laskennallinen intensiteetti lattiapinta-alaa kohti, eikä kasvien lehdille tulevan valon intensiteetti.

Viljelijöiden kokemuksen mukaan LED-välivalojen lisääminen HPS-ylävalojen ohelle nostaa vuotuista satoa 15–20 % ja lisää samassa suhteessa haihduntaa. Satotaso on hyvänä vuonna noin 90 kg/m^2 vuodessa.

HPS-ylävalaisimet (190 $\text{W}/\text{m}^2 = 290 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) korvaavien COB-LED-ylävalaisimien asennusteho on 100 W/m^2 ja valon tuotto 2,7 $\mu\text{mol}/\text{J}$, joten valon intensiteetti on 270 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Se on 2–4 kertaa enemmän kuin Hollannissa ja Tanskassa. Ylävalot ovat punainen-sininen-valkoinen-yhdistelmä.

Ylävalojen säätöraja (päälle/pois) on 250–300 W/m^2 ja välivalojen jopa 600 W/m^2 auringon konaissäteilyä, mutta valoryhmästä voidaan pudottaa puolet pois keväällä ja kesällä.

Puhtaassa LED-valotuksessa, jossa HPS-ylävalot (190 W/m^2 , 290 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) korvataan LED-valoilla (100 W/m^2 , 260 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) ja lisätään LED-välivalot (50 W/m^2 , 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), sato nousee yhtä paljon kuin valoa lisätään. Tosin vuonna 2016 ei ollut vielä kokemusta keskitalven viljelystä puhtaalla LED-valotuksella.

Kasvutiheys ja valo suhteessa toisiinsa

LED-välivalotuksen tuoma satohyöty saadaan osittain aikaan lisäämällä kasvutiheyttä. Keväällä otetaan runsaammin lisälatvoja kasveista. Osa sadon lisäyksestä johtuu painavammista hedelmistä talvella ja osa korjattavien hedelmien lukumäärän lisääntymisestä. LED-välivalotkin pitävät kasvustoa kuivempana, mikä vähentää harmaahometta. Välivalojen käyttö parantaa myös väli-istutuksen taimien valon saantia.

LED-valaisimilla sähköstä tomaattisatoa 40–50 % tehokkaammin kuin HPS-valaisimilla

LED-valotukseen siirtyminen ei näytä vaikuttaneen merkittävästi valon käytön tehokkuuteen (satoa grammaa per moolia valoa, light use efficiency LUE g/mol), joten sähkön käytön tehokkuus (kg satoa per kWh sähköä) on parantunut samassa suhteessa kuin valaisimen valotehokkuus ($\mu\text{mol}/\text{J}$). Ylävaloissa tehokkuus on kasvanut 40–50 % (1,7–1,8 $\mu\text{mol}/\text{J}$ -> 2,6 $\mu\text{mol}/\text{J}$). Pienitehoisten HPS-välivalojen, joita ei tosin tomaatilla ole ennen paljon käytetty, ja LED-välivalojen tehokkuusero on noin 40 % (1,5 $\mu\text{mol}/\text{J}$ -> 2,1 $\mu\text{mol}/\text{J}$).

Pelkkä LED-valotus ei välttämättä lisää lämmitystarvetta

Kun on siirrytty puhtaaseen LED-valotukseen ja otettu välivalot käyttöön, kasvihuoneeseen tulevan sähköenergia ja siis myös lämpö on vähentynyt noin 25 %. Pudotus kohdistuu erityisesti kasvien latvoihin. Se ei kuitenkaan välttämättä lisää oleellisesti lämmitystarvetta, eikä edellytä riviväleihin lämmityspotkia.

Alhaisempi LEDien lämmöntuotto vähentää tuuletustarvetta silloin kun kate pystyy tiivistämään haihtuneen vesihöyryn, mikä mahdollistaa myös korkeamman CO₂-pitoisuuden ylläpidon. Lämmitystarpeeseen vaikuttaa se, että LED-valaisimet tuottavat lähes yhtä paljon lämpöä riviväleihin kuin lämmityspotket tuottaisivat. Kylmällä säällä voidaan lisätä energiaverhon tai yhdistetyn verhon käyttöä. Ylä- ja alalämmön erotuksen säilyttäminen onnistuu ilman lisälämmitystä, koska ylhäällä LED-valaisimet säteilevät vähemmän lämpöä kasvustoon kuin HPS-valaisimet.

4.2. Kurkku

Tomaatista opittu ei käy suoraan kurkulle

Kurkun ja tomaatin HPS-valotettu viljely poikkeavat lämpötilan ja välivalotuksen osalta. Kurkulla käytetään korkeampaa ilman lämpötilaa ja kurkulla on jo pitkään käytetty HPS-välivaloja 50–70 W/m². Kurkkukasvuston pystysuuntainen valoprofiili on erilainen kuin tomaattikasvuston. Kurkun isot lehdet pysäyttävät tehokkaasti auringon ja ylävaloista tulevan säteilyn, lukuun ottamatta vihreää ja kaukopunaista. Tämän vuoksi välivalojen ja ylävalojen vihreän valon merkitys on suuri kasvuston keski- ja alaosan lehtien yhteyttämiseksi. HPS-välivalojen satoa lisäävästä vaikutuksesta osan oletetaan johtuvan myös niiden lähettämästä lämpösäteilystä, joka lämmittää hedelmiä. Lämpimät hedelmät kasvavat nopeammin kuin viileät hedelmät ja kilpailevat kasvin muita osia vastaan tehokkaammin lehtien tuottamien yhteyttämistuotteiden saannissa.

Kurkkukokeessa LED-LED, HPS-LED ja HPS-HPS

Kurkun viljelystä LED-valaisimilla on Suomessa kokeellista tietoa (Särkkä ym. 2014). Kesällä 2013 ja talvella 2013–2014 verrattiin kontrolloiduissa kokeissa

- puhdasta HPS-valotusta (180 + 56 W/m², 300 + 90 μmol/m²/s)
- puhdasta LED-valotusta (128 + 64 W/m², 190 + 125 μmol/m²/s) sekä
- HPS-ylävalotuksen ja LED-välivalotuksen yhdistelmää (180 + 64 W/m², 300 + 125 μmol/m²/s).

Kokeessa käytettyjen LED-valaisimien spektri oli jatkuva sinisestä kaukopunaiseen. Kaukopunaista oli 17 %, punaisen ja kaukopunaisen suhde 2,77. LED-valaisimien valotehokkuus oli alhainen, 1,5 μmol/J.

LED-ylävalon tuottaman valon intensiteetti ei ollut riittävä keskitalvella

Kokeessa LED-ylävalaisimien tuottama valon intensiteetti oli liian alhainen pilvisen keskitalven aikana. Joulutammikuussa LED-ylävalojen alla sato oli 25 % alempi kuin HPS-ylävaloja käytettäessä. LED-LED-valotuksen osalta koe kertoo, että keskitalvella ei tämä valon intensiteetti riitä LED-valotuksellakaan.

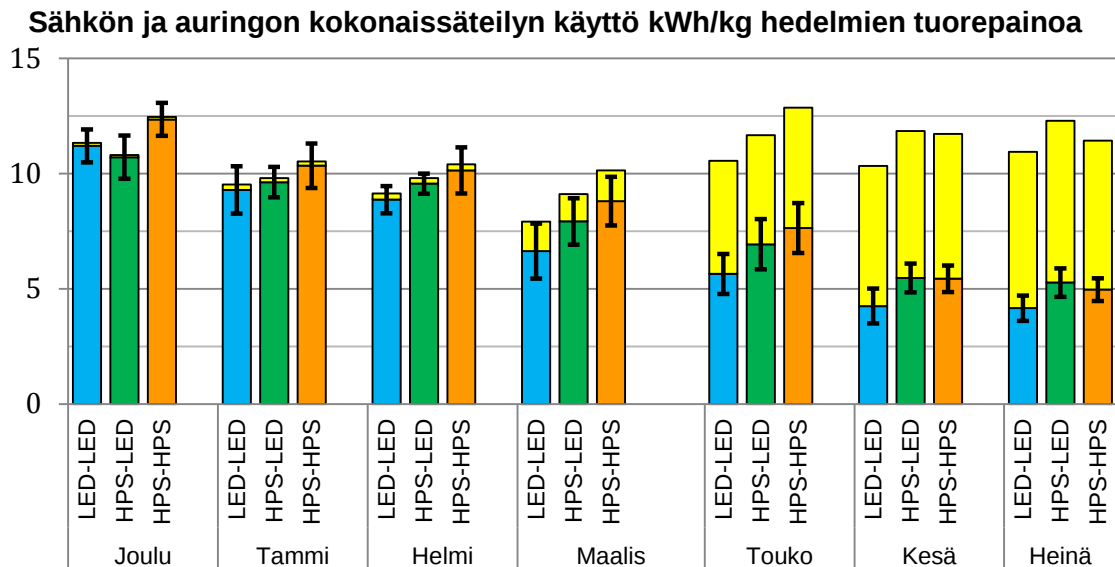
Aurinko korjasi LED-ylävalon tehon puutteen helmikuusta alkaen

Kun aurinko tuli riittävästi apuun helmikuussa, kasvuston rakenne korjautui puhtaassa LED-valotuksessa. Tämän jälkeen satoa kertyi kaikissa valotustavoissa saman verran, vaikka LED-LED-valotuksessa käytettiin vähemmän sähköä. Tämän seurauksena puhtaassa LED-valotuksessa sähkön käyttö tuotettua hedelmäkiloa kohti oli helmi-maaliskuussa puhtaassa LED-valotuksessa noin 25 % pienempi kuin puhtaassa HPS-valotuksessa (Kuva 16). HPS-ylävalo-LED-välivalon sähkön kulutus oli noin 10 % pienempi kuin HPS-HPS-valotuksessa.

Kesällä LED-valotetussa vähemmän tuuletusta

Kesällä, kun lämpöä jouduttiin jatkuvasti poistamaan tuulettamalla, LED-valaisimien alemmasta lämmön tuotosta oli hyötyä. Kesällä puhdas LED-valotus kulutti 20 % vähemmän sähköä per hedelmäkilo kuin puhdas HPS-valotus (Kuva 16). LED-HPS-valotus kulutti saman verran sähköä kuin puhdas HPS-

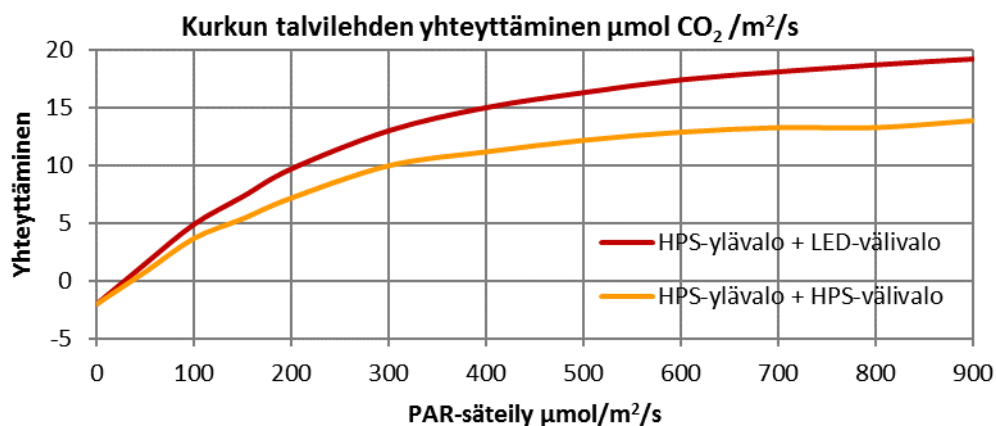
valotus. Keväällä ja kesällä LED-valaisimilla valotettuja osastoja tuuletettiin vähemmän, mikä mahdollisti korkeamman hiilidioksidipitoisuuden. Tämä lisäsi osaltaan LED-valotuksen sähkön käytön tehokkuutta. Aiemmin Hogewoning ym. (2012) raportoimassa kokeessa LED-valoa käytettäessä kulutettiin 21 % vähemmän sähköä kuin HPS-valoa käytettäessä, mutta tämä koe on LED-kehityksen aikajanalla vielä vanhempi kuin Piikkiön koe.



Kuva 16. Koe Piikkiössä 2013–2014. Kuukausittain kurkkukilon tuottamiseen tarvittu sähkö valaisimista ja auringosta kWh/kg. Tolppien alaosa (sininen-vihreä-oranssi) näyttää valotuksen käytön tehokkuuden. Tolpan keltainen yläosa on auringon valon käytön tehokkuutta.

Suuremmassa valomäärässä kasvaneet lehdet olivat tehokkaampia yhteyttäjiä

HPS-ylävalon ja LED-välivalon yhdistelmällä tuotettiin välivalojen korkeudella olleille lehdille eniten valoa. Kun lehtien yhteyttämistehoa (yhteytys per valon intensiteetti) mitattiin fotosynteesimittarilla, HPS-LED-valotuksen lehdet pystyivät parhaiten käyttämään lisävalon (Kuva 17).



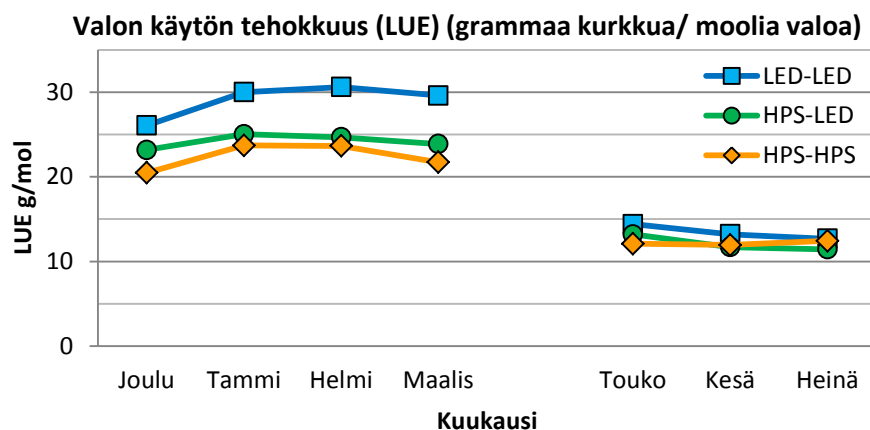
Kuva 17. Lehtien kyky käyttää lisättyä valoa tammikuussa 800 ppm CO_2 -pitoisuudessa valotustavan mukaan. Kuvassa näytetyt valotustavat olivat HPS-ylävalo + LED-välivalo ja HPS-ylävalo+HPS-välivalo.

LEDin mikromoolit ilmeisesti tehokkaampia kuin HPSsän mikromoolit

Kun katsotaan valon käyttö kurkkukiloa kohti talvella (Kuva 18), saatiin LED-LED-valotuksessa valomoolia kohti 30 % enemmän kasvua kuin perinteisellä HPS-valotuksella. Talvella eroa ei ollut CO₂-pitoisuudessa. Ainoa ero oli valon määrässä ja spektrissä. Tehokkaamman valon muuntamisen sadoksi voi tulkita johtuvan siitä, että LED-valaisimen moolit käytettiin yhteyttämisessä tehokkaammin kuin HPS-valaisimen valomoolit. LED-valaisimen spektri sopi siis kurkulle paremmin kuin HPS-valaisimen spektri. Oletettavasti, jos LED-ylävalaisimen tuottama valon intensiteetti olisi ollut suurempi kuin kokeessa käytetty ja spektri sama, LED-LED-valotus käyttänyt ehkä 30 % vähemmän sähköä kuin perinteinen HPS-valotus.

Kesällä puolet valosta jää käyttämättä

Kesällä puolet valosta jää käyttämättä. Pääasiassa se johtuu siitä, että kasvien ylälehdet eivät pysty käyttämään yhteyttämisessä tehokkaasti niin voimakasta säteilyä kuin aurinkoisena päivänä kello 10–15 niihin tulee (Kuva 18). Toinen oleellinen syy on liian korkea lämpötila suhteessa ilman CO₂-pitoisuuteen, koska lämmön ja kosteuden poistamiseksi tarvittavan voimakkaan tuuletuksen vuoksi CO₂-pitoisuus on alhainen. Lämpötilan ja CO₂-pitoisuuden suhdetta voidaan korjata ilmanvaihdoilla, joka poistaa lämpöä ja kosteutta lämmönvaihtimen kautta, mutta ei päästä kasvihuoneen ilmaa ulos. Lämpötila on suljetussa huoneessa sama tai alempi kuin tuuletetussa, mutta CO₂-pitoisuus pysyy korkealla. Tämä nostaa valon käytön tehokkuutta kesällä 25–30 % (Särkkä ym. 2008).



Kuva 18. Koe Piikkiössä 2013–2014. Valolla aikaan saatu kasvu eli valon käytön tehokkuus (LUE). Valossa on mukana valaisimien valo ja kasvustoon tullut auringon valo.

Sähkön säästö voi olla 40 % kurkullakin

Ilmeisesti tomaattia vastaava 40 prosentin sähkön käytön tehokkuuden parantuminen on tällä hetkellä saavutettavissa myös kurkulla Suomessa, kun siirrytään HPS-valotuksesta puhtaaseen LED-valotukseen. Tarvittava ylävalojen tuottama valovoimakkuus pitäisi olla yli 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$.

LED-välivalaisimilla voidaan saavuttaa osa HPS-välivalaisimien lämpövaikutuksesta, koska LED-valaisin vastaa 40–60-asteista lämpöputkea kasvirivien välissä. Pelkkien välivalaisimien korvaaminen LED-valaisimilla vaikuttaa tosin melko vähän viljelyn sähkön käytön tehokkuuteen.

LED-valaisimien vähäinen lämpösäteily kurkkukasvuston yläosaan täytyy talvella korvata muilla tavoilla. Energiaverhot ja niiden riittävä käyttö ovat yksi mahdollisuus. Valaisimet, joissa tuuletin suuntaa lämpimän ilman alaspäin suuritehoisista ylävalaisimista saattavat auttaa suurimman osan vuodesta. Ilman liikuttamisella on myös epäsuora hyödyllinen vaikutus, koska ilmapvirta rikkoo isojen lehtien pinnalla olevan tynnen ilmakerroksen, jolloin ilmaan syötetty hiilidioksidi pääsee paremmin lehteen (Kitaya ym. 2004).

Kurkkukoe Puolassa samalla liian alhaisella valon intensiteetillä kuin Piikkiön koe

Kokemukset muualta kertovat hyvin vähän, miten LED-valotusta voidaan käyttää Suomessa. Philipsin Puolassa 2015 teettämässä kokeessa käytettiin yhteensä $320 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ valotuksessa, jossa oli LED-ylävalo ($2,5 \mu\text{mol}/\text{J}$) ja LED-välivalo ($2,2 \mu\text{mol}/\text{J}$) (ilmeisesti noin $100 + 45 \text{ W}/\text{m}^2$). Vertailukohtina olivat saman valon intensiteetin tuottaneet HPS-ylävalo + LED-välivalo sekä pelkkä HPS-ylävalotus.

Valon intensiteetti oli siis suunnilleen yhtä paljon kuin yllä esitettyssä Suomen kokeessa LED-ylävalo + LED-välivalo -valotuksessa, mikä oli Suomessa keskitalvella liian vähän. Puolan oloissa valotus oli riittävä keväällä ja syksyllä. Puolassa tuloksena oli – Philipsin mainosmateriaalin mukaan – että keväällä ja syksyllä sähkön käytössä voitiin säästää 60 % käyttämällä puhdasta LED-valotusta. Ero sähkön käytössä verrattuna Suomen kokeeseen selittyy ilmeisesti suurelta osalta sillä, että käytettyjen LED-valaisimien valotehokkuus oli Puolassa suurempi.

Hollannin oloista vähän opittavaa koska valon intensiteetit ovat alhaiset

Hollannissa 2017 ensimmäisellä suurella LED-valotetulla kurkkuviljelmällä LED-välivalotuksen asennusteho on $40 \text{ W}/\text{m}^2$ (20 % sininen, 80 % punainen, valotehokkuus $2,2 \mu\text{mol}/\text{J}$, valotusaika 13–18 h/vrk => valon intensiteetti $88 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ => päivittäinen valomäärä valaismista 6–8 $\text{mol}/\text{m}^2/\text{vrk}$). Tämä riittää kasvuston kunnon ja hedelmien laadun ylläpitämiseen kevättalvesta alkaen, mutta ei viljelyyn keskitalvella. Käytetty valomäärä vuorokaudessa on vain 10–20 % Suomessa kurkulle käytetystä valon määrästä!

4.3. Salaatit, yrtit

Tutkimusta pääasiassa laadusta

LED-valojen käytöstä lehtivihannesten ja yrttien laadun parantamiseen on tehty viime vuosina ja tehdään edelleen huomattavasti enemmän tutkimusta kuin tomaatin ja kurkun LED-valotuksesta. Nopeasti kasvavien, pienten, vähän työtä vaativien kasvien valotuksen tutkiminen on monin verroin halvempaa kuin kurkun ja tomaatin valotuksen tutkiminen. Näissä tutkimuksissa suurin paino on laadun parantamisessa käyttäen LED-valoilla toteutettuja erilaisia spektrejä. Spektrillä voidaan vaikuttaa kasvien väriin ja muotoon, ravitsemuksellisesti hyödyllisten ja haitallisten yhdisteiden pitoisuuteen sekä kestävyyyteen kuljetuksessa ja kaupassa. LED-valoilla voidaan toteuttaa myös matalien kasvien kerrosviljely kasvuhuoneissa, josta alempana kappaleessa 6 on haarukoitu sähkökustannusten eroa kasvihuoneviljelyyn verrattuna.

Kasvatuksen vaiheen mukainen spektri on helpoin toteuttaa ruukkusalaateilla ja -yrteillä

Paras spektri on erilainen kasvun eri vaiheissa. Alussa tavoitellaan nopeaa lehtien laajentumista, jotta lehdet saavuttaisivat nopeasti koon, missä ne ottavat kaiken valon kiinni. Teoriassa tässä vaiheessa yhteyttämiselle tyypillisesti riittää pääosin punainen valo, jota täydennetään vähintään pienellä määrällä sinistä ja kaukopunaista. Kaukopunainen, jonka osuus on 5–10 %, ohjaa kasvua lehtien laajentumiseen ja avautumiseen, jotta ne voivat kaapata mahdollisimman paljon valoa yhteyttämiseseen (Nicole ym. 2016). Valon spektri vaikuttaa myös juurten kasvuun (Bantis ym. 2016). Kaukopunainen lisää juurten pituuskasvua ja sininen vähentää sitä.

Paras mahdollinen valotuksen spektri on erilainen eri kasvilajeilla, jopa eri lajikkeilla (Olle ja Virsile 2013, Brazatyite 2016, Piovene ym. 2015), joten periaatteessa viljelyssä pitäisi hyödyntää monia erilaisia valotusreseptejä (valon intensiteetti, spektri, ajoitus). Spektrin pullonkaulat vaikuttavat kuitenkin vain osan vuotta ja viljelykasvien ja lajikkeiden reaktioiden voimakkuus spektriin vaihtelee. Tuotevalikoiman laajuus ja vaihtuminen johtavat siis kompromissiin valaisimien valinnassa.

Valon määrällä ja spektrillä muotoa, väriä, makua, alemmaa nitraattipitoisuutta

Varastokestävyyttä ja laatua voidaan parantaa valon määrällä ja spektrillä, erityisesti talvella. Spektri vaikuttaa kasvien nivelvälien pituuteen, lehtien laajuuteen ja kuiva-ainepitoisuuteen. Se vaikuttaa

myös vihreän värin voimakkuuteen sekä 'värillisten' salaattien ja yrttien värien voimakkuuteen (punainen, keltainen, oranssi, violetti) sekä jossain määrin makuun. Yleensä valon määrän lisääntyessä lehtien sokeripitoisuus nousee, jolloin salaattit ovat makeampia. Väri ja osittain maku liittyvät myös sekundaarimetaboliittien pitoisuuteen kasvilla. Mikäli sekundaarimetaboliittien määrä kasvin lehdesä on kuitenkin liian korkea, voi salaatti maistua kitkerältä.

Nitraattia alemmas valolla

Koko viljelyjakson aikana annettavalla valon määrällä voidaan hallita salaattien nitraattipitoisuutta siten, että korkeassa valossa lehtien nitraattipitoisuus on pienempi kuin matalassa. Nitraattipitoisuutta voidaan alentaa myös kokonaisvalomäärän lisäyksellä LED-valolla kasvatuksen loppuvaiheessa (Netled Hortalic, 3 viikkoa, 4,1 mol/vrk lisää) yhdistettynä alennettuun nitraattilannoitukseen (Näkkiä ym. 2016, Nicole ym. 2016). Pitempään kuin muutaman päivän kestävä valon lisäys muuttaa lannoitustarvetta. Yksittäisessä kokeessa on jopa lyhyellä punaisen valon (638 nm piikki) käsittelyllä (3 vrk, 12 mol/vrk) saatu nitraattipitoisuus alenemaan (Brazatyite ym. 2016). Vaikutus tosin ei välttämättä kuvaa punaisen valon vaikutusta, vaan valon kokonaisvoimakkuuden vaikutusta.

Valon määrän lisäys laajasti koko PAR-kaistalla (400–700 nm) parantaa kaikkia laadun osatekijöitä. Kun PAR-säteilyä lisätään, on laadun kärsimättä mahdollista lisätä myös kaukopunaista valoa (710–850 nm), joka edistää lehtialan kehittymistä silloin kun lehdet eivät vielä peitä koko viljelyalaa.

Sekundaarimetaboliitit

Sekundaarimetaboliitit ovat kemiallisesti monimuotoinen ryhmä erilaisia yhdisteitä, joita kasveissa esiintyy. Yhdisteet jaetaan niiden muodostumistavan mukaan kolmeen ryhmään: 1) flavonoidit, fenolit ja polyfenolit, (2) terpenoidit, (3) tyyppiä sisältävät alkaloidit ja rikkiä sisältävät yhdisteet.

Sekundaarimetaboliittien rooli kasvien aineenvaihdunnassa on erittäin vaihteleva. Ne ovat yleensä hyödyllisiä kasveille, koska ne ohjaavat useita aineenvaihduntareaktioita, jotka liittyvät kasvuun ja kehitykseen. Yhdisteet suojaavat kasveja liian voimakkaalta valolta, tuholaisilta ja taudeilta. Jotkut niistä näkyvät kasveissa punaisen, keltaisen ja sinisen sävyinä, mikä lisää kasvien markkina-arvoa.

Monet sekundaarimetaboliitit ovat hyödyllisiä ihmisen ravitsemuksessa. Flavonoidit ja terpenoideihin kuuluvat karotenoidit ovat värillisiä pigmenttejä kasveissa. Niiden arvioidaan vaikuttavan estävästi tulehdusreaktioon, allergiareaktioon ja syöpiin. Tosin niiden merkitystä terveydelle ruokavalion osana, kun niitä saadaan salaateista ja yrteistä, ei tunneta.

Sininen valo lisää sekundaarimetaboliitteja, joista monet näkyvät värinä

Jos halutaan vähentää sähkön käyttöä lisäämällä vain jotain spektrin osaa HPS-valotuksen ja talven vähäisen auringonvalon lisäksi, on sinisen valon (440–460 nm) käyttö tehokkainta. 5–30 % sinistä valoa koko valon intensiteetistä (μmol sinistä per μmol koko valotus) lisää sekundaarimetaboliittien määrää ja parantaa lehtien väritymistä. Sininen ohjaa kasvua tiiviimmäksi, jos lehdet muuten kasvavat liian laajoiksi ja ohuiksi ja varsi venyy pitkäksi. Sinisen vaikutuksen on todettu olevan tehokkainta silloin, kun muun valotuksen määrä on korkeintaan 10–20 $\text{mol}/\text{m}^2/\text{vrk}$. (Li and Kubota 2009, Owen and Lopez 2015, Naznin ym. 2016). Suomessa 10–20 $\text{mol}/\text{m}^2/\text{vrk}$ kertyy HPS-valotetussa (100 W/m^2) salaattihuoneessa loka-helmikuussa valoista ja auringosta.

UV-säteilyn saanti kasvihuoneessa

Suomessa ulkona kesäpäivän auringon valossa UV-A-valon intensiteetti on noin 90 $\mu\text{mol m}^2/\text{s}$ ja UV-B-säteilyn noin 1 $\mu\text{mol m}^2/\text{s}$. UV-A- ja UV-B-valon vuorokausikertymä on 3 ja 0,05 $\text{mol}/\text{m}^2/\text{vrk}$. Kaikki Suomessa käytettävät kasvihuoneen katemateriaalit leikkaavat pois 60–70 % UV-A-valosta ja kokonaan UV-B-valon, kun huomioidaan katteen suora läpäisevyys ja auringon kulma. Kesällä kasvihuoneessa kertyy varjostus huomioon ottaen noin 1 $\text{mol}/\text{m}^2/\text{vrk}$ UV-A-valoa. Keskitalvella kertymä on luokkaa 0,1–0,2 $\text{mol}/\text{m}^2/\text{vrk}$.

LED-valaisimilla on mahdollista tuottaa UV-säteilyä, joskin se on kalliimpaa kuin PAR-valon tuotto.

UV-B-säteilyllä lisäystä sekundaarimetaboliittien määrään, UV-A:lla vähän vaikutusta

Myös UV-säteily lisää kasvien sekundaarimetaboliitteja, mikä näkyy vahvempana värityksenä (Bantis ym. 2016, Brazaityté ym. 2016, Goto ym. 2016). Mitä lyhyempi aallonpituus, sen voimakkaampi on UV-säteilyn vaikutus. Jos UV-säteily jätetään kokonaan pois, värin ja ravitsemuksellisen laadun kannalta kiinnostavien sekundaarimetaboliittien taso romahtaa (Tsormpatsidis ym. 2008).

UV-A-säteilyllä saadaan vain pieniä lisäyksiä antosyaniinien, karotenoidien ja kokonaisfenolien määrään. UV-B-säteilyllä saadaan selvempiä vaikutuksia. Jos kasvuvalossa ei ole sinistä, pieni ja lyhyt kolmen vuorokauden annoskin UV-B-valoa (aallonpituushuippu 310 nm, valotusaika 16 h/vrk, valon intensiteetti 1,4 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, valon vuorokautinen kertynä 0,1 $\text{mol}/\text{m}^2/\text{vrk}$) nostaa pitoisuuksia merkittävästi (Goto ym. 2016). Jos kasvihuoneeseen tulevassa valossa on kevätpäivän verran PAR-valoa (josta 23 % sinistä) ja UV-säteilyä, UV-A-annoksen kaksinkertaistaminen vaikuttaa vain lievästi. 12 vuorokauden ajan UV-A-valoa (373 nm, 16 h/vrk, 18 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 1 $\text{mol}/\text{m}^2/\text{vrk}$) nostaa 11 % antosyaniinien pitoisuutta (Li ja Kubota 2009). Sinisen valon lisääminen 55 prosenttiin vaikuttaa paljon voimakkaammin kuin UV-A, nostaen antosyaniinien pitoisuutta 30 %.

50 % sähkön käytön tehokkuushyöty saavutettavissa

Kokonaaisuudessaan LED-valoilla voidaan saavuttaa nyt noin 50 % parempi sähkön käytön tehokkuus (grammaa kasvua per joulea sähköä) (Pinho ym. 2016). Salaateilla LED-valaisimien valovoimakkuus riittää helposti, koska nykyisessä viljelytekniikassa valotuksen intensiteetti on Suomessa 130–160 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ja vuorokaudessa valomäärä pienimmillään 10–12 $\text{mol}/\text{m}^2/\text{vrk}$.

Salaatit kasvavat hyvin paljon suuremmassakin auringosta tulevassa valomäärässä keväästä syksyyn (20–30 $\text{mol}/\text{m}^2/\text{vrk}$), kun valo on auringon valoa. Ilmeisesti talvella valomäärää voitaisiin siis lisätä LED-valotuksella, joka ei lisää merkittävästi lämpökuormaa. Rajoituksena lisäykselle on valaisimiin sidotun pääoman kustannus.

5. LED-investoinnin kannattavuus

5.1. Vaaditusta takaisinmaksuajasta valaisimen hintaan

Yksinkertainen kannattavuusvertailu ilman rahoitus- ja verotusvaikutuksia

LED-valaisimien hankinnan kannattavuus esitetään yleensä takaisinmaksuajan vaatimuksen mukaan. Taulukoissa 4 ja 5 esitetyt excel-taulukot laskevat arvion siitä, kuinka paljon LED-valaisimien hankinta voi maksaa enemmän kuin HPS-valaisimien hankinta (€/m²), kun asetetaan takaisinmaksuajan vaatimus. Jos valaisimien korvausinvestointia ei tarvitse vielä tehdä, HPS-valaisimien hinnaksi voidaan arvioida nolla euroa.

Taulukossa halutaan LED-valaisimilla sama valon intensiteetti (μmol/m²/s) kuin HPS-valaisimilla ja tietty LED-korvausinvestoinnin takaisinmaksuaika. Takaisinmaksuajan kuluessa LED-valaisimien alempi sähkön kulutus ja poistuva polttimokustannus kattavat LED-valaisimien korkeamman hinnan. Suurin mahdollinen hankintahinta sisältää investointituen.

Kaavio on tietysti vahvasti yksinkertaistus hankinnan kannattavuudesta. Valaisimien valon tuoton tehokkuus (μmol/J) tiedetään. Sama valon intensiteetti (μmol/m²/s) tai valomäärä (mol/m²) voi kuitenkin tuottaa erilaisen sadon, jos valaisimien spektri on erilainen. Hyvin suunnitelluissa valaisimissa LED-valaisimien mikromoolit voivat olla ”parempia” kuin HPS-valaisimen mikromoolit. LED-valaisimilla voidaan odottaa saatavan lisähyötyä vähemmästä tuuletuksesta (LED-valaisin tuottaa huomattavasti vähemmän lämpöä kuin HPS-valaisin valomäärää kohti). Lämmitystä voidaan tarvita myös lisää, mutta siihen vaikuttaa huoneen rakenne, energiaverhon käyttö sekä lämpötilan ja kosteuden säätöstrategia. Ja tarkastelun ulkopuolelle jäävät verotuksen ja rahoituksen järjestelyt.

Taulukko 4. LED-investoinnin kustannuksen vertailu. Kuinka paljon LED-valaisimien hankinta voi maksaa enemmän kuin HPS-valaisimien hankinta. Seuraavassa taulukossa 5 näkyvät solujen kaavat. Luvut ovat esimerkkejä. Laskukaavat eivät toimi muuten kuin kopioituna exceliin.

	A	B	C	D
1	Täytä valkoiset solut		HPS	LED
2				
3	Valaisimien sähköteho (asennusteho)	W/m ²	100	69
4	Valaisimien hyötysuhde (sähköstä valoa)	μmol/J	1,75	2,3
5	Mikromoolien kasvuvaikutus (HPS = 100)	90 - 120	100	110
6	Valotustunteja vuodessa	h/vuosi	5000	5000
7	Sähkön keskihinta	€/MWh	70	70
8	HPS-valaisimien polttimokust, vuodessa (LEDissä ei polttimokust.)	€/m ² /v	25	
9	Valaisimien sähkön kulutus	kWh/m ² /v	500	346
10	Vuotuinen lämmityksen lisäys % korvattaessa HPS LEDillä	%		15
11	Vuotuinen lämmitys HPS-valaisimia käytettäessä	kWh/m ² /v	1000	1150
12	Lisäinvestointi lämmitykseen LED-valaistukseen siirryttäessä	€/m ² /v		1,5
13	Lämmön hinta kasvihuoneeseen	€/MWh	25	25
14	HPS-valaisimien poistamisen kustannus		5	
15				
16	Investointituki-% LED-valaisimiin	%		40
17	Tavoiteltu LED-investoinnin takaisinmaksuaika	vuotta		4
18				
19				
20	Valaisimen tuottama valon voimakkuus	μmol/m ² /s	175	175
21	Sähkön kustannus vuodessa	€/m ² /v	35	24
22	Sähkön kust. + polttimoiden kustannus vuodessa	€/m ² /v	60	24
23	Sähkön + polttimoiden kustannus koko takaisinmaksuaikana	€/m ²	240	97
24	HPS-LED Sähkön + polttimoiden kust. erotus takaisinmaksuaikana	€/m ²		143
25				
26	Lämmityksen muuttuva kustannus vuodessa	€/m ² /v	25	29
27	LED-käyttöönnoton vuoksi lämmityskust. lisäys takaisinmaksuaikana	€/m ²		21
28	LED-käyttöönnotolla säästetty energiakust. takaisinmaksuaikana	€/m ²		122
29				
30				
31	Odotettu pääoman korkokustannus LED-investoinnille	€/m ²		25
32	Odotettu LED-investoinnin vähentävä vaikutus yrityksen verotukseen	€/m ²		10
33				
34	TULOS: Suurin hyväksyttävä LED-investoinnin hinta viljelijälle	€/m ²		102
35	TULOS: Suurin LED-investoinnin hinta mukaan lukien investointituki	€/m ²		170
36				

Taulukko 5. LED-investoinnin kustannuksen vertailu. Kuinka paljon LED-valaisimien hankinta voi maksaa enemmän kuin HPS-valaisimien hankinta. Luvut ovat esimerkkejä. Edellisessä taulukossa kaavojen tulokset. Laskukaavat eivät toimi muuten kuin kopioituna exceliin.

	A	B	C	D	
1	Täytä valkoiset solut		HPS	LED	
2	Valaisimien sähköteh ... Valaisimien hyötysuh ... Mikromoolien kasvuva ... Valotustunteja vuode ... Sähkön keskihinta ... HPS-valaisimien polt ... Valaisimien sähkön k ... Vuotuinen lämmitykse ... Vuotuinen lämmitys H ... Lisäinvestointi lämm ... Lämmön hinta kasvihu ... HPS-valaisimien pois ... Investointituki-% LE ... Tavoiteltu LED-inves ...	W/m ² μmol/J 90 - 120 h/vuosi €/MWh €/m ² /v kWh/m ² /v % kWh/m ² /v €/m ² /v €/MWh 5 %	100 1,75 100 5000 70 25 =C3*C6/1000 1000 25 5	=D20/D4 * C5/D5 2,3 110 5000 70 =D3*D6/1000 15 =C11+D10/100*C11 1,5 25 40 4	
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19	Valaisimen tuottama ... Sähkön kustannus vu ... Sähkön kust. + poltt ... Sähkön + polttimeide ... HPS-LED Sähkön + pol ... Lämmityksen muuttuva ... LED-käyttöönnoton vuo ... LED-käyttöönnotolla s ...	μmol/m ² /s €/m ² /v €/m ² /v €/m ² €/m ² €/m ² /v €/m ² €/m ²	=C3*C4 =C9/1000*C7 =C21+C8 =D17*C22 =C11/1000*C13	=C20 =D9/1000*D7 =D21+D8 =D17*D22 =C23-D23 =D11/1000*D13 =(D26-C26)*D17 + D12*D17 =D24-D27	
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26	Odotettu pääoman kor ... Odotettu LED-investo ... TULOS: Suurin hyväks ... TULOS: Suurin LED-in ...	€/m ² €/m ² €/m ² €/m ²		25 10 =D28-D31+D32-C14 =D34/((100-D16)/100)	
27					
28					
29					
30					
31					
32					
33					
34					
35					
36					

HPS-valaisimien valon tuoton hyötysuhteita $\mu\text{mol/J}$ (uusi polttimo)	
250 W polttimo	1,5
400 W polttimo	1,65
600 W polttimo	1,7
1000 W polttimo	1,8

LED-valaisimien valon tuoton hyötysuhteita $\mu\text{mol/J}$ vuonna 2016	
Matala hyötysuhde	1,6
Korkea hyötysuhde	2,3
Korkein hyötysuhde	2,6

5.2. Hyötysuhde paranee – kannattaako lykätä investointia

Valon hinnan odotetaan laskevan

LED-valaisimiin investoinnin ajoituksella haetaan optimia pääomakustannusten ja käyttökustannusten välillä. Optimi ei ole pysyvä, vaan se muuttuu, koska LED-valaisimien hyötysuhteen ($\mu\text{mol/J}$) arvioidaan kasvavan karkeasti 5 % vuodessa seuraavan viiden vuoden aikana ja valaisimien tuottaman valon hinnalla (€ per $\mu\text{mol/s}$) on laskeva trendi. Myyntihinnan laskeminen edellyttää kasvihuoneisiin valaisimia tarjoavien yritysten kilpailua markkinoilla. Euroopassa on runsaasti tarjoajia, mutta Suomen pienemmille markkinoille on ollut toistaiseksi vähemmän tarjontaa.

LED-valaisimien hyötysuhde paranee edelleen, kannattaako lykätä investointia

Kuvassa 19 on laskettu yhdeksässä vuodessa neliötä kohti kertyneet vuotuiset kustannukset, jotka johtuvat sähkön kulutuksesta ja HPS-valaisimet korvaavasta LED-investoinnista. Kuvan esimerkeissä LED-investointi voidaan tehdä nyt tai lykätä sitä 1, 2 tai 3 vuotta, tai jatketaan hyväkuntoisilla HPS-valaisimilla ilman uutta investointia. Investoinnin kustannukset on jaettu tasaisesti viidelle vuodelle.

Investoinnin ajoitus ei vaikuta kovin paljon pitkäaikaisiin kustannuksiin

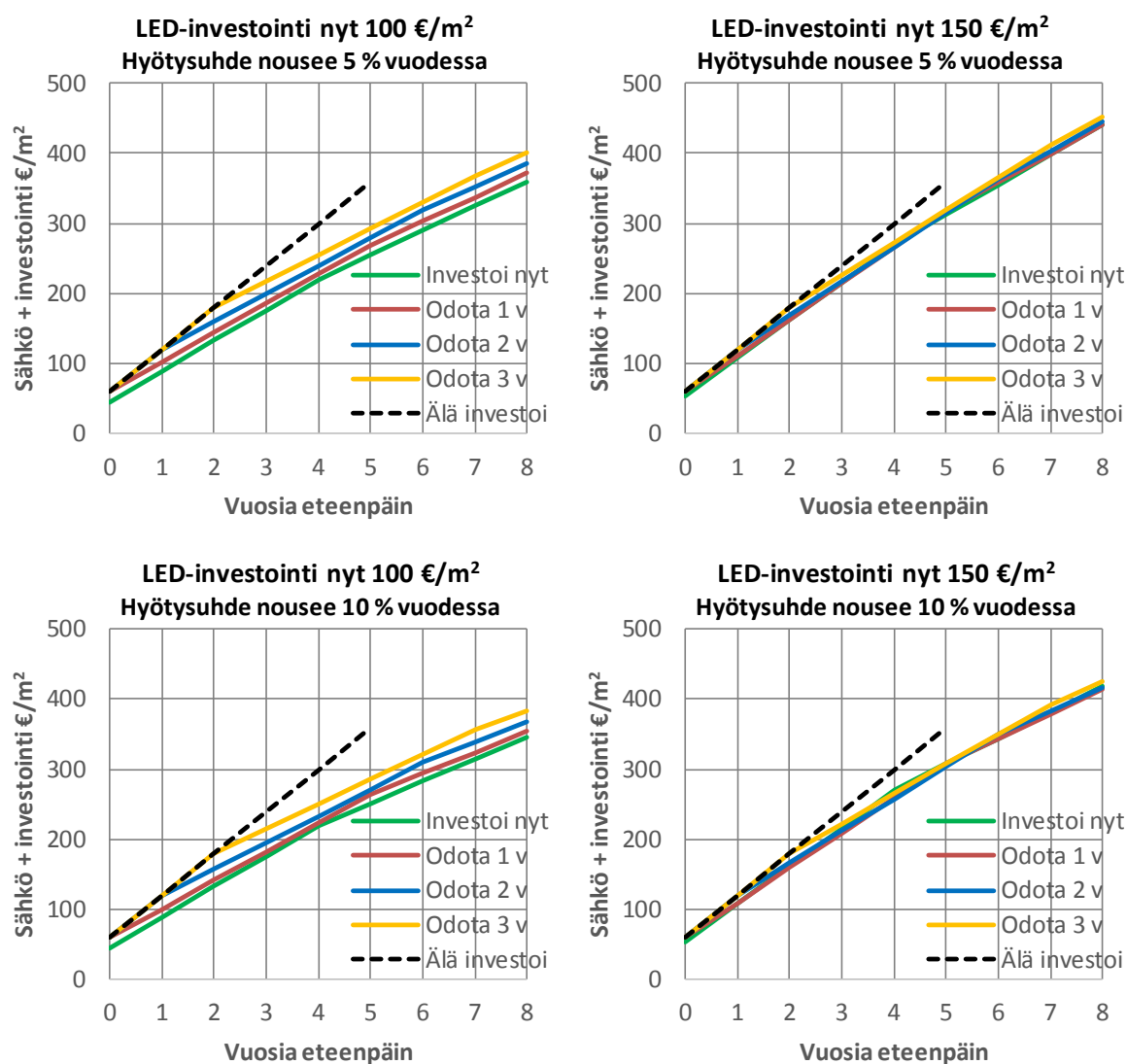
Kuvista näkyy, että viiden vuoden aikavälillä kertyvät kustannukset eivät riipu kovin paljon investoinnin ajoittamisesta, riippumatta LED-valaisimien hyötysuhteen paranemisesta. Paremman hyötysuhteen odottelu ei tuo oleellisesti lisää hyötyä, jos investointi on jo nyt kannattava ja LED-valaisimien kehitys jatkuu hitaasti 5 % vuodessa. Jos kehitys on nopeampaa, 10 % vuodessa, lykkääminen ei tuota lisää kustannuksia, jos ei niitä säästäkään.

LED-valaisimien kehitysnopeutta, tarjonnan ja tulevien vuosien hintatasoahan ei tiedetä, joten investoinnin ajoituksessa merkityksellisempää on yrityksen strategia ja rahoitus.

Kuvassa 19

- Vaihtoehdot investoinnille ovat: nyt, 1 vuoden kuluttua, 2 vuoden kulutta tai 3 vuoden kuluttua. Viimeinen vaihtoehto on, että jatketaan entisillä hyvässä kunnossa olevilla HPS-valaisimilla eli ei investoida.
- Vasemmassa kuvassa LED-investoinnin kustannus viljelijälle nyt on 100 €/m² ja oikeassa 150 €/m². Investointikustannus on jaettu tasaisesti viidelle vuodelle. Viiden vuoden kuluttua LED-valaisimet vaihdetaan paremmalla hyötysuhteella toimiviin valaisimiin.
- Kahdessa yläkuvassa LED-valaisimien sähkön käytön tehokkuuden ($\mu\text{mol/J}$) oletetaan paranevan 5 % vuosittain ja samalla tarvittava LED-valaisimen asennusteho ja hankintahinta kasvihuoneen neliötä kohti pienenee 5 % vuodessa.

- Valon intensiteetin tavoite on $165 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, joka HPS-valaisimella ($1,65 \mu\text{mol}/\text{J}$) saadaan $100 \text{ W}/\text{m}^2$ asennusteholla. Nyt LED-valaisimilla ($2,3 \mu\text{mol}/\text{J}$) tuotetaan sama intensiteetti kuin HPS-valaisimilla, mutta $70 \text{ W}/\text{m}^2$ asennusteholla. Uusien LED-valaisimien hyötysuhteen parantuessa tarvittava asennusteho pienenee.
- Valotusaika kaikilla valaisimilla on 5000 h/vuosi
- Sähkön hinta 70 €/MWh



Kuva 19. LED-investoinnin ajoituksen vaikutus sähkökustannuksen ja investointikustannuksen kertymiseen yhdeksän vuoden aikana. Rahoitus- ja verovaikutuksia ei ole huomioitu.

6. Kerrosviljelyn kilpailukyky

6.1. Kerrosviljely

Kerrosviljelyä – vertical farming – kehitetään ja markkinoidaan voimakkaasti

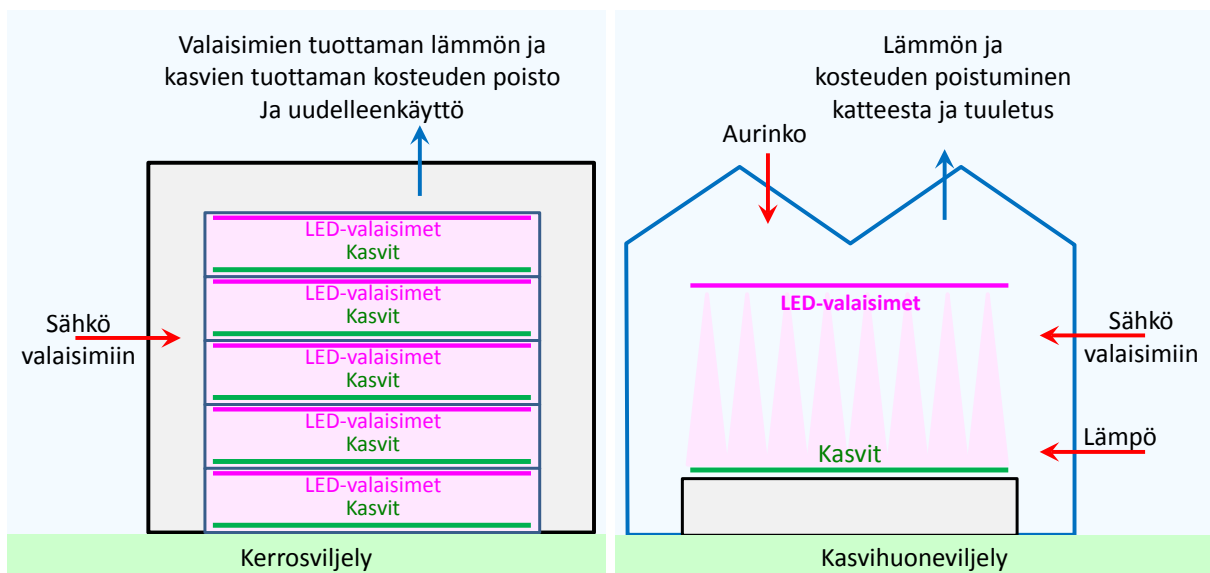
LED-valaisimien kehittyminen on lisännyt kiinnostusta pelkästään keinovalon avulla viljelyyn kerros-
viljelyssä (vertical farming, plant factory) (Kuva 20). Tilan käytön ja haihdunnan määrän vuoksi viljel-
tävät kasvit ovat lähes pelkästään salaatteja ja yrttejä tai pieniä taimia. Kerrosviljelyn osuus niiden
tuotannosta on nyt vaatimaton, mutta teknologiaa kehitetään monissa yrityksissä.

Lämpö ja haihtunut vesihöyry ulos nestejäähdytyksellä, ilmanvaihdolla, lämmönvaihtimella

LED-valaisimissa syntyvästä lämmöstä suuri osa poistetaan suoraan nestejäähdytyksellä viljelyker-
rosten ulkopuolelle. Valaisimien säteilystä lähes kaikki muuttuu lämmöksi kasveissa (5 % käytetään
yhteyttämisessä). Kasveihin tulleesta lämmöstä suurin osa kuluu haihduntaan. Liika lämpö ja haihtu-
nut vesihöyry poistetaan kerrosten välistä ilmanvaihdolla suoraan ulos, joko vaihtamalla ilmaa tai
tiivistämällä lämmönvaihtimella.

Kerrosviljelyn pitäisi ilmaston puolesta olla parhaiten kilpailukykyinen juuri Suomessa

Pelkästään keinovalon avulla viljely sopii parhaiten ilmastoon, jossa on pitkä pimeä vuodenaika ja
kilpailevassa kasvihuoneviljelyssä menetetään lasikatteen kautta enemmän lämpöä kuin on tarpeen
haihdunnan tuottaman vesihöyryn tiivistämiseen. Suomen ilmastossa kerrosviljely on siis huomatta-
vasti kilpailukykyisempi suhteessa kasvihuoneviljelyyn kuin Japanissa ja USA:ssa, jossa kerrosviljelyä
on pääasiassa kehitetty.



Kuva 20. Kerrosviljelyn ja kasvihuoneviljelyn energiavirrat sisään (punainen) ja ulos (sininen).

Kerrosviljelyssä valon spektri on täysin hallittavissa

Spektrin vaikutus kasvien kasvuun on kerrosviljelyssä samanlainen kuin kasvihuoneessa, mutta luon-
nonvalon puuttuessa spektriä on tarpeen ja voidaan kontrolloida täydellisesti. Kasvien muotoa, väri-
tystä, kohtuullista vaikutusta aistittavaan laatuun sekä hyödyllisten ja haitallisten aineiden pitoisuut-
ta kasveissa voidaan ohjata spektrillä ja valon määrällä.

6.2. Sähkökustannuksen vertailu

Investoinnit, lämmönvaihto ja sähkö

Kasvihuone- ja kerrosviljelyn taloudellisen kannattavuuden vertailussa täytyy ottaa mukaan kasvien tuottama sato, valotuksen kustannukset, kosteuden- ja lämmönvaihdon investointi- ja käyttökustannukset sekä rakennuksen investointikustannukset. Kerrosviljelyn investointi- ja lämmönvaihtokustannuksista on vähän kokemusta Suomessa ja investointikustannukset määräytyvät joka tapauksessa yritysten sopimina. Kerrosviljelyssä käytetyn rakennuksen kustannuksiin vaikuttavat alueen ja vanhojen rakennusten muu mahdollinen käyttö.

Sähkön käyttöä voidaan verrata

Se mitä voidaan karkeasti kohtuullisen helposti verrata, on suurin kustannusosa: valotus. Tässä esitetään yksinkertainen vertailu salaatin viljelystä kasvihuoneessa (ravinneliuos, liikkuvat kourut, viljelytiheys linjan alussa 80 ja lopussa 20 kpl/m²) ja kerrosviljelyssä.

Vertailun lähtötiedot – valon käytön tehokkuus

Keinovalon tehokkuus saadaan olemassaolevien kasvihuoneiden havainnoista joulukuussa ja tammikuussa, jolloin auringon valoa ei juuri ole. Keskitalvella jääsalaatti saavuttaa keskimäärin 100 gramman korjuupainon noin 45 päivässä, kun käytetään HPS-valaisimia (105 W/m²). Ne tuottavat valoa sähköstä (valotehokkuus) noin 1,75 mikromoolia per joulea sähköä (μmol/J) eli vuorokaudessa kertyy valoa 16 mol/m²/vrk. Keskitalvella auringosta tulee 1 mol/m²/vrk. 45 päivän valon kulutuksesta ja kertyneestä sadosta saadaan valon käytön tehokkuudeksi 7 grammaa per valomooli (g/mol) [LUE = (Keskipaino * Keskitiheys) / (Kasvu aika * Valo), kts. alla Laskutapa].

LED-valaisimien valotehokkuus on 2,3 (LEDA) tai 2,5 μmol/J (LEDB). LED-valaisimien tuottaman valon spektri voi olla jonkun verran paremmin salaatin kasvuun sopivaa kuin HPS-valaisimen, joten kasvihuoneessa keskitalvella ja kerrosviljelyssä LED-valaisimia käytettäessä LUE voi olla sama kuin HPS-valaisimilla, 7 g/mol, tai korkeampi edellyttäen, että kerrosviljelyn ilmanvaihto toimii hyvin.

Spektrivaikutuksen vuoksi kasvit voivat kasvaa eri tavalla valaisimilla, joilla on sama sähkön muuntokerroin, mutta erilainen spektri. LUE voi olla LED-valotetussa kasvihuone- tai kerrosviljelyssä jonkun verran korkeampi kuin HPS-valotetussa kasvihuoneviljelyssä, jos auringon valon määrä on hyvin vähäinen marras-tammikuussa.

Kasvu aika kasvihuoneessa ja LUE kasvihuoneessa ja kerrosviljelmällä

Alla taulukossa 6 on HPS-valotetun kasvihuoneen (HPS), LED-valotetun kasvihuoneen (LEDA-kasvihuone, LEDB-kasvihuone) ja LED-valotetun kerrosviljelyn (LEDA-kerrosviljely, LEDB-kerrosviljely) tuottavuus ja sähkön käyttö. LEDA ja LEDB ovat valotehokkuudeltaan erilaisia LED-valaisimia. Arvioitu salaatin kasvu aika 100 gramman painoon kerrosviljelyssä on 36 vrk. Se on sitä läpi vuoden kerrosviljelyssä, koska kasvuolot voivat olla samanlaiset koko vuoden ajan, jos lämmönvaihdon kapasiteetti riittää ja sitä kannattaa käyttää kesälläkin. Todellisessa tilanteessa kerrosviljelmä voi hetkittäin vaatia suoraa ilmanvaihtoa ulos, jolloin CO₂-pitoisuutta voidaan joutua laskemaan. Kasvihuoneen tuotanto tietysti kasvaa keväällä, kun aurinko tulee mukaan valolähteeksi. Valomäärän lisääntyessä valon käytön tehokkuus (LUE) kuitenkin kasvihuoneessa alenee, koska yhteyttäminen ei nouse huhtikuusta alkaen suoraan suhteessa valon lisäykseen, kasvihuoneessa CO₂-pitoisuus on kesällä alempi tuuletuksen vuoksi ja lämpötila on hetkittäin liian korkea.

Kerrosviljelyn sähkön muunto kasvuksi suhteessa kasvihuoneviljelyyn

Arvioitu valotuksen sähkön kulutus ja siitä johtuva kasvihuonekaasupäästö on tuotettua salaattia kohti vuositasolla noin 40 % korkeampi kerrosviljelyssä kuin kasvihuoneviljelyssä, jos molemmissa käytetään samantasoisia LED-valaisimia (Kuva 21). Nykyisellä alhaisella sähkön hinnalla kerrosviljely on sähkökustannuksen osalta kilpailukykyinen marraskuusta helmikuuhun verrattuna HPS-valaistuun

kasvihuoneeseen. LED-valaistuun verrattuna kerrosviljely pärjää joulu-tammikuussa. Jos sähkön hinta nousee, kerrosviljelyn kilpailukyky suhteessa HPS-valaistuun kasvihuoneeseen paranee, mutta heikenee suhteessa LED-valaistuun kasvihuoneeseen. Valotehokkuus $\times$ LUE voi olla LED-valotuksessa tietysti korkeampikin kuin taulukossa esitetty. Se parantaisi kaikkien LED-valotettujen viljelytapojen kilpailukykyä suhteessa HPS-valotettuun. LED-valotetun kerrosviljelyn ja LED-valotetun kasvihuoneen suhteellinen ero ei kuitenkaan juuri riipu valotehokkuus- tai LUE -arvosta.

Laskelman mukaan halvalla sähkön hinnalla (7 c/kWh) kerrosviljelyn muiden kuin valotuskustannusten täytyisi olla vuodessa noin 13 €/viljely- m^2 alemmat kuin kasvihuoneviljelyssä, jotta kerrosviljely olisi kilpailukykyinen LED-valotetun kasvihuoneen kanssa.

Kerrosviljelyn taloudellisesti kriittisin prosessi on lämmönvaihto

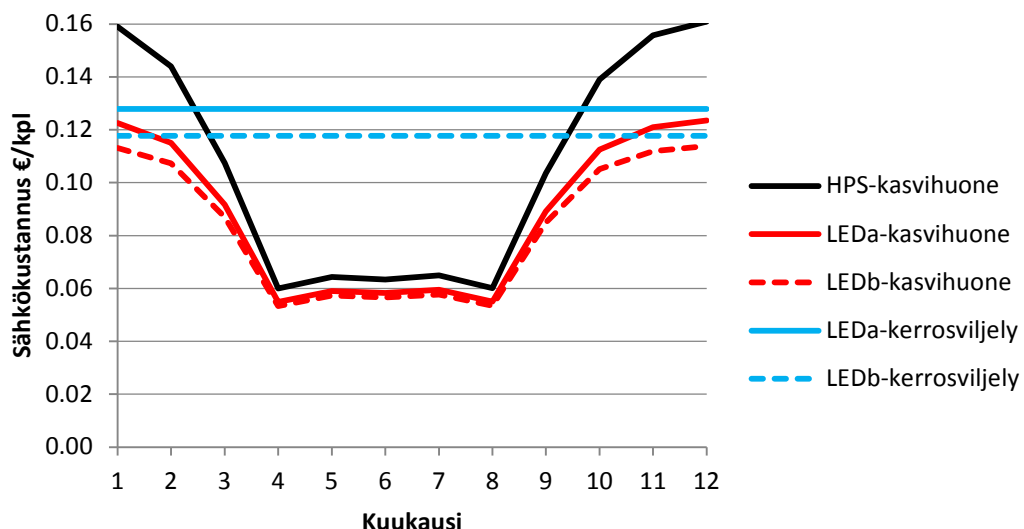
Kerrosviljelyssä ei ole suoraa lämmityskustannusta. Salaatin kasvatuksessa kasvihuoneen lämmön kulutus on luokkaa 300 kWh/ m^2 vuodessa, ja sen kustannus 2,5 sentin hinnalla on 7 €/ m^2 . Se ei siis riitä kattamaan kuin kolmanneksen sähkökustannuksen erotuksesta kerrosviljelyn ja kasvihuoneen välillä. Kerrosviljelyssä on poistettava valotuksen tuoma lämpö, joka suurimmalta osalta ajaa kasvien haihduntaa eli muuttuu latentiksi lämmöksi. Salaatin viljelyssä käytetyn alimman valovoimakkuuden 160 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ tuottaminen nykyisillä LED-valaisimilla vaatii 50–70 W/ m^2 sähkötehoa. Esim. 1000 m^2 viljelyalalta kerrosviljelyhuoneesta on poistettava vuorokaudessa lämpöä ja kosteutta noin 2,2 MWh. Merkittävää tuotannon taloudellisuudessa on ilmanvaihdon kustannus, joka riippuu lämmön ja kosteuden poiston energiatehokkuudesta ja lämmön hyötykäytön mahdollisuudesta.

Kerrosviljely ei suoraan kilpaile kasvihuoneviljelyn kanssa

LED-valotettu kerrosviljely näyttää huonosti kilpailukykyiseltä välittömien kustannusten ja ympäristövaikutusten osalta LED-valotetun kasvihuoneen kanssa. Kerrosviljelyn suurempi sähkökustannus tuotettua tuoteyksikköä tai neliometriä kohti pitäisi kompensoida lähinnä alemmilla rakennuksen kustannuksilla, lämmöntuoton tai -vaihdon kustannuksilla sekä korkeammalla tuotetun tuotteen hinnalla.

Massatuotannossa, jossa pienet tuotantokustannusten erot merkitsevät, kerrosviljely ei näytä pystyvän korvaamaan kasvihuoneviljelyä. Erotus valotuksen kustannuksessa saattaa kuitenkin olla katettavissa korkeammalla tuotteen hinnalla erikoistuotannossa, jos kerrosviljelyssä pystytään tuottamaan korkeampaa kuluttajan kokemaa laatua kuin kasvihuoneessa. Kerrosviljely voi olla myös kasvihuonealan ylläpitoa joustavampi vaihtoehto tuotannon määrän säätämisessä ja sopiva taimien tuottamiseen.

Koska erot eivät ole mahdottoman suuria, kerrosviljelyn kehitystyötä kannattaa jatkaa.



Kuva 21. Sähkökustannus €/kg erilaisilla valaisimilla valotetuissa kasvihuoneissa ja kerrosviljelmissä (tiedot kuvaan taulukon 6 alimmasta osasta).

Taulukko 6. Valotetun kasvihuoneen ja kerrosviljelyn salaattituotannon ja sähkökustannuksen vertailu. Valaisimet kasvihuoneessa HPS, LEDa ja LEDb. Valaisimet kerrosviljelyssä LEDa ja LEDb. Kaikkien sähköteho on 105 W/m². Sähkön hinta 7 c/kWh.

Viljely	Tam	Hel	Maa	Huh	Tou	Kes	Hei	Elo	Syy	Lok	Mar	Jou
Aurinko MJ/m ² /d	1	3	8	13	18	20	19	14	8	4	1	1
Läpäisevyys %	60	63	66	70	73	75	75	73	70	66	63	60
Verho päivällä %	50	20	10	10	40	50	50	30	10	5	10	30
Aurinko sisä mol/m ² /d	1	4	11	20	23	24	22	20	13	5	2	1
Korjuupaino g/kpl	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Valotus kasvih. h/vrk	24	24	20	12	14	14	14	12	20	24	24	24
Valotus kerrosv. h/vrk	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
<i>Valotus mol/m²/vrk (HPS 1,75 µmol/J - LEDa 2,3 µmol/J - LEDb 2,5 µmol/J)</i>												
HPS-kasvih.	16	16	13	8	9	9	9	8	13	16	16	16
LEDa-kasvih.	21	21	17	10	12	12	12	10	17	21	21	21
LEDb-kasvih.	23	23	19	11	13	13	13	11	19	23	23	23
LEDa-kerrosv.	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
LEDb-kerrosv.	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
<i>Koko valo mol/m²/vrk</i>												
HPS-kasvih.	17	20	24	28	32	33	32	27	26	21	17	16
LEDa-kasvih.	22	25	28	30	35	36	35	30	30	26	22	21
LEDb-kasvih.	24	27	30	31	36	37	36	31	31	28	24	23
LEDa-kerrosv.	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
LEDb-kerrosv.	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
<i>Kasvu aika vrk</i>												
HPS-kasvih.	45	41	37	34	31	31	32	34	35	39	44	46
LEDa-kasvih.	35	33	31	31	29	28	29	31	30	32	34	35
LEDb-kasvih.	32	30	30	30	28	28	28	30	29	30	32	32
LEDa-kerrosv.	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
LEDb-kerrosv.	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
<i>Valon käytön tehokkuus LUE g/mol</i>												
HPS-kasvih.	6,6	6,2	5,7	5,4	4,9	4,9	5,0	5,3	5,5	6,0	6,5	6,7
LEDa-kasvih.	6,6	6,2	5,7	5,4	4,9	4,9	5,0	5,3	5,5	6,0	6,5	6,7
LEDb-kasvih.	6,6	6,2	5,7	5,4	4,9	4,9	5,0	5,3	5,5	6,0	6,5	6,7
LEDa-kerrosv.	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6
LEDb-kerrosv.	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6
<i>Tuotanto kpl/m²/vrk</i>												
HPS-kasvih.	1,1	1,2	1,4	1,5	1,6	1,6	1,6	1,5	1,4	1,3	1,1	1,1
LEDa-kasvih.	1,4	1,5	1,6	1,6	1,7	1,8	1,7	1,6	1,6	1,6	1,5	1,4
LEDb-kasvih.	1,6	1,6	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,6	1,5
LEDa-kerrosv.	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
LEDb-kerrosv.	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
<i>Sähkön kulutus kWh/m²/d</i>												
HPS-kasvih.	2,5	2,5	2,1	1,3	1,5	1,5	1,5	1,3	2,1	2,5	2,5	2,5
LEDa-kasvih.	2,5	2,5	2,1	1,3	1,5	1,5	1,5	1,3	2,1	2,5	2,5	2,5
LEDb-kasvih.	2,5	2,5	2,1	1,3	1,5	1,5	1,5	1,3	2,1	2,5	2,5	2,5
LEDa-kerrosv.	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
LEDb-kerrosv.	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
<i>Tulos: Sähkökustannus €/kpl salaattia</i>												
HPS-kasvih.	0,16	0,14	0,11	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,10	0,14	0,16	0,16
LEDa-kasvih.	0,12	0,12	0,09	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,09	0,11	0,12	0,12
LEDb-kasvih.	0,11	0,11	0,09	0,05	0,06	0,06	0,06	0,05	0,08	0,11	0,11	0,11
LEDa-kerrosv.	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
LEDb-kerrosv.	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12

Laskutapa (yksiköt hakasuluissa ensimmäistä kertaa esiintyessään)***HPS-valotetussa kasvihuoneessa kuukausikeskiarvoina***

Lähtötiedot: Korjuupaino [g], Kasvuaika [d], Valo [$\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ d})$], Keskitiheys [m^2]

LUE [g/mol] = $(\text{Korjuupaino} * \text{Keskitiheys} / \text{Kasvuaika}) / \text{Valo}$

TuotantoKplNeliölle [$1/(\text{m}^2 \text{ d})$] = $\text{Keskitiheys} / \text{Kasvuaika}$

LED-valotetussa kasvihuoneessa kuukausikeskiarvoina

Lähtötiedot: LUE HPS-kasvihuoneesta, Korjuupaino sama kuin HPS-kasvihuoneessa, Valo

Kasvuaika = $(\text{Korjuupaino} * \text{Keskitiheys}) / (\text{LUE} * \text{Valo})$

TuotantoKplNeliölle = $\text{Keskitiheys} / \text{Kasvuaika}$

Kaikissa viljelytavoissa

Valotus [$\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ d})$] = $\text{Valotusteho} [\text{W}/\text{m}^2] * \text{Valotehokkuus} [\mu\text{mol}/\text{J}]$
 $* \text{Valotusaika} [\text{h}/\text{d}] * 0,0036$

AurinkoVerhonAlla [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \text{ d})$] = $(1 - \text{Verho} [\%] / 100) * \text{AurinkoSisällä} [\text{MJ}/(\text{m}^2 \text{ d})]$
 $+ \text{Verho}/100 * 0,4 * \text{AurinkoSisällä}$

AurinkoValo [$\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ d})$] = $2,3 [\mu\text{mol}/\text{J}] * \text{AurinkoVerhonAlla}$

Valo [$\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ d})$] = $\text{AurinkoValo} + \text{Valotus}$

SähkönKulutusNeliölle [$\text{kWh}/(\text{m}^2 \text{ d})$] = $\text{Valotusteho} [\text{W}/\text{m}^2] * \text{Valotusaika} [\text{h}/\text{d}] / 1000$

SähkönKulutusPerKpl [kWh] = $\text{SähkönKulutusNeliölle} / \text{TuotantoKplNeliölle}$

7. Investointitarve LED-valotukseen ja vaikutus energian kulutukseen

Hinnat määräytyvät markkinoilla, mutta kokonaisinvestointeja voidaan haarukoida

LED-investointien hinnat määräytyvät yritysten välisessä kaupassa, mutta kannattavien investointien kokonaisvolyymi voidaan arvioida suurin piirtein, jos oletetaan, että LED-valaisimien alemman sähkön kulutuksen täytyy korvata kohtuullisessa ajassa LED-korvausinvestoinnin ja siihen mahdollisesti liittyvän lämmityksen muutoksen kustannus. Alla olevat arviot koskevat viljelijöiden omia kustannuksia. Niihin täytyy lisätä mahdollinen investointituki.

Nykyisillä LED-valaisimilla 30–50 % sähköenergian säästö = investointivara

Nykyisillä LED-valaisimilla voidaan saavuttaa varovasti arvioiden 30–50 % sähköenergian säästö verrattuna HPS-valaisimiin. Viljelyssä, jossa käytetään nyt suurta valomäärää, sähkön käytön vähenemisestä johtuva valaisimien lämmön tuoton alentuminen johtaa sen osittaiseen kompensoimiseen lämmityksellä talvikaudella. Toisaalta tomaatilla LED-valotukseen on voitu siirtyä ilman merkittävää lämmityksen lisäystä. Lämmityspolttoaineen hinta energiayksikköä kohti on joka tapauksessa noin kolme kertaa alhaisempi kuin sähkön hinta nykytasolla.

Valmistajien mukaan nykyisten LED-valaisimien taloudellinen käyttöikä (valon tuoton alentuminen 90 prosenttiin alkuperäisestä) on 25 000–35 000 tuntia. Ympärivuotisessa tuotannossa se vastaa viidestä seitsemään vuoden käyttöaikaa. LED-valaisimiin investoinnin tulisi maksaa itsensä takaisin alentuneena sähkökustannuksena huomattavasti lyhyemmässä ajassa.

LED-valaisimet kehittyvät vielä

HPS-valaisimilla valotettu viljelyala on ollut viimeiset 15 vuotta yli 30 ha ja viimeiset 10 vuotta 45–50 ha (Luke, Puutarhatilastot 2015). Tomaattia on 30 ha, kurkkua 20 ha. Ruokkuvihannesten (salaatit, yrtit) ala on kolminkertaistunut 30 hehtaariin. Sähkön kulutus on kasvanut kymmenessä vuodessa noin 20 %, mutta vakiintunut viimeisten viiden vuoden aikana (Luke, Kasvihuoneyritysten energian kulutus vuosina 2006, 2008, 2011 ja 2014).

HPS-valaisimen suurin käyttöikä on noin 10 vuotta. Valaisimien nykyisen ikärakenteen pohjalta voidaan odottaa tasaista siirtymistä HPS-valaisimista LED-valaisimiin seuraavan vajaan 10 vuoden aikana, jos LED-valaisimien hinta sen mahdollistaa. LED-valaisimien sähkön käytön tehokkuus kasvaa edelleen, mutta suurin kehitys on jo tapahtunut.

LED-investointien mahdollisuus 5–13 milj. euroa/vuosi

Sähköenergian kulutus kasvihuoneyrityksissä on vajaat 550 GWh, josta lähes kaikki käytetään valotukseen. Sähkön hinnan kasvihuoneyrityksille, huomioiden energian hinta, siirtohintaa ja vero, odotetaan seuraavan 5–10 vuoden aikana olevan 100–150 €/MWh. 100 €/MWh sähkön hinnalla vuotuinen sähkökustannus on 55 milj. euroa. 30–50 prosentin säästö on 165–275 GWh/vuosi, alemmalla sähkön hinnalla 16,5–27,5 ja ylemmällä 25,8–41,3 milj. euroa/vuosi. Kolmen vuoden takaisinmaksuajalla LED-korvausinvestointien hinta (sisältäen muutosinvestoinnit lämmitykseen) viljelijöille voi olla alemmalla sähkön hinnalla 50–80 ja ylemmällä 74–124 milj. euroa ilman verotus- ja investointituki-vaikutuksia.

Koko maassa 10 vuoden ajalle jaettuna vuotuiset viljelijöiden korvausinvestoinnit voivat olla 5–13 milj. euroa vuodessa. Kokonaisuudessaan viljelijöiden investoinnit voivat olla suurempiakin, koska tomaatilla LED-valaisimia lisätään rivien väliin välivalotukseen ja ruokkuvihanneksilla on ehkä mahdollista nostaa valotuksen voimakkuutta.

Kasvihuonesektorin sähkön käytön alentumismahdollisuus luokkaa 275 GWh/vuosi

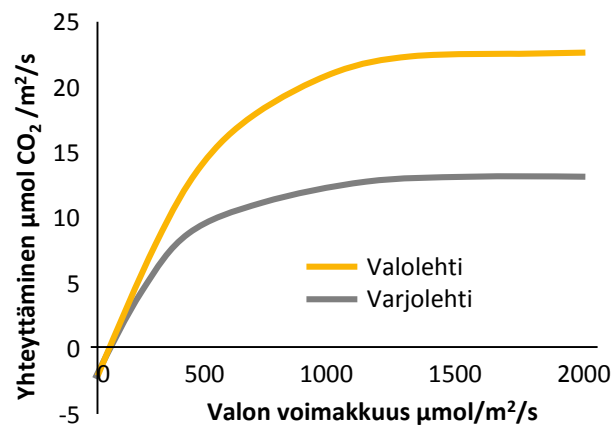
Kasvihuonesektorin sähkön käytön vähentymismahdollisuus voi olla lopulta noin 275 GWh/vuosi, jos valotuksen määrä ei kasva ja käyttöön otettavien LED-valaisimien sähkön käytön tehokkuus on keskimäärin 50 % parempi kuin HPS-valaisimien tehokkuus. On tosin mahdollista, että alentuva valon tuoton kustannus lisää kasvuvalojen käyttöä.

8. Valon käyttö kasvustossa ja kasvun ohjaaminen valolla

8.1. Valon vaikutus pidemmällä aikavälillä yhteyttämiskapasiteettiin

Tasainen valomäärä ylläpitää lehden yhteyttämiskyvyn

Yhteyttämisessä käyttökelpoinen säteily (PAR) tuottaa kasvun ja sadon (Kuva 22). Yksittäisen lehden kyky käyttää lisättyä valoa riippuu sen aikaisemmin saamasta valon määrästä. Jos lehti on kasvanut ensisijaisesti varjossa, kuten tiheässä kasvustossa tai vähäisessä valotuksessa, hyödyntää se lisääntynyttä valoa yhteyttämiseen heikommin kuin runsaassa valossa kasvanut lehti. Niukassa valossa kasvanneet lehdet ovat ohuempia, sisältävät vähemmän viherhiukkasia ja vanhenevat nopeammin kuin runsaassa valossa kasvanneet lehdet. Siksi välivalon käyttö pilvisen jakson aikana lisää, paitsi hetkellistä yhteyttämistä, myös lehtien yhteyttämiskykyä, kun valon määrä taas lisääntyy.

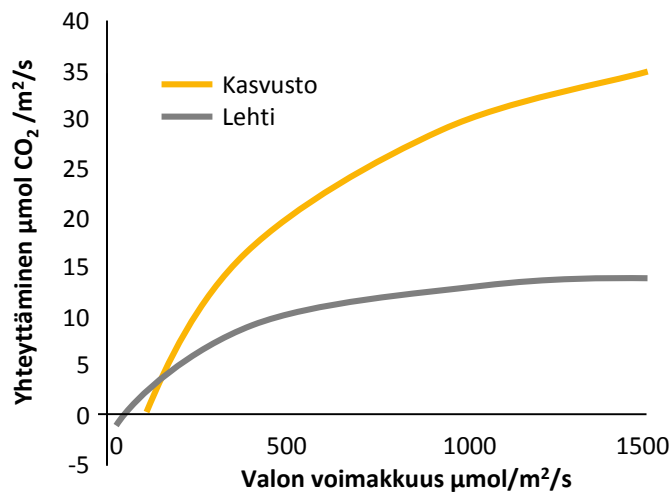


Kuva 22. Valon voimakkuuden lisääntyessä lehden yhteyttäminen aluksi suoraviivaisesti, sitten vähenevällä teholla ja lopulta lisävalo ei enää tuota lisää yhteyttämistä. Kun lehdet ovat kasvanneet ja kehittyneet runsaassa valossa (valolehdet), ne pystyvät hyödyntämään suurempaa valon intensiteettiä kuin lehdet, jotka ovat kasvanneet varjossa (varjolehdet). (Lähteenä käytetty Huang ym. 2014). 1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ vastaa noin 430 W/m² auringon valoa. HPS-ylävalaisimilla tuotetaan 300–400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ylälehdille.

Valossa kasvanneet lehdet säilyttävät yhteyttämistehonsa

Kokonaisen kasvuston kyky hyödyntää lisääntyvää valoa yhteyttämiseen on parempi kuin yksittäisistä lehdistä mitattu yhteyttämisvaste (Kuva 23). Tämä johtuu siitä, että kasvusto rakentuu eri kehitysvaiheissa olevista lehdistä. Kasvuston sisällä ja niukassa valossa olevat lehdet kykenevät hyödyntämään myös muiden lehtien läpi tullutta valoa. Jotta koko kasvuston kaikkien lehtien kyky vastata lisääntyvään valoon olisi mahdollisimman suuri, olisi parasta valottaa koko satoa tuottava kasvusto tasaisesti riittävällä valolla koko kasvatuksen ajan.

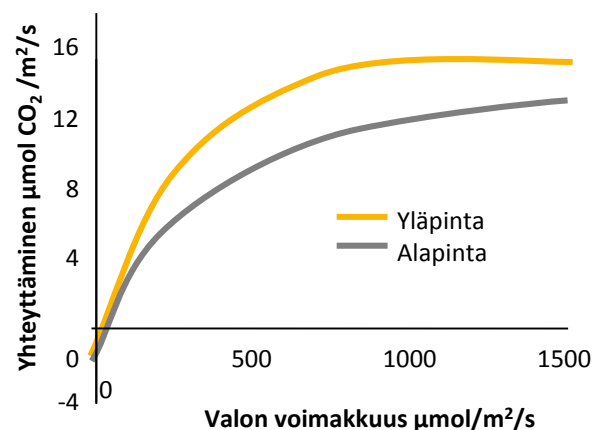
Yhteyttämistehokkuuden lisäksi tasainen valotus edistää yhteyttämisessä muodostuneiden yhdisteiden kulkeutumista kehittyviin hedelmiin. Tutkimusten mukaan (Hovi ym. 2004, Pettersen ym. 2010) tasaisesti valotettu kurkkukasvusto tuottaa 10–20 % suuremman sadon kuin yksinomaan kasvuston yläpuolelta valotettu kasvusto. Esimerkiksi kasvuston sisään sijoitetuilla LED-valaisimilla voidaan paprikan sadontuottoa lisätä jopa 16 % (Jokinen ym. 2012). LED-valaisimien vähäisempi lämmöntuotto suhteessa PAR-säteilyn intensiteettiin mahdollistaa valon nykyistä tasaisemman jakamisen korkeissa kasvustoissa.



Kuva 23. Kokonaisen kasvuston kyky hyödyntää lisääntyvää valoa on yleensä merkittävästi suurempi kuin yksittäisen lehden kyky (Ruimy ym. 1995).

Lehtien yläpinnat käyttävät tehokkaammin PAR-säteilyä kuin alapinnat

Kasvuston tiheydestä riippuen osa lehden pinnalle saapuvasta valosta (10–20 %) heijastuu joko kasvuston muiden lehtien käyttöön tai kokonaan kasvuston ulottumattomiin. Kun valo heijastuu lehtien alapinnoille, on sen vaikutus lehden yhteyttämiseen pienempi kuin valon tullessa lehtien yläpinnoille (Kuva 24). Kun korkeita kasvustoja kuten kurkkua ja tomaattia välivalotetaan ja välivalotettava lehtikerros on harva, kohdistuu osa valosta vastapuolella olevien lehtien alapinnoille, jossa valoa ei hyödynnetä yhtä tehokkaasti kuin yläpinnoilla.



Kuva 24. Lehden yläpinnalle kohdistuva valo on kasvin yhteyttämisen kannalta tehokkaampaa kuin alapinnalle saapuva valo (Terashima 1986).

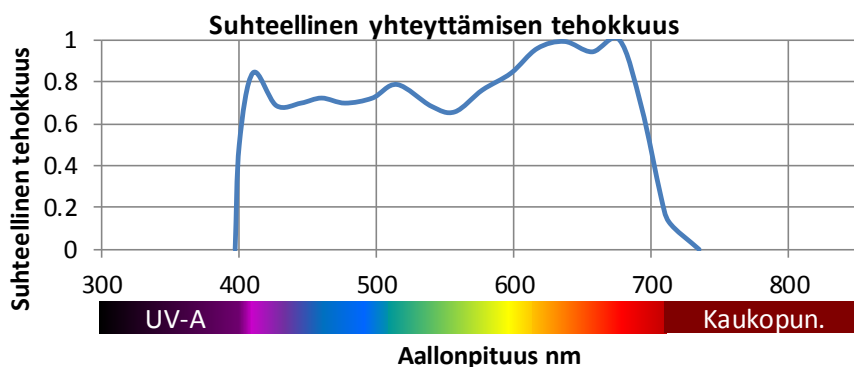
8.2. Valon aallonpituuskaistojen käyttö yhteyttämiseen

Punainen valo tehokkainta yhteyttämässä

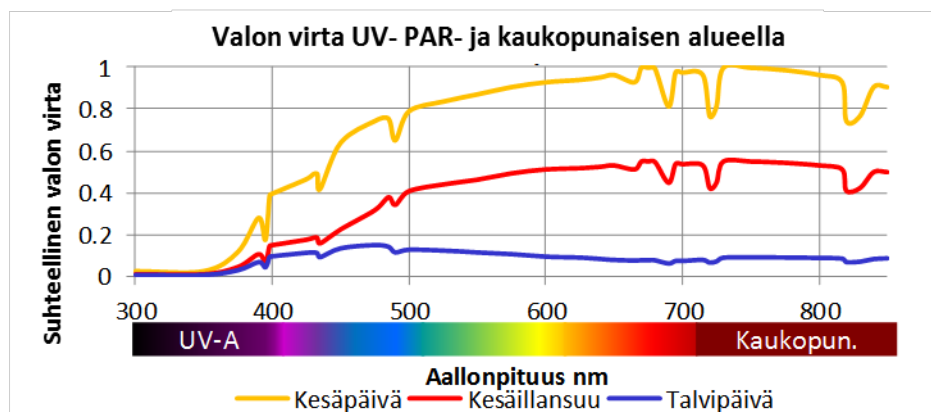
Kasvit käyttävät koko PAR-kaistan (400–700 nm) säteilyä yhteyttämässä. PAR-kaista alkaa sinisestä, jatkuu vihreän ja oranssin kautta syvän punaiseen. Punainen valo (600–700 nm) käytetään yhteyttämässä tehokkaammin kuin muut aallonpituudet. Kuvassa 25 on kokeellisesti havaittu PAR-valon tuottama yhteytys kurkun lehdessä. Siinä punainen valo tuottaa 20–35 % suuremman yhteyttämisen kuin sininen (400–500 nm).

Avautuessaan lehti on voimakkaassa valossa, jossa on vähintään jonkun verran auringon valoa koko spektrin alalta. Jäädessään alemmaksi kasvin varressa lehti saa vähemmän valoa ja valon spektrissä vihreän (520–570 nm) ja kaukopunaisen (710–850 nm) osuudet kasvavat, koska ne läpäisevät paremmin lehtiä.

Auringon valon spektri muuttuu päivän aikana ja erityisesti vuodenajan mukaan (Kuva 26).



Kuva 25. Valon suhteellinen tehokkuus yhteyttämässä (0–1) valon aallonpituuden mukaan. Laskettu Hogewoning ym. (2012) julkaiseman kurkun lehtien yhteyttämävasteen ja lehtien absorptiospektrin mukaan.



Kuva 26. Auringon valon spektri kesäpäivänä, kesällä illansuussa ja talvipäivänä korjattuna säteilyn voimakkuudella. Lähde <https://en.wikipedia.org/wiki/Sunlight>.

LED-valaisimen valon käyttö yhteyttämässä ja siten kasvien kasvatuksessa (grammaa kasvua per joulea sähköä) on jonkun verran parempi, jos valaisimessa on enemmän punaista kuin sinistä valoa (400–500 nm) tai muita aallonpituuksia. Runsasta punaisen valon käyttöä puoltaa myös se, että nykyiset punaiset LEDit myös muuntavat sähköä tehokkaammin valoksi ($\mu\text{mol/J}$) kuin siniset LEDit. Useimmissa LED-valaisimissa, joita tarjotaan voimakkaasti kasvavien kasvien kasvatukseen, onkin

pääasiassa punaisia LEDejä. Oleellista on kuitenkin, että LED-valaisimet ovat kokonaisuudessaan tehokkaampia koko PAR-alueen valon tuottajina kuin HPS-valaisimet.

Punainen valo tarvitsee vähintään sinistä täydennystä 10–20 %

On todettu, että (syvän)punainen valo (tehohuippu 660 nm) ei yksin toimi kasvien valottamisessa, jos keinovaloa on runsaasti suhteessa auringon valoon. Muiden aallonpituuksien puuttuminen vähentää yhteyttämistä, vaikuttaa voimakkaasti kasvien kehittymiseen, muotoon ja lopulta satoon. Tämän hetken käsitys on, että LED-valaisimessa voi olla runsaasti punaista valoa, mutta sen lisäksi tarvitaan vähintäänkin sinistä (tehohuippu 440 nm), luokkaa 10–20 % koko PAR-säteilystä. Viljelykasveille sininen on tärkeää, koska se vaikuttaa myös kasvien väriin (vihreä klorofylli sekä punaisen, keltaisen ja violetin tuottavat sekundaarimetaboliitit) ja makuun.

Laaja spektri sininen-vihreä-punainen tehokkain korkean kasvuston valotuksessa

Usein spektri, joka sisältää useita aallonpituusalueita PAR-säteilystä ja mahdollisesti jopa sen ulkopuolelta, tuottaa parhaan koko kasvuston yhteyttämisen, kasvien kehityksen ja sadon. Vihreä valokin, joka lehden yhteyttämässä tulee käytettyä huomattavasti enemmän kuin sininen ja punainen, on käyttökelpoista yhteyttämiseen, kunhan lehden pigmentit saavat sen kiinni. Vihreä läpäisee osittain lehdet ja päätyy kasvien alempien tai sisempien lehtien käytettäväksi. Punainen ja sininen läpäisevät heikommin lehtiä, joten ne eivät saavuta alempia lehtiä.

Spektrillä vaikutetaan kasvien muotoon ja kasvun tasapainoon

Kaukopunainen (710–850 nm) säteily ei ole käyttökelpoista yhteyttämässä, mutta sen suhde punaiseen valoon ohjaa yhteyttämällä tuotettua kasvua solunjakautumisen ja laajentumisen kautta. Kaukopunaisen tarve riippuu tavoitellusta lehtien koosta ja kasvun tasapainosta.

Eri kasvilajeilla on erilainen optimaalinen spektrikoostumus viljelyssä käytetylle valotukselle. Esimerkiksi salaateilla ja yrteillä sopiva spektri kasvatuksessa edistää lehtien laajentumista lehtien paksuuden kustannuksella. Isommat lehdet kaappaavat enemmän valoa yhteyttämiseen ja siten saadaan kasvu nopeasti alkuun. Kurkulla ja tomaatilla spektrin, lämpötilan ja lajikkeen yhteisvaikutuksella pidetään yllä kasvun tasapainoa.

8.3. Valon aallonpituuskaistojen käyttö kasvun säätöön

Spektrillä kasvun säätöä

Kukka- ja taimiviljelyssä spektri tarjoaa mahdollisuuksia parantaa tuotteiden laatua. Jatkuvan valotuksen spektri ja jopa lyhyen aikaa varsinaisen valojakson ulkopuolella annettu spektriltään erilainen tehostevalotus säätelee kasvien kehitysnopeutta (lehtien esiintulo, kukinta-aika), muotoa (nivelpäli, lehtien laajuus, kukkien lukumäärä, juurien synty) ja väriä (lehtien ja kukkien väri) (Kuva 27).



Kuva 27. Joulutähden kokoa ja muotoa voidaan tehokkaasti muokata LED-valaisimen spektrikoostumuksella. Valon voimakkuus kaikille kasveille on ollut viljelyn aikana $110 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (Kari Jokinen, Luke).

Sininen LED HPS-valotuksen täydentäjäksi

Koska HPS-valaisimien spektrissä on hyvin niukasti sinistä valoa, valaisinvalmistajat tarjoavat pelkääntään sinistä valoa tuottavia LED-valaisimia HPS-valaisimien täydentäjäksi. Tarkoitus on korjata valotuksen spektriä niin, että HPS-valaisimien säteily tulee tehokkaammin käytettyä. Sinisellä voidaan myös säätää kasvua niin, että kasveista tulee lyhyempiä ja tiiviimpiä (Kuva 28).



Kuva 28. Lyhimmät basilikat ovat saaneet suhteellisesti enemmän sinistä valoa muihin aallonpituuksiin verrattuna (Kari Jokinen, Luke).

Viljelykauden mittaan paras mahdollinen valaisimien spektrin muuttuu

Periaatteessa optimaaliseen valaisimien spektri on erilainen kasvien kehityksen eri vaiheissa (taimen kasvu, kukinta, hedelmien kehitys ja kasvu, viljelykauden lopun kasvun ohjaaminen hedelmiin) ja vuodenaikoina. Auringon valon punainen-kaukopunainen-suhde muuttuu vuodenajan mukaan. Vuodenaikojen mukaan muuttuvat myös kehitykseen vaikuttavat päivä- ja yölämpötilat. Keväästä syksyyn auringon valo riittää korjaamaan valaisimien spektrin pieniä puutteita. Keskitälvellä Suomessa aurinko ei kuitenkaan riitä korjaamaan spektrin puutteita, jotka eivät tule esille etelämpänä, kuten Keski-Euroopassa, Pohjois-Amerikassa, Japanissa ja Koreassa.

Kompromissispektri tai kalliimmalla täysi valikoima spektrejä

Viljelijä hakee ensisijaisesti sellaista spektrin kompromissia, joka toimii koko viljelyajan ja on käyttökelpoinen kasvihuoneyrityksen vaihtaessa viljelykasvia. Jos kehitysvaiheen, vuodenajan ja sijainnin vuoksi tarvitaan hyvin erilaisia valaisimen spektrejä, tarjoavat useat valmistajat valaisimia, joissa neljästä yhdeksään aallonpituuskaistan LEDien tehoa voidaan säätää erikseen. Säädeltävyys ei tietenkään tule ilmaiseksi. Tämän hetken valaisimissa yhdeksän säädettävää aallonpituusaluetta suunnitteen tuplaa valaisimen hinnan per watti verrattuna kiinteästi muutamaa aallonpituutta tuottavaan valaisimeen.

Aallonpituuskaistojen käyttökohteet

Käytännön viljelyn näkökulmasta auringon ja valaisimien spektrin vaikutus kasvuun ja kehitykseen:

Sininen (blue, 400–500 nm, huippuvaikutus 440–450 nm)

- Sininen on käyttökelpoista yhteyttämisessä
- Sininen on välttämätön täydentäjä punaiselle valolle, jotta kasvit kehittyvät hyvin
- Sininen LED-valo on hyvä täydentäjä HPS-valolle, jossa on vähän sinistä
- Sinisellä voi ohjata kasveja tiukemmaksi: lyhyempi nivelväli, pienemmät ja paksummat lehdet
- Sinisellä voi lisätä sekundaarimetaboliittien tuotantoa kasveissa, mikä näkyy lehtien puna- ja sinisävyisenä värinä ja vaikuttaa makuun

Vihreä (green, 500–600 nm, sisältää siis myös keltaisen)

- Vihreän hyötysuhde valossa olevien lehtien yhteyttämisessä on heikompi kuin sinisen ja punaisen
- Vihreä kuitenkin läpäisee lehtiä ja päättyy varjossa oleviin lehtiin yhteyttämisen käyttöön

Punainen, syvänpunainen (red, deep red, 600–700 nm, huippuvaikutus 660 nm)

- Punainen ja erityisesti syvänpunainen (huippu 660 nm) on tehokasta valoa yhteyttämisessä
- Punainen aikaistaa pitkän päivän kasvien kukkien tuottoa ja myöhentää lyhyen päivän kasvien kukkien tuottoa

Kaukopunainen (far red, 710–850 nm)

- Kaukopunainen ei ole yhteyttämisessä käyttökelpoista
- Punaisen 655–665 nm suhde kaukopunaisen 725–735 nm säteilyyn (red far-red ratio, R:FR) vaikuttaa kasvien muotoon
- Korkea R:FR ohjaa kasvua kompaktiin suuntaan
- Kaukopunainen aikaistaa lyhyen päivän kasvien kukintaa

- Matala R:FR lisää solujen jakautumista ja laajentumista ohjaten, minkä seurauksena lehdet kasvavat laajemmiksi ja nivelvälit pidemmiksi sekä juuret pidemmiksi
– toivottu vaikutus kun halutaan nopeaa lehtialan kasvua ja juuriston laajentumista, epätoivottu vaikutus kun halutaan kasvun ohjautuvan suurelta osin hedelmiin tai halutaan kompaktia kasvua. R:FR-suhteen vaikutus riippuu kasvilajista ja lajikkeesta
- HPS-valaisimen valossa R:FR on noin 2–3
- LED-valaisimissa R:FR on valittujen LEDien määräämä, puhtaassa puna-sini-LED-valaisimessa R:FR on ääretön; LED-valaisimissa joihin on lisätty kaukopunaista tuottavia LEDejä, R:FR on yleensä 2–8
- Auringon valossa R:FR on päivällä noin 1, aamulla ja illalla luokkaa 0,6, mutta kasvuston läpi siivilöityneessä valossa paljon alhaisempi, luokkaa alle 0,1

Valkoinen (vaihtelevasti 400–700 nm välillä kaistoja)

- Valkoinen (white) (ei ilmoiteta aallonpituuskaistaa, vaan värilämpö Kelvineinä (K)). Valkoinen tuotetaan ledin fosforipinnoitteella tai se on useiden eriväristen ledien yhdistelmä. Valkoisen valon osakaistat ovat käytettävissä yhteyttämiseen ja valkoisella saadaan hyvä kasvien värin toisto ihmissilmälle

UV-säteily (UV-A 315–400 nm, UV-B 280–315 nm)

- UV-B ja UV-A lisäävät väriä ja makua tuottavia sekundaarimetaboliitteja sekä vaikuttavat lehden pinnan paksuuteen, LED-valaisimissa on vähän tai ei lainkaan UV-säteilyä

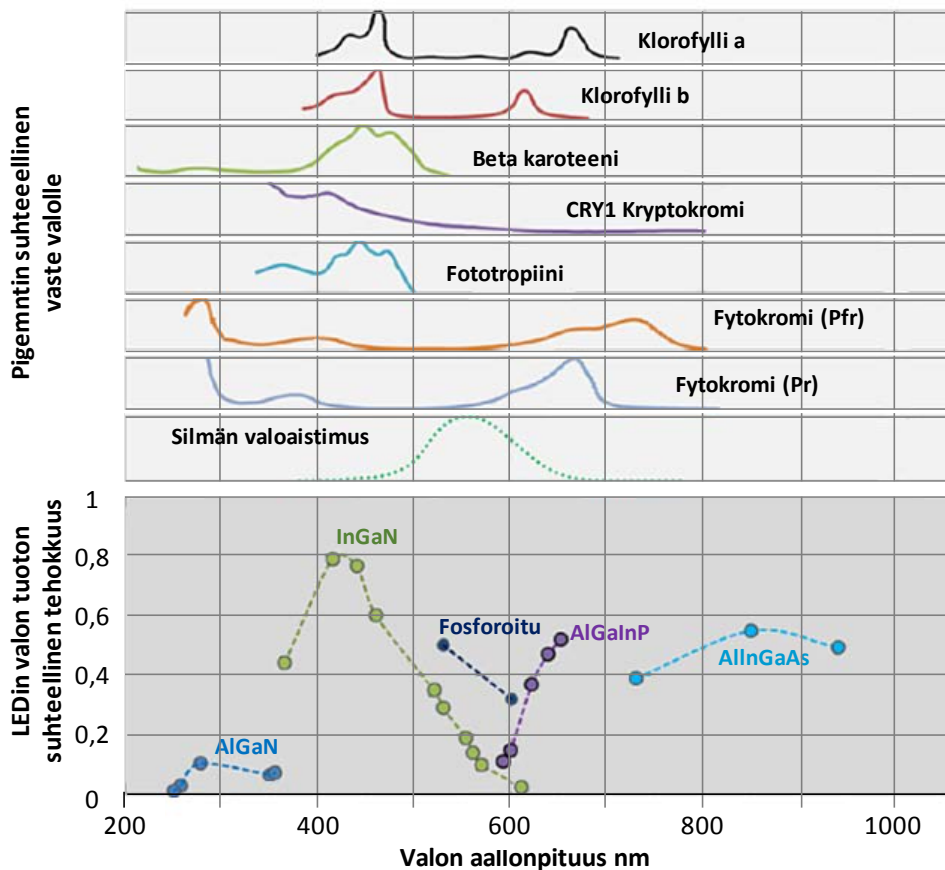
8.4. Valon värien käyttöä laadun tekemiseen täytyy parantaa

Kasvien valoaisteja ei vielä osata hyödyntää täysimittaisesti

Kasveissa on erilaisia pigmentti- eli värimolekyyliä. Nämä vastaanottavat eli imevät ainoastaan tietyn väristä valoa (Kuva 29). Kun kasvi imee valoa, aiheuttaa se yleensä muutoksia kasvin aineenvaihdunnassa. Koska pigmentit imevät pääsääntöisesti sinistä ja punaista, vihreä valo läpäisee kasveja ja heijastuu voimakkaammin niistä. Tällöin ihmissilmä näkee kasvit vihreinä, koska silmän valoäistimus on tehokas vihreällä alueella ja siten erilainen kuin kasvien valovaste ja -aistumus.

Klorofylli kaappaa fotoneita yhteyttämiseen

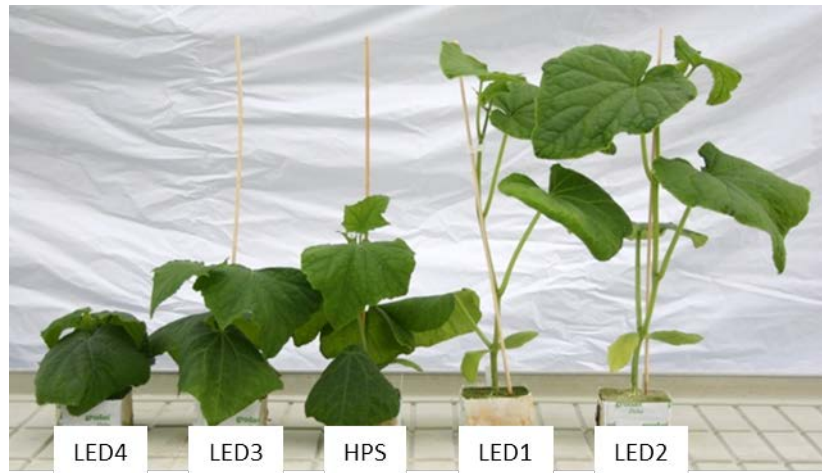
Kun kasvi reagoi tietyn värisen valoon, johtaa se muutokseen kasvin kasvussa ja kehityksessä. Yleisimmin tunnettuja ovat kasvin klorofyllimolekyylit a ja b, jotka keräävät sinistä (455–490 nm) ja punaista (620–780 nm) valoa yhteyttämisreaktioon. Tällöin valon sisältämä energia (fotonit) muuttuu kemialliseksi energiaksi (hiilihydraatit, rasvat ja proteiinit). Mitä enemmän kasvia valotetaan esimerkiksi punaisella LED-valolla tiettyyn rajaan asti, sitä enemmän kasvit imevät ja hyödyntävät fotoneja ja kasvu kiihtyy. Vaikka klorofyllit imevät myös sinistä valoa, sen liiallinen käyttö suhteessa punaiseen johtaa kuitenkin kasvin nivelvälien lyhentymiseen. Tämä johtuu siitä, että osittain kasvien pituuskasvusta vastaava ja kasvin lehdessä oleva fototropiini aktivoituu voimakkaasti ja vähentää pituuskasvua.



Kuva 29. Kasveissa valoa vastaanottavien pigmenttimolekyylien (Klorofylli a ... Fytokromi Pr) ja silmän valoistimuksen suhteellinen valovaste eri aallonpituusalueilla (yläkuva). Eriväristä valoa tuottavien LEDien valon tuoton suhteellinen tehokkuus eri aallonpituusalueilla (alakuva) (Lähde: Pattison ym. 2016).

Fytokromin Pr- ja Pfr-muodot kaappaavat punaista ja kaukopunaista valoa

Kasvissa esiintyvä fytokromi-pigmentti vastaanottaa punaista valoa ja sen kaksi eri kemiallista muotoa (Pr ja Pfr) vaikuttavat muun muassa siementen itämiseen, kasvin kukinnan virittymiseen, lehtien vanhenemiseen ja kasvin pituuskasvuun. Joidenkin lajien siementen itäminen voidaan estää käsittelemällä siemeniä kaukopunaishella valolla. Mikäli kasville annetaan suhteellisesti enemmän kaukopunaista kuin punaista valoa, voimistuu kasvin pituuskasvu ja lehtien laajuuskasvu (Kuva 30).



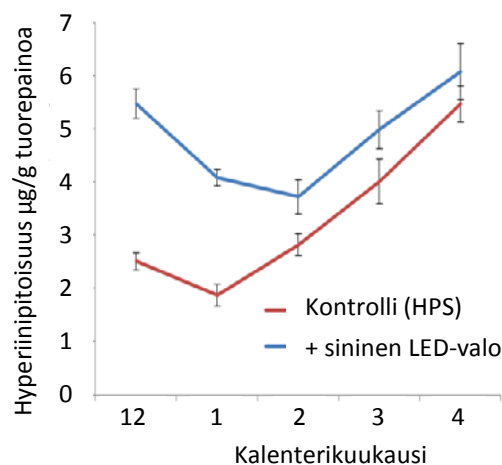
Kuva 30. Kurkun taimien pituuskasvuun ja lehtien pinta-alaan vaikuttaa voimakkaasti LED-valaisimessa olevan punaisen ja kaukopunaisen valon suhde (R:FR). Kuvassa vasemman puoleisin kasvi on kasvanut valossa, jonka R:FR-suhde suurin. Oikealle R:FR pienee. Kasvatuksessa käytetty valon voimakkuus on kaikille yksilöille ollut sama ($150 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) (Kari Jokinen, Luke).

Karoteenit kaappaavat sinistä ja vihreää

Kasveissa olevat karoteenit ovat oransseja, keltaisia tai punaisia kasvien väriaineita ja vastaavat muun muassa hedelmien värinmuodostuksesta. Beta-karoteenit ovat myös elimistössä A-vitamiinin esiasteita. Valottamalla kasveja LED-valolla, joka on väriltään sinistä/vihreää valoa (400-550 nm) voidaan hedelmien beta-karoteenin pitoisuutta lisätä ja siten vaikuttaa hedelmien laatuun. Vastaavasti monet kasvien lehdistä olevat makuaineet lisääntyvät sinisen valon vaikutuksesta.

Valolla vaikutus jopa rohdosmaisten aineiden kertymiseen

Valotuksella tuskin kannattaa tavoitella kasvihuonevihanneksiin rohdosvaikutuksia, mutta yksittäisten kuluttajia kiinnostavien yhdisteiden kertymiseen voidaan vaikuttaa valon spektrillä (Kuva 31).



Kuva 31. Sinivoittainen LED-valotus yhdistettynä perinteiseen HPS-valotukseen edistää tomaatin hedelmässä muodostuvan ja terveysvaikutteisen hyperiini-yhdisteen muodostumista erityisesti vuoden pimeimpänä aikana. Tutkimuksesta vastasivat MTT (nykyisin Luke), Yrkeshögskolan Novia, Itä-Suomen Yliopisto ja LED Finland Oy (Kivimäenpää ym. 2014).

9. LED-valotus eurooppalaisessa kasvihuonetuotannossa

9.1. Kilpailijoiden energian käytön strategia

Ilmasto Suomessa, Puolassa ja Hollannissa

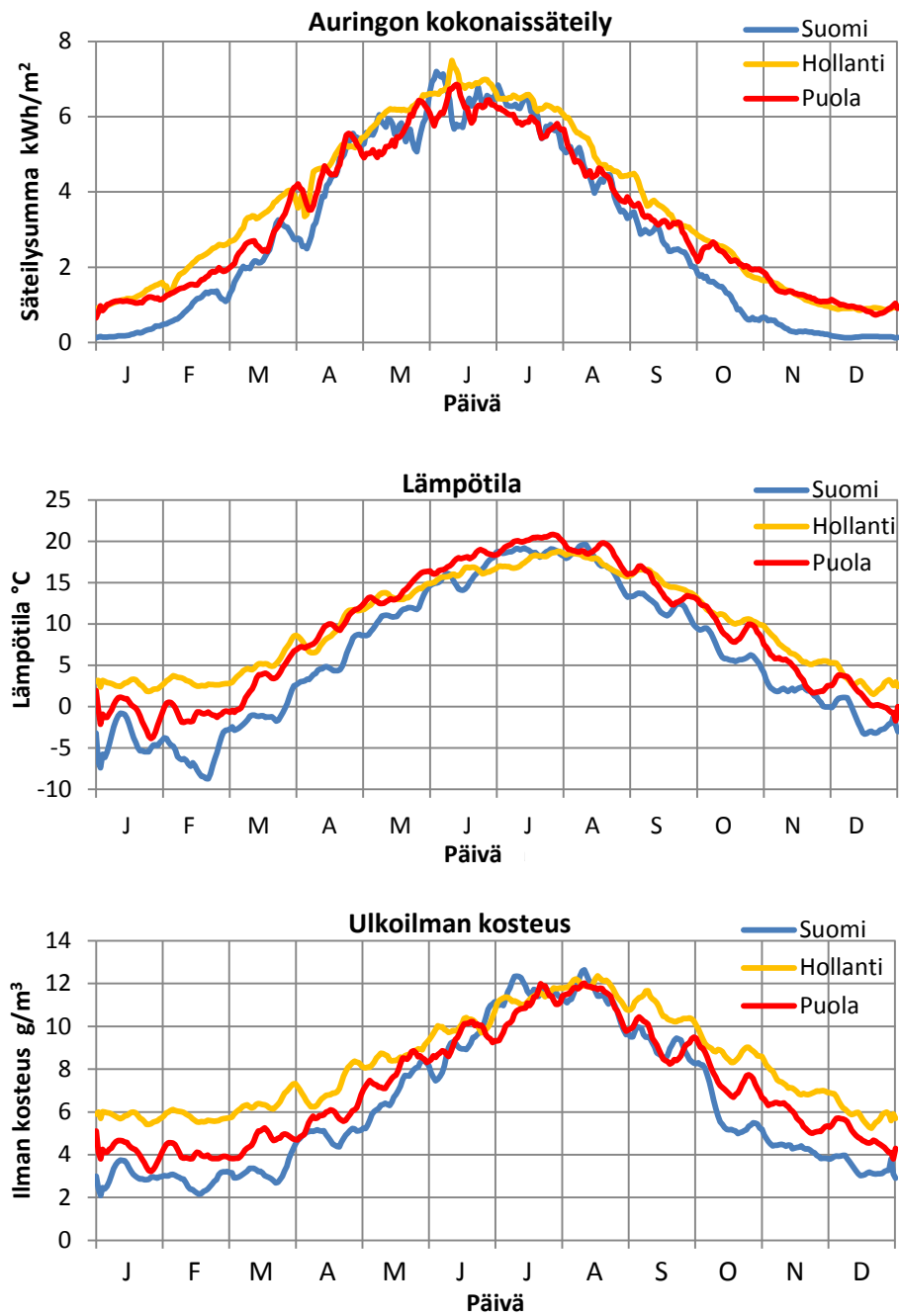
Kuvassa 32 on valotuksen kannalta tärkeitä ilmasto-ominaisuuksia Suomessa, Puolassa ja Hollannissa. Säteilyn määrä Hollannissa ja Puolassa on läpi talven sama kuin Suomen lokakuun säteilymäärä. Ulkoilman lämpötila näkyy ilman kosteudessa. Hollannissa ulkoilman kosteus on talvella 6 g/m^3 ja Suomessa $2,5 \text{ g/m}^3$. Katteen lämpötila riittää tiivistämään kosteuden suurimman osan vuotta Hollannissa ja Puolassa yhtä hyvin kuin Suomessa. Kun kasvihuoneen sisälämpötila on 20°C ja kosteus 14 g/m^3 , kosteuden poisto 1 g/m^3 kasvihuoneilmaa tuulettamalla ja lämmittämällä tarvitsee syksyllä Suomessa $10,6 \text{ kJ}$ (ulkolämpötila 0°C , ulkokosteus $2,5 \text{ g/m}^3$) ja Hollannissa $11,5 \text{ kJ}$ (ulkolämpötila 5°C , ulkokosteus 6 g/m^3).

Hollannissa valotusta ei ole rajoittanut ilmasto

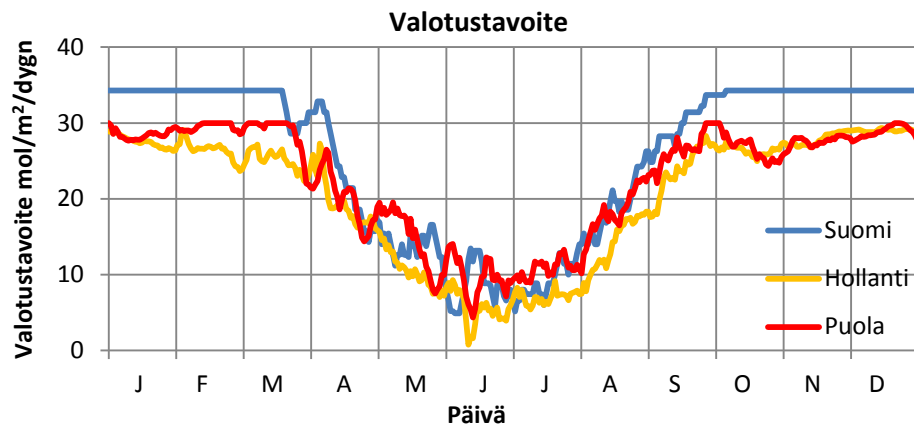
Noin kolmannes Hollannin kasvihuonealasta on valotettua, mutta asennusteho ja valon intensiteetti ovat yleensä alhaisia (Velden ja Smit 2015), joten sähkön osuus energian kulutuksesta on pieni. Valotuksen runsaammalle käytölle Hollannissa ei ole ollut rajoituksena ilmasto, vaan espanjalaisen kasvihuonetuotannon hintakilpailu, 1990-luvulta alkaen kasvihuoneyrityksissä yleistynyt lämmön ja sähkön yhteistuotanto (CHP) käyttäen kaasua polttoaineena, sekä 2000-luvun lopulle jatkunut korkea tukkusähkön hinta suhteessa maakaasun hintaan.

Hollannissa kasvihuoneiden energian tuotannon rakenne on ohjattu vahvasti CHP-laitosten varaan, joiden tyypillinen kapasiteetti ($0,6\text{--}1 \text{ MW/ha}$) riittää kattamaan pääsosa kasvihuoneen lämmitystarpeesta. Sähkön hinnan aleneminen lisää kiinnostusta käyttää sitä kasvihuoneessa. Jos tyypillisen CHP-laitoksen sähkö käytetään kasvihuoneessa, saadaan $18\text{--}20$ tunnin päivittäisellä valotuksella vain noin $8 \text{ mol/m}^2/\text{vrk}$ joulukuussa. Se ei riitä edes salaatile, saati tomaatille ja kurkulle.

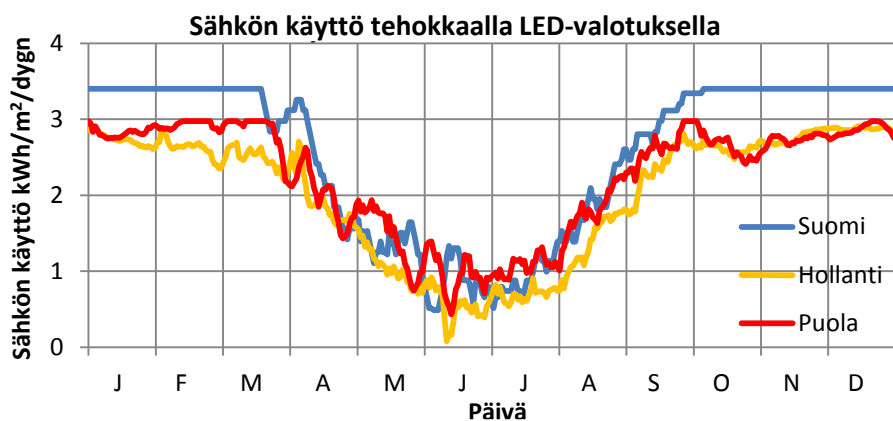
Ympärivuotisen vihannesviljelyn valotusta ei voida Hollannissa rakentaa laajasti kasvihuoneyritysten nykyisten CHP-laitosten käytön varaan. Sähköä ja lämpöä on jaettava viljelyaloille tai viljelyssä on käytettävä markkinasähköä, jonka hinta teollisuudelle on ollut 2010-luvulla $20\text{--}45\%$ korkeampi kuin Suomessa ja jonka CO_2 -päästö on noin kaksinkertainen Suomeen verrattuna. Hollannissa esitetään tavoitteeksi kasvihuonetuotannon CO_2 -päästöjen huomattava alentaminen ja uusissa huoneissa jopa päästöneutraalius. Ympärivuotisen vihannesviljelyn laajamittainen toteuttaminen LED-valotusta lisäämällä ei siis näytä todennäköiseltä kovin pian.



Kuva 32. Päivittäinen auringon säteilysumma, ulkoilman keskilämpötila ja keskimääräinen absoluuttinen kosteus Suomessa, Hollannissa ja Puolassa. Arvot ovat viiden vuoden päivittäisiä keskiarvoja, jotka on tasoitettu viikkokeskiarvoiksi.



Kuva 33. Valotustavoite kurkun viljelyssä Suomessa, Puolassa ja Hollannissa, jos kaikissa halutaan sama valomäärä kuin Suomessa runsaassa valotuksessa käytetään ($\text{mol/m}^2/\text{vrk}$). Valomäärän tavoite suomalaisen ympärivuotisen viljelyn mukaan (HPS 270 W/m^2 , korkeintaan 20 h/vrk)



Kuva 34. Sähkön käyttö valotuksessa, jos valomäärän tavoite on kuvan 21 mukainen ja LED-valaisimen hyötysuhde on $2,8 \mu\text{mol/J}$.

LED parantaa kilpailukykyä energian käytössä

Kuvassa 33 on kurkun viljelyssä nyt HPS-valaisimilla käytetty tavallinen valomäärä moolia neliölle vuorokaudessa. Jos sama valomäärä tuotettaisiin LED-valaisimilla, joiden hyötysuhde olisi $2,8 \mu\text{mol/J}$, sähkön kulutus vuorokaudessa kilowattitunteina olisi kuvan 34 mukainen. Puolen vuoden ajan Suomessa tarvittaisiin edelleen $0,5 \text{ kWh/m}^2/\text{vrk}$ enemmän sähköä valotukseen. Ero tomaatin viljelyssä olisi samaa suuruusluokkaa.

Euroissa suomalaisen tuotannon sähkökustannus jää alemmaksi kuin samaan valomäärään (aurinko + valotus) tähtäävä valotus Hollannissa ja Puolassa sähkön nykyhinnoilla. Sähkö on ollut 2010-luvulla eurohinnoin Puolassa ja Baltiassa 20–40 % kalliimpaa (ennen veroa) kuin Suomessa, mutta Virossa sähkön hinta on nyt laskenut Suomen tasolle. Puolassa ei vielä käytetä paljon valotusta, vaikka siellä on noin 1000 ha moderneja huoneita, joissa viljellään tomaattia.

Espanjassa tuotot ja kustannukset 5 €/m²/kausi molemmin puolin

Espanjalainen kasvihuonetuotanto toimii EU:ssa omalla kustannus- ja tuottotasollaan (Martínez ym. 2016). 2010-luvulla Almeriassa yhden viljelykauden (talvi tai kevät) keskimääräinen kokonaiskustannus (pääomakustannus ja muuttuva kustannus) on ollut 3–4 €/m², josta työvoiman osuus oli 40 %. Bruttotuotto on 4–8 €/m². Parhaimmillaan nettotuotto on tomaatin viljelyssä ollut noin 3 €/m² kaudessa, kun sato on korkeassa huoneessa noin 16 kg/m².

9.2. CO₂-päästöjen erot**Suomen ja kilpailevien alueiden CO₂-päästöt**

Oikein hyvin dokumentoitua, laajaa tuotannon CO₂-päästöjen ja muiden ympäristövaikutusten arviointia ei ole julkaistuna missään maassa. Yksittäisten tarhojen ja kokeiden luvuista voidaan kuitenkin saadaa karkea arvio päästöistä.

Suomessa päästö

Suomessa tomaatin ympärivuotisen voimakkaasti HPS-valotetun tuotannon sähkön kulutukseksi on muutamalla tarhalla arvioitu noin 10 kWh/kg (Yrjänäinen ym. 2013). Tällöin lämmön kulutus oli noin 7 kWh/kg. Jos sähkö on keskimääräistä suomalaista sähköä (210 g CO₂-ekv/kWh), sähköstä johtuva päästö on 2,1 kg CO₂-ekv/kg tai vähän suurempi. On huomattava, että noin kolmannes sähkön käytöstä ja päästöstä tapahtuu marras-tammikuussa. Teoriassa viljelyssä voitaisiin pitää lyhyt tauko keskellä talvea, jolloin päästöt vähentyisivät huomattavasti. Lämmön päästö on suuri, jos polttoaine on öljyä tai turvetta (380 g CO₂-ekv/kWh, Motiva 2012) ja hyvin pieni, jos polttoaine on haketta. Muusta kuin energian suorasta käytöstä johtuvat päästöt satokiloa kohti ovat ympärivuotisessa tuotannossa noin 5 % kokonaispäästöistä (Yrjänäinen ym. 2013).

Ympärivuotisen kurkkuviljelyn sähkön kulutukseksi on arvioitu noin 9 kWh/kg (Yrjänäinen ym. 2013, Kaukoranta ym. 2014) ja lämmön kulutukseksi 2,5 kWh/kg. Sähköstä johtuva päästö keskiarvosähköllä on tällöin 1,9 kg CO₂-ekv/kg. Kurkullakin keskitalven sähkön kulutus ja siten päästöt muodostavat suuren osan vuotuisista päästöistä.

Espanjassa päästö

Espanjalaisen kasvihuonetomaatin tuotannon ilmastoon vaikuttavan kokonaispäästön on laskettu vuositason olle 0,25 kg CO₂-ekv/kg tomaattia, joka johtuu pääasiassa kasvihuoneen rakenteiden tuotannosta (Torrellas ym. 2012). Vaihtelu kaudesta toiseen on suurta, koska lämmitystä kannattaa käyttää vain kylmimpien jaksojen aikana. Lämmitystä käytetään 8 prosentissa Almeriassa alueen kasvihuoneista. Ryhmäkasvihuoneista lämmitys on 67 prosentissa. Niitä on noin 5 % huoneista.

Hollannissa päästö

Hollannissa lämpöenergian kulutus on noin 9,4 kWh/kg tomaattia. Tuotannon kokonaispäästön on arvioitu olevan kaasulla lämmitetyssä huoneessa 1,9 kg CO₂-ekv/kg. Päästöstä lasketaan voitavan vähentää puolet pois, jos lämpö tuotetaan CHP-laitoksessa ja laitoksen sähkö kulutetaan muualla ja se korvaa energiaverkossa suuripäästöistä hiilivoimalla tuotettua sähköä.

Valotetun tomaattituotannon energian kulutuksesta ja päästöistä Hollannissa ei ole käyttökelpoista julkaistua tietoa. Belgiassa (Moerkens ym. 2016) HPS-ylävalotetun tomaatin (85 μmol/m²/s, jos auringon säteily on alle 350 W/m², 170 μmol/m²/s, jos aurinko on alle 150 W/m², marraskuusta maaliskuuhun klo 23–17) sähkön kulutus on noin 240 kWh/m² ja sato 85 kg/m² viljelykaudella marraskuusta heinäkuun loppuun. Sähkön kulutus on noin 2,6 kWh/kg ja sähköstä johtuva päästö (200 g CO₂-ekv /kWh) 0,5 kg CO₂-ekv/kg tomaattia. Valon lisääminen 110 μmol/m²/s rivien välissä olevilla kahdella LED-valaisinrivillä lisäsi satoa samalla varsiuutehdellä 10 kg/m² ja 18 kg/m² ottamalla lisävarsia käyttämään lisävaloa. Välivaloilla sähkön kulutus oli noin 320 kWh/m² ja sähköstä johtuva päästö 0,6 CO₂-ekv/kg. Näillä asennustehoilla lämmitystä ei tarvita paljon valojen ollessa päällä.

Puolassa jonkun verran vähemmän energiaa mutta enemmän päästöjä

Yllä esitetyillä Puolan kulutusluvuilla valotusta tarvittaisiin Puolassa noin 10 % vähemmän kuin Suomessa tuotekiloa kohti. Päästöjä Puolassa syntyy ympärivuotisessa tuotannossa moninkertaisesti Suomeen verrattuna, koska sähkön päästökerroin on noin 1200 g CO₂-ekv/kWh ja lämmitys toteutetaan pääosin hiilellä.

LED-valaisimilla voidaan alentaa päästöjä 50 %

Kaikille kasvihuonekasveille on tarjolla LED-valaisimia, joilla voidaan tällä hetkellä saavuttaa 30–50 % parempi hyötysuhde muunnettaessa sähköä sadoksi. LED-valaisimien kehittyminen voi mahdollistaa vielä jonkun verran paremman hyötysuhteen. HPS-valaisimien korvaaminen suurimmaksi osaksi saman valomäärän tuottavilla LED-valaisimilla seuraavan vuosikymmenen aikana voi siis alentaa kasvi-huonetuotannon sähköstä aiheutuvia päästöjä suurin piirtein 50 %.

Vähentyminen päästöissä pienempi, jos LEDejä käytetään valon lisäämiseen

Sähkön kulutuksen ja päästöjen alentuminen tuotekiloa tai kappaletta kohti ei välttämättä kuitenkaan toteudu täysimääräisenä. Taloudellisilla perusteilla voidaan valita käyttöön LED-valaisimia, joiden hyötysuhde ei ole paras mahdollinen, mutta joiden hankintahinta on alhaisempi tai käyttöaika on pitempi kuin parhaan hyötysuhteen valaisimilla.

Valaisimilla tuotetun valon määrää voidaan myös lisätä, koska LED-valaisimien alempi lämmön tuotto mahdollistaa sen. Marras-tammikuuta lukuun ottamatta sato ei nouse samassa suhteessa kuin valomäärän lisäys, joten valon käytön tehokkuus alenee. Tämän vuoksi päästöt tuotekiloa kohti eivät alene niin paljon kuin on mahdollista saavuttaa korvaamalla nykyinen HPS-valo LED-valolla. Poikkeuksena saattavat olla ruukkusalaatit, joilla käytetään alhaista – noin 100 W/m² – HPS-asennustehoa.

10. Valotustekniikan tulevaisuus

10.1. Valon hinnan kehityssuunta

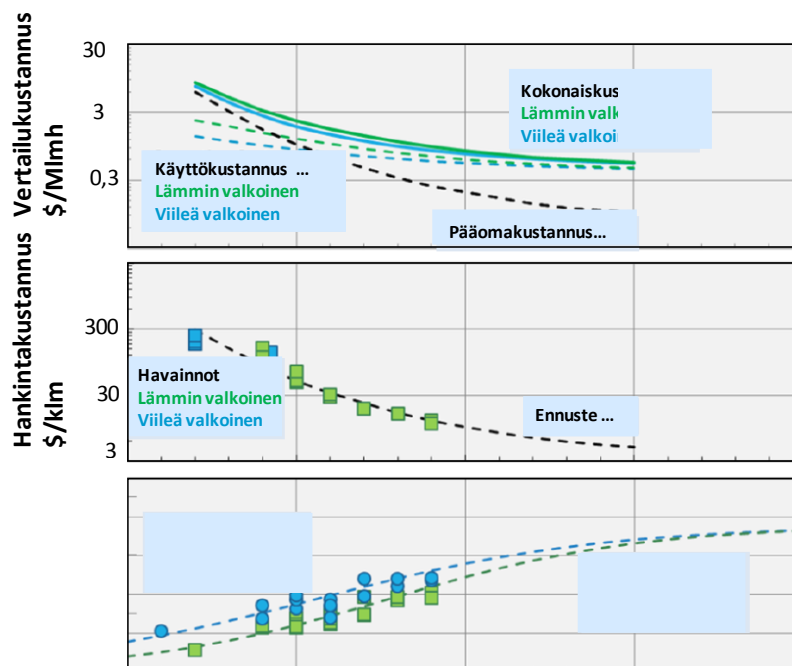
Kehitystä ajavat yleinen valaisinkehitys ja kuluttajatuotteet

LED-tekniikan kehityksen keskeisten tuntijoiden näkemyksen mukaan (Pattison ym. 2016, Katona ym. 2016) elämme tällä hetkellä valaistuksen ja valon käytön vallankumousta. Keskeisessä roolissa on ollut puolijohdetekniikan kehittyminen, mitä hyödynnetään myös LEDien valmistuksessa. LED-valaisimet kasvihuoneisiin ovat kiinnostava sovellus, mutta LED-sovellusten ajureina ovat olleet ja tulee edelleenkin olemaan massavalmistukseen suunnatut tuotteet, joiden markkinat ovat globaalit ja käytännöllisesti katsoen rajattomat. LED-tekniikkaan perustuvista tuotteista merkittävimmät ovat monimuotoiset näyttölaitteet ja erilaisten tilaratkaisujen valaistus. Näyttölaitesovellukset mahdollistavat täysin uusien laitteiden valmistuksen ja myynnin, ja jatkuvasti edullisimmin hinnoin. LEDien käyttö tilaratkaisujen valaistuksessa perustuu pääsääntöisesti energian säästöön, jolloin vanhat hehku-, loiste- ja halogeenilamput korvataan uudella tekniikalla. LEDien käytön myötä valaistuksessa käytettävät ratkaisut myös monipuolistuvat.

Tehokkuus ja kustannukset kasvavat edelleen, mutta hidastuvalla vauhdilla

Viimeisimpien arvioiden mukaan puolijohdetekniikkaan perustuvan LED-valotuksen kustannukset pienenevät ja valotuksen tehokkuus kasvaa merkittävästi lähivuosina (Kuva 35). Tärkeimmät laskelmissa käytetyt mittarit ovat laitteiston pääoma- ja käyttökustannus, tuotetun valoyksikön kustannus-tehokkuus ja laitteiston valaistustehokkuus. Vaikka tähän mennessä tapahtunut valotuksen tehokkuuskehitys ja siitä tehdyt ennusteet koskevat ensisijaisesti tilojen valaistusta, on oletettavaa, että kasvien keinovalotuksessa käytettävien valaisimien tehokkuus- ja kustannusarvot noudattavat samansuuntaista kehitystä.

LED-valotukseen liittyvässä teknisessä innovaatiotyössä hyödynnetään aikaisempaa tehokkaampia puolijohdemateriaaleja ja täysin uusia valaisinratkaisuja. Ensisijaisena tavoitteena on edelleenkin valotustehon lisäys ja koko arvoketjun kustannusten pienentäminen. Tärkeänä kehityskohteena on myös LED-tekniikkaan perustuvien valaisinlaitteiden teknisen luotettavuuden parantaminen.



Kuva 35. Tilavalaisuksessa käytettyjen LED-ratkaisujen kustannusten historiallinen kehitys ja tulevaisuuden ennusteet: a) Vertailukustannus (kokonais-, pääoma- ja käyttökustannus), b) Valaisimien hankintakustannus, c) Valaistustehokkuus. Vertailukustannus on laskettu käyttämällä pääomakustannusta ja käyttökustannusta, kun käyttöikä on 50 000 tuntia (Lähteenä käytetty Pattison ym. 2016).

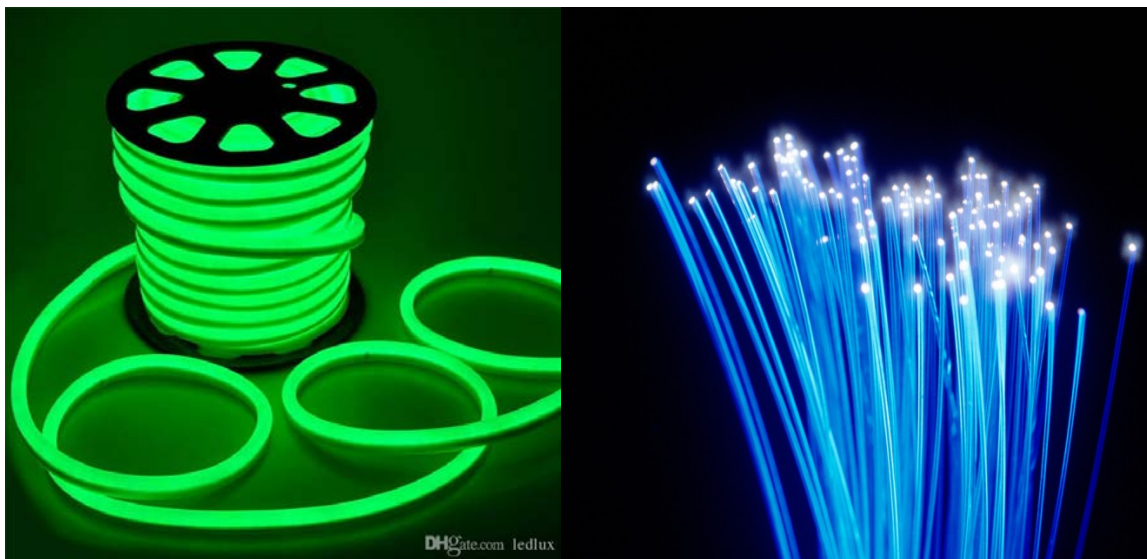
10.2. Muusta valaistuksesta vielä uusia ideoita

Valaisimien muoto voi viedä valon uusiin paikkoihin

Puolijohdetekniikan avulla voidaan nykyisin tuottaa erittäin monimuotoisesti valoa sekä väriltään että muodoltaan (Kuva 36). Tilaratkaisujen valaistuksessa ovat yleistymässä laajojen pintojen, nauhojen ja kuitujen tuottama valo. Joustavissa nauhoissa valokeilan avautumiskulma on lähes 360° (Kuva 37). Valokuitujen avulla valoa tuotetaan hyvin kohdistetusti (Kuva 37).



Kuva 36. Tilaratkaisuissa voidaan käyttää monimuotoista LED-valaistusta.



Kuva 37. Nauhamaista LED-valoa vasemmalla ja valokuitujen avulla johdettua valoa oikealla.

Varjolehdetkin töihin

Edellyttäen, että uusien ratkaisujen tuottama valon intensiteetti kasvaa lähivuosina, perinteisestä valaisimesta poikkeavia valon kantajia voidaan ehkä soveltaa myös kasvien valotukseen. Niillä voitaisiin kohdistaa valoa varjokohtiin, joita jää nykyisiä valaisimia käytettäessä (Kuva 38). Tavoitteena on tuoda valoa erityisesti niihin lehtiin, jotka yhteyttävät kaikkein tehokkaimmin. Valomallien avulla on osoitettu, että esimerkiksi tomaatin valonkäytön tehokkuutta voidaan lisätä jopa 15–20 %, kun valotus on tasaista eikä ainoastaan kasvuston yläpuolelta tulevaa valoa. Tehostuneen yhteyttämisen lisäksi kasvustoon sijoitettavalla monisuuntaisella valotuksella voitaneen edistää esimerkiksi kehittyvien hedelmien värinmuodostusta ja kypsymistä siten, että ne tapahtuvat samanaikaisesti koko hedelmässä ja tertussa.



Kuva 38. Nykyisin välivaloina käytettävät LED-valaisimet soveltuvat esimerkiksi kaksilatvaisen paprikan välivalotukseen, koska valaisimet voidaan sijoittaa kasvuston sisälle ja lähelle kasvien lehtiä. Valaisimen avautumiskulmaa laajentamalla voitaisiin valon jakautumista ohjata laajemmalle lehtipintalalle ja tehostaa siten yhteyttämistä (Kari Jokinen, Luke).

Valoreseptejä lajeille ja lajikkeille

On myös huomattava, että kasvin valovaatimukset ovat erilaiset täysin keinovalossa kuin olosuhteissa, jossa kasvi saa runsaasti myös luonnonvaloa. Luonnonvalosta tulee kaikkia valon aallonpituuksia, joten LED-valotuksen ollessa täydentävää riittää yleensä yhteyttämistä tehostava punainen valo.

Mitä paremmin opimme tuntemaan eri viljelykasvien valovaatimukset ja -vasteet niiden eri kehitysvaiheissa, sitä todennäköisemmin valoa annetaan yhä valikoidummin ja energiatehokkaammin kuin nykyisin. Tällöin kasvien viljely ei perustu enää ”kaikille samaa valoa”-periaatteelle vaan viljelijän käytössä ovat tarkat valoreseptit ja räätälöidyt valotusratkaisut. Nämä tavoitteet ovat yhä paremmin toteutettavissa LED-valaisimilla. On myös todennäköistä, että osa kasvin eri kehitysvaiheissa tapahtuvista muutoksista aikaansaadaan pienemmällä valon voimakkuudella kuin mitä tarvitaan yhteyttämiseen. Nykyisin on jo käytössä muun muassa kaukopunainen pulssivalo jatkuvan valotuksen sijasta, jolla säädetään joidenkin lajien kukintaa ja optimoidaan pituuskasvua. Vastaavasti voidaan hedelmien ja kukkien pigmentin muodostusta ja lehtien makuaineiden kehittymistä edistää sopivalla LED-valolla. Valotusta ohjataan säätöjärjestelmään liitettyjen sensorien avulla kuten tällä hetkellä kasvien lannoitusta ja kastelua.

Kasvinjalostusta hyödyntämään valotuksen uusia mahdollisuuksia

Kun räätälöity LEDien käyttö yhdistetään kasvinjalostukseen, johtanee se vähitellen uudenlaisten lajikkeiden valintaan ja käyttöön. Jalosteen viljelyssä valo käytetään tehokkaasti sekä yhteyttämiseen että tavoiteltavan laadun rakentamiseen erityisesti keinovaloviljelyssä kuten kerrosviljelyssä kasvuhuoneissa. LED-valaisimen spektrissä on ainoastaan välttämättömiä aallonpituuksia eikä sähköä käytetä ylimääräisten aallonpituuksien tuottamiseen.

Sykkivä valo saattaa parantaa valon ja sähkön käytön tehokkuutta

Salaatilla on alustavaa näyttöä siitä, että valon käytön tehokkuutta (grammaa kasvua per moolia valoa) siten myös sähkön käytön tehokkuutta (grammaa kasvua per joulea sähköä) voidaan nostaa käyttämällä sykkivää valoa (pulsed light) tuottavaa LED-valaisinta (Kanechi ym. 2016). Jos tuotettu valon määrä (mol/m^2) on sama, sykkivällä LED-valolla on kokeissa saatu parempi kasvu kuin jatkuvalla LED-valolla. Sykkivässä valossa on vuorotellen valotettu jakso ja valottamaton jakso, joiden toistumistiheys on muutamista kerroista sekunnissa (1–2 Hz) aina tuhansiin kertoihin sekunnissa (1–20 kHz). Pimeän jakson aikana sähkön kulutus ja lämmön tuotto loppuvat. Sykinnän taajuutta säätämällä voitaisiin toteuttaa vaihtoehtoisella tavalla myös LEDien himmentäminen (dimming), kun keinovalon määrää halutaan muuttaa.

Viitteet ja aiheeseen liittyvää oheiskirjallisuutta

- Bantis, F., Ouzounis, T., ja Radoglou K. 2016. Artificial LED lighting enhances growth characteristics and total phenolic content of *Ocimum basilicum*, but variably affects transplant success. *Scientia Horticulturae* 198: 277–283. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2015.11.014>
- Blom-Zandstra, M. 1989. Nitrate accumulation in vegetables and its relationship to quality. *Annals of Applied Biology* 115: 553–561. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1744-7348.1989.tb06577.x>
- Brazaitytė, A., Viršilė, A., Samuolienė, G., Jankauskienė, J., Sakalauskienė, S., Sirtautas, R., Novičkovas, A., Dabašinskas, L., Vaštakaitė, V., Miliauskienė, J. and Duchovskis, P. 2016. Light quality: growth and nutritional value of microgreens under indoor and greenhouse conditions. *Acta Horticulturae (ISHS)* 1134: 277–284. http://www.actahort.org/books/1134/1134_37.htm
- Carvalho, D., and Folta, K.M. (2014). Environmentally modified organisms – expanding genetic potential with light. *Critical Reviews in Plant Sciences* 33: 486–508. <http://dx.doi.org/10.1080/07352689.2014.929929>
- Darko, E., Heydarizadeh, P., Schoefs, B. ja Sabzalian, M.R. 2014. Photosynthesis under artificial light: the shift in primary and secondary metabolism. *Philosophical transactions of the royal society B* 369: 20130243. <http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/369/1640/20130243>
- Goto, E., Hayashi, K., Furuyama, S., Hikosaka, S. ja Ishigami, Y. 2016. Effect of UV light on phytochemical accumulation and expression of anthocyanin biosynthesis genes in red leaf lettuce. *Acta Horticulturae (ISHS)* 1134:179–186. http://www.actahort.org/books/1134/1134_24.htm
- Hogewoning, S.W., Wientjes, E., Douwstra, P., Trouwborst, G., van Ieperen, W., Croce, R. ja Harbinson, J. 2012. Photosynthetic Quantum Yield Dynamics: From photosystems to leaves. *The Plant Cell* 24: 1921–1935. <http://dx.doi.org/10.1105/tpc.112.097972>
- Hogewoning, S.W., Douwstra, P., Trouwborst, G., van Ieperen, W. and Harbinson, J. 2010. An artificial solar spectrum substantially alters plant development compared with usual climate room irradiance spectra. *Journal of Experimental Botany* 61: 1267–1276. <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/erq005>
- Hogewoning, S.W., Trouwborst, G., Meinen, E. and van Ieperen, W. (2012). Finding the optimal growth-light spectrum for greenhouse crops. *Acta Horticulturae (ISHS)* 956, 357–363. <http://dx.doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.956.41>
- Hovi, T., Näkkilä, J. ja Tahvonen, R., 2004. Intracanopy lighting improves production of year-round cucumber. *Scientia Horticulturae* 102:283–294
- Huang, W., Zhang, S.B. ja Hu, H. 2014. Sun leaves upregulate the photorespiratory pathway to maintain a high rate of CO₂ assimilation in tobacco. *Frontiers in Plant Science*. Published: 03December2014 doi: 10.3389/fpls.2014.00688
- Jokinen, K., Särkkä, L.E. ja Näkkilä, J. 2012. Improving Sweet Pepper Productivity by LED Interlighting. *Acta Hort.* 956: 59-66. http://www.actahort.org/books/956/956_4.htm
- Kaukoranta, T., Näkkilä, J., Särkkä, L. ja Jokinen, K. 2014. Effects of lighting, semi-closed greenhouse and split-root fertigation on energy use and CO₂ emissions in high latitude cucumber growing. *Agricultural and Food Science* 23: 220–235. <http://ojs.tsv.fi/index.php/AFS/article/view/8682>
- Kanechi, M., Maekawa, A., Nishida, Y. ja Miyashita, E. 2016. Effects of pulsed lighting based light-emitting diodes on the growth and photosynthesis of lettuce leaves. *Acta Horticulturae (ISHS)* 1134: 207–214. http://www.actahort.org/books/1134/1134_28.htm
- Katona, T.M., Pattison, P.M. ja Paolini, S. 2016. Status of solid state lighting product development and future trends for general illumination. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering* 7: 263–281. <http://www.annualreviews.org/doi/full/10.1146/annurev-chembioeng>
- Kitaya, Y., Shibuya, T., Yoshida, M., Kiyota, M., 2004. Effects of air velocity on photosynthesis of plant canopies under elevated CO₂ levels in a plant culture system. *Advances in Space Research* 34: 1466–1469. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2003.08.031>
- Kivimäenpää, M., Jokinen, K., Julkunen-Tiitto, R., Juutilainen, J. ja Holopainen, J. 2014. LED-valot vaikuttavat kasvien laatuun. *Puutarha & kauppa* 16: 10–11.
- Li, Q., ja Kubota, C. 2009. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. *Environmental and Experimental Botany* 67: 59–64. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098847209001348>
- Lumileds. 2016. WP 15 Evaluating the Lifetime Behavior of LED Systems White paper. <http://www.lumileds.com/uploads/167/WP15-pdf>

- Moerkens, R., Vanlommel, W., Vanderbruggen, R. ja T. Van Delm, T. 2016. The added value of LED assimilation light in combination with high pressure sodium lamps in protected tomato crops in Belgium. *Acta Horticulturae (ISHS)* 1134: 119–124.
http://www.actahort.org/books/1134/1134_30.htm
- Motiva 2012. Yksittäisen kohteen CO₂-päästöjen laskentaohjeistus sekä käytettävät CO₂-päästökertoimet. [http://www.motiva.fi/files/8886/CO₂-laskentaohje_Yksittainen_kohde.pdf](http://www.motiva.fi/files/8886/CO2-laskentaohje_Yksittainen_kohde.pdf)
- Naznin, M.T., Lefsrud, M., Gravel, V. ja Hao, X. 2016. Different ratios of red and blue LED light effects on coriander productivity and antioxidant properties. *Acta Horticulturae (ISHS)* 1134: 223–230.
http://www.actahort.org/books/1134/1134_30.htm
- Nicole, C.C.S., Charalambous, F., Martinakos, S., van de Voort, S., Li, Z., Verhoog, M. ja Krijn, M. 2016. Lettuce growth and quality optimization in a plant factory. *Acta Horticulturae (ISHS)* 1134: 231–238. http://www.actahort.org/books/1134/1134_31.htm
- Näkkilä, J., Jokinen, K., Särkkä, L. ja Kaseva, J. 2016. Lisävalotuksen ja lannoituksen loppulaimennuksen vaikutus jääsalaatin satoon ja laatuun. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus. Loppuraportti 12.9.2016.
- Pattison, P.M., Tsao, J.Y. ja Krames, M.R. 2016. Light-emitting diode technology status and directions: opportunities for horticultural lighting. *Acta Horti* 1134: 413–425.
DOI: 10.17660/ActaHortic.2016.1134.53
- Pettersen, R.I., Torre, S. ja Gislerød, H.R. 2010. Effects of intracanopy lighting on photosynthetic characteristics in cucumber. *Scientia Horticulturae* 125: 77–81.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2010.02.006>
- Olle, M. ja Virsile, A. 2013. The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. *Agricultural and Food Science* 22: 223–234.
<http://ojs.tsv.fi/index.php/AFS/article/view/7897>
- Osram. 2013. Reliability and Lifetime of LEDs. http://www.osram-os.com/Graphics/XPic5/00165201_0.pdf/Reliability%20and%20Lifetime%20of%20LEDs.pdf
- Owen, W.G., ja Lopez, R.G. (2015). End-of-production supplemental lighting with red and blue Light-emitting diodes (LEDs) influences red pigmentation of four lettuce varieties. *HortScience* 50: 676–684
- Pinho, P., Jokinen, K. ja Halonen, L. 2016. The influence of the LED light spectrum on the growth and nutrient uptake of hydroponically grown lettuce. *Lighting Research & Technology* 0: 1–16. Painossa. Julkaistu on-line 4.4.2016 doi: 10.1177/1477153516642269
- Piovene, C., Orsini, F., Bosi, S., Sanoubar, R., Bregola, V., Dinelli, G. ja Gianquinto, G. 2015. Optimal red:blue ratio in led lighting for nutraceutical indoor horticulture. *Scientia Horticulturae* 193: 202–208. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2015.07.015>
- Ruimy, A., Jarvis, P.G., Baldocchi, D.D. ja Saugier, B. 1995. CO₂ Fluxes over Plant Canopies and Solar Radiation: A Review. *Advances in Ecological Research* 26: 1–68.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60063-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60063-X)
- Särkkä, L., Jokinen, K., Kaukoranta, T., Sjöholm, D. ja Blomqvist, K. 2014. LED-valaistuksen tehokkuus kasvihuonekurkun viljelyssä. MTT Raportti 173.
<http://www.mtt.fi/mttraportti/pdf/mttraportti173.pdf>
- Särkkä, L., Luomala, E.-M., Hovi-Pekkanen, T., Kaukoranta, T., Tahvonen, R., Huttunen, J. ja Alinikula, M. 2008. Kasvihuoneen jäähdytyksellä parempaan ilmastoon ja satoon. Maa- ja elintarviketalous 122. <http://www.mtt.fi/met/pdf/met122.pdf>
- Terashima, I. 1986. Dorsiventrality of photosynthetic light response curve of a leaf. *Journal of Experimental Botany* 37: 399–405. <http://jxb.oxfordjournals.org/content/37/3/399.full.pdf>
- Tsormpatsidis, E., Henbest, R.G.C., Davis, F.J., Battey, N.H., Hadley, P., ja Wagstaffe, A. (2008). UV irradiance as a major influence on growth, development and secondary products of commercial importance in Lollo Rosso lettuce ‘Revolution’ grown under polyethylene films. *Environmental and Experimental Botany* 63: 232–239. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.12.002>
- U.S. Department of Energy. 2011. LED Luminaire Lifetime: Recommendations for Testing and Reporting. <http://energy.gov/eere/ssl/led-lighting-facts>
- U.S. Department of Energy. 2014. LED Luminaire Lifetime: Recommendations for Testing and Reporting. <http://energy.gov/eere/ssl/led-lighting-facts>
- Valera, D.L., Belmonte, L.J., Molina, F.D. ja López, A. 2016. Greenhouse agriculture in Almería. A comprehensive techno-economic analysis. *Cajamar Caja Rural. Serie Economía* 17.
<http://www.publicacionescajamar.es/series-tematicas/economia/greenhouse-agriculture-in-almeria-a-comprehensive-techno-economic-analysis>

Kiitokset

Tätä työtä rahoitti Maatilatalouden kehittämisrahasto (Makera). Hankkeessa käytetyn aineiston tuottamista on rahoittanut myös Maiju ja Yrjö Rikalan säätiö, josta heille kiitos.

Kiitokset viljelijöille, jotka jakoivat tietoaan LED-valaisimien käytöstä. Kiitokset myös kontakteja viljelijöihin järjestäneille Kjell Brännäsille Maa- ja metsätalousministeriöstä ja Juha Ossille Pohjanmaan ELY-keskuksesta.



Luonnonvarakeskus
Latokartanonkaari 9
00790 Helsinki
puh. 029 532 6000