

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Talotekniikka

Tutkintotyö

Kari Kallioharju

**LED-VALAISTUKSEN SOVELTAMINEN
KASVIHUONEYMPÄRISTÖSSÄ**

Työn ohjaaja
Työn teettäjä
Tampere 2007

DI Veijo Piikkilä
Tampereen ammattikorkeakoulu

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Sähkötekniikka

Talotekniikka

Kallioharju, Kari

Tutkintotyö

Työn ohjaaja

Työn teettäjä

Toukokuu 2007

Hakusanat

LED-valaistuksen soveltaminen kasvihuoneympäristössä

53 sivua

DI Veijo Piikkilä

Tampereen ammattikorkeakoulu

LED, valaistus, kasvihuone, kasvien valoviljely

TIIVISTELMÄ

Alkujaan ainoastaan merkkilampputekniikassa käytettyjen LED-lamppujen kehityskulku on viimeisen vuosikymmenen aikana ollut nopeaa. Kiristyvän energia- ja ympäristöpolitiikan puristuksessa LED-tekniikka tulee lähitulevaisuudessa syrjäyttämään useita perinteisiä valonlähteitä ja valaistusratkaisuja. Yhtenä merkittävänä LED-valaistuksen ja -sovellutuksien kohteena tulevat olemaan kasvihuoneet ja kasvien keinovalotus. Tutkijoiden nykyisen ennusteen mukaan LED-valaistusratkaisut löytävät seuraavan 5 - 10 vuoden kuluessa tiensä kasvihuoneisiin.

Tässä tutkintotyössä selvitettiin LED-valaistuksen ja erityisesti eräänlaisen LED-valoverhoidean kehitys- ja sovellusmahdollisuuksia kasvihuoneympäristöissä. Tutkimuksessa oli mukana alan yrityksiä ja tutkimus oli osittain TEKES-rahoitteinen. Erityisesti selvitettiin LED-tekniikan tämänhetkistä tilaa ja kehitystä, alan tutkimusta Suomessa ja maailmalla, LED-valoverhoratkaisun tarjoamia mahdollisuuksia, tuotteen teknisiä vaatimuksia, hyötyjä ja heikkouksia sekä mahdollisia markkinoita Suomessa ja maailmalla. Lisäksi uutta tuoteideaa vertailtiin tämänhetkisiin kasvihuoneiden keinovalotusratkaisuihin, erityisesti suurpainenatriumvalaistukseen.

Tehtyjen vertailujen ja markkina- sekä teknisten selvitysten perusteella todettiin, että tuoteidealla on runsaasti potentiaalia ja sen hyödyt verrattuna perinteisiin kasvihuoneiden keinovalotusratkaisuihin ovat merkittäviä. Tuoteidea on kehityskelpoinen ja taloudellisesti kannattava. Selvityksen lopuksi todettiin, että tuotteen varsinainen kehitys ja jatkotutkimukset tulisi aloittaa mahdollisimman pian. Tuotteesta oltiin kiinnostuneita kaikkien selvityksen aikana lähestytyjen tahojen puolesta ja asiantuntevia yhteistyökumppaneita kehitysprojektiin on tämän perusteella tarjolla useita. Selvityksen tuloksena valoverhotuotteelle päätettiin hakea mahdollisimman pian kehitysrahoitusta. Lisäksi tuotteelle haettiin patenttia jo selvityksen kuluessa.

TAMPERE POLYTECHNIC - UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Electrical Engineering

Building Services Engineering

Engineering Thesis 53 pages

Kallioharju, Kari LED Lighting Systems and Applications in Greenhouse Environment

Thesis Supervisor Veijo Piikkilä (MSc)

Commissioning Company Tampere Polytechnic

May 2007

Keywords LED, lighting, greenhouse, grow light, plants

ABSTRACT

In the near future, LED technology will supersede many traditional lighting applications and solutions because of tightening environment and energy saving policies. One remarkable application for the LED technology will be the illumination in greenhouses. LEDs are becoming to work as illumination source for growing plants. According to research, it has been expected that LED applications will enter greenhouses during the next decade.

The investigations for the utilization and development of LED applications in greenhouses were made in this study. There were also many professional individuals and organizations participating in this project, which was partially funded by TEKES (the main public funding organisation for the research and development in Finland). The main thread of the study was to solve and investigate the demands, risks and opportunities of LED applications in greenhouses and possibilities of bringing new products in the global and domestic markets.

According to the market analysis, technical studies, and the comparisons between miscellaneous technologies, following conclusions were made: LED solutions have a great potential market value and many benefits compared to present notable grow-light systems. LED applications for greenhouses are worth of development and economically beneficial. These are the reasons why the actual development work for creating appropriate LED lighting applications for greenhouse environment should be started as soon as possible.

ALKUSANAT

Tutkintotyön aiheita on olemassa erilaisia, aivan kuin meitä ihmisiäkin. On olemassa mielenkiintoisia aiheita, tasapaksuja aiheita, joskus jopa tylsiä aiheita. Omalle kohdalleni osui todella kiinnostava ja ajankohtainen aihe, aihe, joka pani aivan oikeasti ajattelemaan ja pohtimaan asioita, aihe josta uskon olevan hyötyä itselleni myös tulevaisuudessa.

Puolen vuoden tutkimuksen, valosaasteen, naisten rintasyöpäriskien, energiatalouden, ympäristövaikutusten, ilmastonmuutoksen, tomaattien, LEDien, neulosrakenteiden ja monen sekaisen työtunnin jälkeen tutkintotyöni on nyt kirjoissa ja kansissa. On kiitosten aika.

Haluan kiittää seuraavia henkilöitä, yhteisöjä ja yrityksiä siitä, että mahdollistitte tutkintotyöni valmistumisen sekä autoitte ja tuitte minua työni eri vaiheissa. Ilman Teitä työni ei olisi sellainen kuin se nyt on:

Veijo Piikkilä, Juha Heinola, Esa Kivioja, Matti Horppu, Perttu Heino, Pirkko Harsia, Martti Honkiniemi, Markku Nyman, Antti Tuomenoja, Jarno Kuitunen, Keijo Mäkeläinen, Toni Laine, Jalo Lähteenmäki, Tampereen ammattikorkeakoulu, MTG Engineering LTD, Teknillinen Korkeakoulu, Maa- ja Elintarviketeollisuuden Tutkimuskeskus, TEKES, KKK-Vihannes Oy ja kaikki muut ystävät ja tutut jotka olette joutuneet minua kestäämään.

Kiitos,

Tampereella 23. huhtikuuta 2007

Kari Kallioharju

SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLTÖ.....	5
SYMBOLILUETTELO.....	7
1 JOHDANTO.....	8
2 TUOTEIDEA SEKÄ TUOTTEELTA VAADITUT OMINAISUUDET JA MAHDOLLISET TEKNISET RATKAISUT.....	10
3 SELVITYKSEN AIKANA HAASTATELLUT LAITOKSET, YRITYKSET JA ASiantuntijat.....	15
3.1 MTG-Engineering Ltd.....	15
3.2 KARL MAYER Textilmaschinenfabrik.....	16
3.3 Teknillinen korkeakoulu, TKK. Valaistuslaboratorio.....	16
3.4 Maa- ja elintarviketeollisuuden tutkimuskeskus, MTT. Piikkiön tutkimusyksikkö.....	16
3.5 Finpro ry.....	17
4 LED-TEKNIikka.....	17
4.1 LED-lampun historia.....	17
4.2 LEDin rakenne ja toiminta.....	20
4.3 LEDin vahvuudet ja heikkoudet verrattuna muihin nykyisin käytössä oleviin valonlähteisiin.....	22
4.3.1 Tekniset ominaisuudet.....	22
4.3.2 Valotehokkuus, kustannukset ja energiansäästö.....	23
4.4 LED-lamppujen kehitys, tulevaisuuden näkökulmia ja odotuksia.....	24
5 VALOVILJELY.....	25
5.1 Valoviljely Suomessa.....	26
5.2 Valoviljely maailmalla.....	26
6 LED-VALOVILJELYN TUTKIMUS- JA KEHITYSTOIMINTA SUOMESSA JA ULKOMAILLA.....	27
7 LED-VALOTUKSEN TUTKIMUSTULOKSIA SUOMESTA, KEHITYKSEN KOhteet ja tutkimuksen tarve.....	28

8 LED-VALOVERHO VASTAAN NYKYISTEN KASVIHUONEIDEN VALOTUSRATKAISUT, TUOTTEEN EDUT JA HAITAT	29
8.1 Kasvin hyödyntämä valon taajuusjakauma eli spektri	30
8.2 LEDin ja suurpainenatriumin valotehokkuus kasvien valotuksessa.....	32
8.3 Lamppujen polttoikä ja valovirran alenema ajan kuluessa.....	33
8.4 Luonnonvalon hyödyntäminen, valaisimien asennus, suuntaus ja heijastimet	34
8.5 Valaistuksen ohjaus valotustarpeen mukaan	35
8.6 Valaistuksen huolto	36
8.7 Energianäkökulmat.....	36
8.8 Muut ympäristövaikutukset	38
8.8.1 Valosaaste.....	38
8.8.2 Materiaalien kierrätys, päästöt.....	40
8.9 LED-valoverhon ja suurpainenatriumvalaistuksen kustannukset kasvihuonekäytössä	40
9 MARKKINAT TUOTTEELLE SUOMESSA JA MAAILMALLA	42
9.1 Markkinat Suomessa	42
9.2 Markkinat maailmalla /15/	43
10 YHTEENVETO, LED-VALOVERHON SWOT-ANALYYSI JA LOPPUPÄÄTELMÄT	44
LÄHDELUETTELO	48
Painetut lähteet	48
Sähköiset lähteet.....	50
Asiantuntijalausunnot.....	52

SYMBOLILUETTELO

HPS	High Pressure Sodium, suurpainenaatriumlamppu
IP	International Protection, standardin IEC 60529 mukainen sähkölaitteen koteloinnin suojausluokka
LED	Light Emitting Diode, valoa lähettävä diodi
MTT	Maa- ja Elintarviketalouden Tutkimuskeskus
PLC	Powerline Communications, datasähkö, datansiirto sähköverkossa
p-n-liitos	Positive-Negative-liitos, puolijohdekerros
TKK	Teknillinen korkeakoulu
TEKES	Teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskus
UV-säteily	Ultraviolettisäteily, aallonpituus 100 - 380 nm
λ	Aallonpituus, m

1 JOHDANTO

New York 1962, General Electricin fyysikko Nick Holonyak Jr. tutkii laboratoriossaan galliumarsenidia ja sen ominaisuuksia puolijohteenä. Seostaessaan galliumarsenidiin fosforia hän havaitsee yhdisteen säteilytaajuuden muuttuvan, se kasvaa. Näkymättömän infrapunasäteilyn sijaan galliumarsenidi hehkuukin nyt heleänpunaisena. Holonyak on keksinyt ensimmäisen, modernin näkyvää valoa lähettävän diodin, LEDin. LED-lamppujen aikakausi on alkanut. /12;14./

Yli kolmekymmentä vuotta tapahtuneesta, lukemattomien tutkimusten ja pitkän kehitystaipaleen jälkeen, ovat LEDit hiljalleen löytämässä tiensä niin julkisten tilojen kuin myös kotien arkipäiväiseen yleisvalaistukseen. Viime vuosien kehitysharppausten ja uusimpien innovaatioiden avulla ne ovat nyt nousemassa merkittäväksi valonlähteeksi perinteisten hehku- ja halogeenilamppujen rinnalle. Lähitulevaisuudessa ne tulevat uhmaamaan myös purkauslamppujen asemaa energiatehokkaassa ja ympäristöystävällisessä valaistuksessa. /24./

Yksi merkittävä LEDien tulevaisuuden käyttökohde tulee olemaan myös valoviljely, kasvihuonesovellukset. Energiatehokkaana ja sen vuoksi myös ympäristöystävällisenä valaistusratkaisuna on LED-järjestelmien tutkimukseen ja kehitykseen kasvihuoneissa panostettu paljon ympäri maailmaa, myös Suomessa /48;49/. Tulostakin on syntynyt ja tutkimukset ovat osoittaneet, että LED-valaistusratkaisuilla on joissain kasvihuoneissa päästy jopa 60 %:n sähköenergiänsäästöön verrattuna normaaleihin valaistusratkaisuihin (suurpainenaatriumvalaistus). Lisäksi LED-valon avulla kasvatetut kasvit ovat olleet rehevämpiä ja niiden biomassa on ollut suurempi kuin samoissa olosuhteissa, mutta normaalivalaistuksessa kasvaneiden. Syinä tähän terveempään kasvuun ja energiansäästöön ovat olleet esimerkiksi LED-valon avulla helposti muodostettava, kasvin kasvulle optimaalinen spektrijakaumakäyrä (punaisen ja sinisen valon yhdistelmiä) ja LED-elementistä johtumalla poistuva lämpö, joka ei polta kasvia. LED ei myöskään lähetä lainkaan kasveille ja ihmisille haitallista UV-säteilyä /36/. Lisäksi LEDin etuina ovat mm. helppo ohjattavuus ja nykyratkaisuilla myös tarkka valonsuuntaus, jolla valo saadaan kohdistettua juuri haluttuun kohteeseen, näin ei turhaa valosaastetta pääse juurikaan syntymään. LED-valaistus on siis lähitulevai-

suudessa tulossa käyttöön myös kasvihuoneissa. Tutkijoiden mukaan kaupallisessa käytössä järjestelmät saattavat olla jo viiden vuoden kuluttua. /6;8;24./

Nykyisten, kasveille tarkoitettujen LED-paneelien ongelmana on yleensä ollut se, että ne ovat katosta lähellä kasveja riippuvina estäneet luonnonvalon pääsyn kasvustoihin. Lisäksi valon tullessa ylhäältä ovat kasvien alemmat osat usein jääneet heikosti valaistuuksi. Tämä on tietenkin ongelmallista eikä palvele tarkoitustaan. Lisäksi kiinteät paneelit ovat usein häirinneet kasvihuoneen ilmankiertoa. /49/.

Edellä mainittujen syiden vuoksi lähdettiin toteuttamaan projektia, jossa oli tarkoituksena selvittää, olisiko markkinoilla kysyntää ja tarvetta uudentlaiselle kasvihuoneiden LED-valotusratkaisulle, eräänlaiselle LED-valoverholle. Tämä tutkintotyö liittyy yhtenä osana em. tutkimukseen. Tutkimus oli osittain TEKES-rahoitteinen ja se tehtiin yhteistyössä alan yritysten ja tutkimuslaitosten kanssa. Työn tilaajana toimi KKK-Vihannes Oy Honkajoelta.

Työssä selvitettiin tuotteen tarjoamia ratkaisuja ja mahdollisuuksia, tuotteelta vaadittuja ominaisuuksia ja standardien asettamia vaatimuksia, toteutuskelpoisuutta nykytekniikalla, markkinoita Suomessa ja maailmalla, mahdollisia riskitekijöitä projektissa, yhteistyökumppaneita tuotantoa ajatellen sekä tuotteen patentintimahdollisuuksia. Tutkintotyön alussa on yleistä tietoa tuoteideasta, alan tutkimuksesta, LED-tekniikasta ja valoviljelystä. Sen jälkeen tulee vertailu suurpainenatriumtekniikkaan. Selvityksen loppuun on laadittu yhteenveto, josta löytyy myös LED-valoverhon SWOT-analyysi ja tutkimuksen jatkotoimet.

2 TUOTEIDEA SEKÄ TUOTTEELTA VAADITUT OMINAISUUDET JA MAHDOLLISET TEKNISET RATKAISUT

Tavoitteena on kehittää kasvien keinovalotukseen ainutlaatuinen valaistusratkaisu, jossa LED-valoja on integroitu täysin koneellisella valmistusmenetelmällä verkkomaisen tekstiilirakenteen molemmille puolille. Kyseessä on siis eräänlainen valoverho. Valoverhon on tarkoitus syrjäyttää tulevaisuudessa kasvihuoneen perinteiset keinovalotusratkaisut kokonaan.

LED-valoverhoon on siis suunniteltu integroitavaksi LEDit, tehonsyöttö ja ohjausväylät. Lisäksi myöhemmin verhoon saatettaisiin sijoittaa suunnattavia varjostuspaneeleita. Valoverho on ensisijaisesti tarkoitus asentaa riippumaan katosta kasviritvien väliin, jolloin se valaisee ja valottaa kasveja sivuilta, ns. välivalotuksena. Verhon korkeus tulee olemaan vain noin metrin, jolloin se valaisee koko ajan pelkästään kasveille optimaalista aluetta. Tarvittaessa valoverho on mahdollista myös nostaa tai rullata moottorein ylös pois työntekijöiden tieltä. Valoverhon sijoitus kasvihuoneessa on esitetty kuvassa 1. Laatikko kuvan yläosassa esittää tämän hetken tyypillisen kasvihuonevalaisimen sijoituspaikan.



Kuva 1 LED-valoverhon sijoitus kasvihuoneessa ja nykyisen valaistuksen tyypillinen asennuspaikka

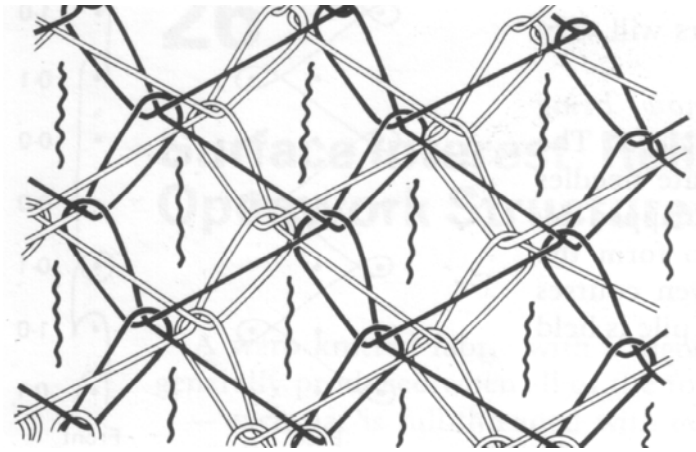
Selvityksen aikana verhon järkevimmäksi tekniseksi kehitysratkaisuksi muodostui kohtuullisen suurisilmäinen polymeeripohjainen tekstiiliverkko, jonka yläpään on integroitu ohjaus- ja tehonsyöttöväylä. Itse LED-valaistus saatettaisiin muodostaa esimerkiksi MTG-Engineeringin jo tällä hetkellä valmistamasta, täysin spesifioitavissa olevasta, patentoidusta MILS LED -nauhasta, jota asennettaisiin tekstiilirakenteeseen pystysuorina pätkinä halutuin välein.

Kasvihuoneolosuhteet asettavat suuren kosteuden ja vaihtelevien lämpöolosuhteiden vuoksi melko suuret laatuvaatimukset siellä käytettäville materiaaleille ja ratkaisuille. Tuotteen kestoksi on selvityksessä määritelty noin 10 vuotta, mikä on nykykehityksellä melko järkevä maksimaalinen käyttöikä. Valoverhoa rakennettaessa ja erityisesti, jos laitekokonaisuuteen sisältyvät moottorinostimet, tulee huomioida, että verho luokitellaan koneeksi. Tällöin siihen tulee soveltaa yleisten sähkö- ja valaisinstandardien lisäksi koneiden sähkölaitestandardia SFS-EN 60204 ja sen asettamia määräyksiä /17;50/.

Valoverhon tulee selvityksen perusteella olla ominaisuuksiltaan:

- Kosteuden ja painepesun kestävä
- korroosionkestävä
- valoa läpäisevä, ei saa tarpeettomasti varjostaa kasveja
- lämmönkestävä, ei saa myös itse lämmittää liikaa (kasvihuoneen $T \leq 30 \text{ C}^\circ$)
- rullattavissa ylös
- UV-valon kestävä
- ilmaa läpäisevä
- helposti asennettavissa ja huollettavissa
- ympäristö- ja energiataloudellinen (kierrätettävyys ja uusiokäyttö)
- ohjauksen ja tehonsyötön tulee olla integroituna rakenteessa
- ohjattavissa ja säädettävissä vertikaalisti: LEDien valoteho ja valon aallonpituus
- valaistuksen säätö ja ohjaus yksinkertaisella käyttöliittymällä
- sähköisiltä ominaisuuksiltaan tehokas koko käyttöiän ajan
- standardit ja työturvallisuusnormit täyttävä.

Nykyisten tekstiilimateriaalien osalta edellä mainitut vaatimukset eivät tule asian-
tuntijalausuntojen mukaan aiheuttamaan ongelmia. Nykyisillä polymeerimateriaa-
leilla pystytään helposti tuottamaan neulosrakenteita, jotka kestävät vaaditun rasi-
tuksen ja ovat lisäksi kaikin puolin turvallisia käyttää (palo- ja päästövaatimuk-
set). Lisäksi nykytekniikalla pystytään tarvittaessa integroimaan tekstiiliin toimin-
teiden vaatima tekniikka. Kuva suunnitellusta neulosrakenteesta on esitetty ku-
vassa 2. Kuva ei ole mittakaavassa, vaan neuloksen silmäkoko on todellisuudessa
n. 10 cm. /31;51/.



Kuva 2 Valoverhon neulosrakenne /51/

MTG-Engineeringin henkilöstön kanssa käytyjen keskustelujen ja yleisesti hanki-
tun tiedon perusteella ei myöskään MILS LED -nauhan käytölle valoviljelyssä
olisi erityisiä teknisiä ongelmia. Tällä hetkellä opas- ja turvavalaistukseen valmis-
tettu nauha on taipuisaa n. 2 mm paksua ja 25 mm leveää kumipäällysteistä mate-
riaalia, joka on täysin spesifioitavissa käyttökohteen mukaan (mm. teho, LEDien
yksittäisohjaus, eriväriset LEDit, valon suuntaus ja linssit). Nauhan suojausluoki-
tus on IP 68, mikä on riittävä ja sallii myös verhon painepesun. Kasvihuonetiloi-
hin standardi asettaa kyseisen kaltaisille laitteille ja valaisimille suojausluokaksi
vähintään IP 44 /19/. Nauhan lämpötilan kesto on myös erinomainen, -40...+150
°C. Edellä mainittujen syiden vuoksi tämä tuote olisikin lähtökohdiltaan varteen
otettava materiaaliveikko valoverhoon ja mahdollisesti myös muualle kasvi-
huoneen rakenteisiin integroitavaksi. /39;48./

LED-valaistuksen syöttöjärjestelmistä mainittakoon, että ne ovat nykyään lähes poikkeuksetta verkkoyhteyttäisiä, mikroprosessoriohjattuja hakkurilaitteita. Kokonsa ja ominaisuuksiensa puolesta ne ovat helposti integroitavissa uusiin ja remontoitaviin kasvihuonetiloihin. /39;48./

Suurimmaksi ongelmaksi teknisissä ominaisuuksissa muodostavat ohjaus- ja tehonsyöttöväylän ja LED-valoyksiköiden liitos- ja rajapinnat. Elementtien liitostekniikkaan tulee kiinnittää erityistä huomiota, jotta huolto ja asennusmuutokset sujuisivat nopeasti ja helposti, mutta liitos olisi silti tiivis, luotettava ja korroosion kestävä. Liitostekniikan valintaan vaikuttaa myös pitkälti neliöllisesti vaadittavan valon määrä ja teho (paljonko liitoksia tulee esimerkiksi metrille). Näitä ei voida kuitenkaan tällaiselle uraa uurtavalle tuotteelle määrittellä ennen kuin käytännön kenttäkokeita päästään suorittamaan, joten liitostekniikkaan ja valotustehoon liittyvät selvitykset ovatkin ensimmäisiä tehtäviä kehitysprojektin alkaessa.

Energia- ja valotehokkuuden maksimoimiseksi on valotusta pystyttävä säätämään halutulla tavalla. Tämä tarkoittaa, että valaistusta pystytään säätämään riveittäin vuorokauden- ja vuodenaikojen mukaan. Lisäksi valoverhon valaistusta on pystyttävä ohjaamaan ainakin vertikaalisti tai mieluiten jopa matriiseissa, jolloin kasvihuoneen koko valaistus olisi erikseen spesifioitavissa tarvittavan käyttötilanteen ja valotustarpeen mukaan. Tällaisella valotuksella varmistetaan, ettei ylimääräistä hukkavaloa tuoteta lainkaan. Lisäksi, jos tutkimuksien edetessä ilmenee, että valotuksen punaisen ja sinisen valon suhdetta (kasvien vaatima valon spektri, luku 8.1) täytyy säätää kasvun eri vaiheissa, on myös tämä huomioitava rakennetta suunniteltaessa. Valaistusta tulisi siis pystyä ohjaamaan jonkinlaisella väylätyyppisellä automaatiosovellutuksella tai muulla vastaavalla, esim. osoitepohjaisella järjestelmällä. Varsinainen loppukäyttäjän suorittama valaistuksenohjaus taas on pystyttävä hoitamaan mieluiten tietokoneelta tai muulta käyttöpäätteeltä yksinkertaisen graafisen käyttöliittymän avulla. Asiantuntijalausuntojen mukaan tällaiset ohjaukset ovat nykytekniikalla toteutettavissa suunnitellun kaltaisessa pienjännitteisessä verkkorakenteessa melko yksinkertaisesti. Tällainen tekniikka on käytössä myös MILS LED -nauhassa ja sen syöttöjärjestelmissä. Lisäksi täysin spesifioitavat graafiset käyttöliittymät ovat ainakin MTG-Engineeringillä yleisesti käytössä.

tössä. /48/. Lisäksi, jos jouduttaisiin suunnittelemaan verkkojännitteisen laitteiston ohjausta, on TKK:lla tutkittu yhteistyössä TEKES:n ja alan yritysten kanssa syöttöverkossa toimivien PLC-pohjaisten tietoliikennetkaisuhyödyntämistä LED-valaistuksen ohjauksessa. Tämäkin tekniikka on tutkimuksissa havaittu jo hyödylliseksi ja tehokkaaksi, joten ohjausratkaisujen puolesta ei tuotteen kehitykselle aiheudu ongelmia. /22./

Työturvallisuutta ajatellen LEDit ovat mekaaniselta toiminnaltaan erinomaisia, sillä ne toimivat pienjännitteellä. Vaarallisia kosketusjännitteitä ei siis pääse muodostumaan, vaikka tuote vaurioituisikin jostain syystä. Kasvihuonetiloissa, verkkojännitteisten syöttöpiirien yhteydessä, standardi suosittelee käyttämään vikavirtasuojakytkimiä. Valoverhon osalta tämä saattaa tulla kyseeseen mm. LEDien syöttöyksiköiden kohdalla /20/.

Valotehon puolesta Suomen työturvallisuusmääräykset ja eurooppalainen sisävalaistusstandardi SFS-EN 12464 toteavat vain, että työpaikkojen valaistuksen tulee olla työn luonteeseen nähden riittävä. Kasvihuonetiloissa työskentelyyn vaaditun valaistustason tulee olla vähintään 200 luksia /18/. Standardi antaa ohjeet myös häikäisyn rajoituksesta, joka saattaa tulla eteen erityisesti LED-lamppujen, mutta myös suurpainenatriumlamppujen kohdalla. Kyseisten valonlähteiden luminenssi eli pintakirkkaus (cd/m^2 , kcd/m^2 , Mcd/m^2 , cd/mm^2 , nit) on huomattavasti loistelamppuja suurempi ja se saattaa häiritä työntekijöiden toimintaa. Jonkinlaista kuvaa pintakirkkaudesta luo Philipsin vertailu henkilöauton halogeenilamppuun. LED-valolla päästään Philipsin mukaan aina $38 \text{ Mcd} / \text{m}^2$:n pintakirkkauteen halogeenilampun pintakirkkauden ollessa 50 % pienempi, noin $25 \text{ Mcd}/\text{m}^2$. Kirkkaimpien suurpainenatriumlamppujen luminenssi on noin $4 \text{ Mcd}/\text{m}^2$. /35./

Koska LEDin pintakirkkaus on niin suuri ja koska voimakas valo voi vahingoittaa silmän aistinsoluja, ei LEDin lähettämää valoa saa päästää säteilemään suoraan katsojan silmiin. Tällainen pintakirkkauden aiheuttama silmävaurio saattaa tulla näkyviin vasta 20 vuoden kuluttua. Lisäksi kasvihuonesovellutuksien yhteydessä on vielä huomioitava, että silmän verkkokalvo vaurioituu herkimmin juuri lyhytaaltoisessa (sinisessä) valossa. /26; 45./

Tämän selvityksen aikana ei ollut mahdollista saada kattavaa ja tarkkaa kuvaa LED-valaistuksen pintakirkkauden mahdollisesti aiheuttamista ongelmista. Asia on kuitenkin työterveysmielessä niin tärkeä, että lisäselvitykset tässä asiassa ovat välttämättömiä. Pintakirkkauden mittaukset ja lisäselvitykset tuleekin aloittaa välittömästi mahdollisen kehitysprojektin alkaessa. Lisäksi, koska kasvivalaistus toteutetaan pääosin sinisen ja punaisen spektrin alueella, ei riittävästä työskentelyvalaistuksesta (luksia) voida varmistua ilman lisätutkimuksia.

3 SELVITYKSEN AIKANA HAASTATELLUT LAITOKSET, YRITYKSET JA ASIAANTUNTIJAT

Selvityksen vaatimaa uusinta tutkimustietoa ja tekniikkaa lähdettiin tiedustelemaan alan yrityksistä ja tutkimuslaitoksista. Nämä kohteet ja niissä haastatellut henkilöt on esitelty lyhyesti seuraavissa kappaleissa. Mainittakoon vielä, että kaikilla haastatelluilla oli myös yhteistyöhalukkuutta ja mielenkiintoa lähteä mukaan tuotteen mahdolliseen kehitysprojektiin.

3.1 MTG-Engineering Ltd

Tämän hetken yleistä tietoa LED-tekniikasta, optiikasta ja alan kehityksestä lähdettiin tiedustelemaan ensisijaisesti MTG-Engineering Ltd.:stä, joka on yksi alan kärkinimistä niin Suomessa, mutta myös maailmalla. MTG-Engineeringillä on laajaa kansainvälistä yhteistoimintaa kehitys- ja tutkimustyön osalta mm. Japanissa. Yrityksessä haastateltiin Managing Director Leo Hajatsaloa sekä R&D Director Kari Rinkoa ja samalla tutustuttiin yrityksen toimitiloihin Helsingissä. Yrityksen lausuntojen mukaan heidän osaamisensa perustuu erityisesti laajaan valotekniseen ja valo-optiseen tietämykseen sekä IT-alan osaamiseen. Heillä oli myös alan moderni tutkimuslaitteisto hallussaan. Lisäksi yrityksen henkilöstöllä oli jonkin verran tutkimustietoa valon vaikutuksista kasvien fotosynteesiin ja kasvuun. /39;48/.

3.2 KARL MAYER Textilmaschinenfabrik

Saksalainen Karl Mayer on maailman johtava tekstiilikoneiden ja -tekniikan valmistaja, jolla on hallussaan myös alan tuorein kehitys- ja tutkimustieto. Yritys valmistaa laadukkaita ja luotettavia tekstiilien valmistukseen tarkoitettuja koneita, jotka on spesifioitu juuri tilaajan tarpeita vastaaviksi. /31./ Karl Mayerilta lähdettiin tiedustelemaan tähän selvitykseen uusimman tekstiilitekniikan mahdollisuuksia. Samalla tiedusteltiin myös yrityksen halukkuutta osallistua tuotteen mahdolliseen kehitysprojektiin koneiden tuotantolaitteistojen suunnittelijana ja toimittajana.

3.3 Teknillinen korkeakoulu, TKK. Valaistuslaboratorio

TKK:n valaistuslaboratorio Espoon Otaniemessä on tutkinut ja kehittänyt LED-valaistusta jo pitkään. Lisäksi kasvien kasvatusta LEDeillä on tutkittu jo useiden vuosien ajan ja tutkitaan edelleen. Valaistuslaboratoriolla on koko ajan laajaa valtakunnallista ja kansainvälistä tutkimustoimintaa, joka koskee LED-valaistusjärjestelmiä ja niiden ohjausta /49/. Otaniemessä käytiin haastattelemassa valaistuslaboratorion johtajaa, professori Liisa Halosta.

3.4 Maa- ja elintarviketeollisuuden tutkimuskeskus, MTT. Piikkiön tutkimusyksikkö

MTT on maamme johtava maatalous- ja elintarviketutkimusta ja maatalouden ympäristöntutkimusta tekevä laitos. MTT toimii maa- ja metsätalousministeriön alaisuudessa. MTT Piikkiö on Suomen johtava kasvinjalostukseen ja lasinalaisviljelyyn keskittynyt tutkimuslaitos, jonka johtajana toimii professori Risto Tahvonen. Piikkiön tutkimusyksikköön lähdettiin tiedustelemaan heidän kokemuksiaan LED-valoviljelystä, jota on tutkittu laitoksessa muutaman vuoden ajan. Tutkimusta on tehty yhdessä TKK:n Valaistuslaboratorion kanssa /38;44/.

3.5 Finpro ry.

Tietoa kansainvälisistä markkinoista lähdettiin hakemaan Finpro ry:stä, joka on suomalaisten yritysten perustama rekisteröity yhdistys. Sen jäsenenä on noin 560 suomalaista yritystä, Elinkeinoelämän Keskusliitto ja Suomen Yrittäjät. Finpro on maailmanlaajuinen asiantuntijaorganisaatio, jonka jäsenet luovat edellytyksen toiminnalle, jolla suomalaisten yritysten kansainvälistymistä voidaan nopeuttaa. Se tarjoaa erilaisia kansainvälisiä markkinaselvityspalveluja ja -raportteja asiakkailleen. Finprolla on yli 50 vientikeskusta yli 40 maassa eri puolilla maailmaa. Näissä maissa toimivat asiantuntijat tuntevat paikalliset markkinat, niiden erityisvaatimukset sekä liiketoimintakulttuurin ja osaavat näin antaa parhainta ja ajantasaista tietoa eri maiden markkinatilanteista.

4 LED-TEKNIikka

LED (Light Emitting Diode) on valoa lähettävä diodi, lamppu, jonka toiminta perustuu elektroluminenssiin. Elektroluminenssi on ilmiö, jossa kiinteään aineeseen johdettu sähkövirta saa aineen emittoimaan näkyvää valoa. Tekniikka on siis erilainen kuin esimerkiksi perinteisessä hehkulamputta, jossa hehkulangan lämpöenergia, termoluminenssi, synnyttää valon. Seuraavissa luvuissa käsitellään melko kattavasti tämän lähitulevaisuuden yleisvalonlähteen historiaa, ominaisuuksia, sovellutuksia ja tulevaisuudennäkymiä. /14./

4.1 LED-lampun historia

LEDin historia juontaa juurensa sadan vuoden taakse, vuoteen 1907, jolloin brittiläinen radioinsinööri ja keksijä Henry Round yritti kehittää uudenlaisia tasasuuntimia hitsauskoneisiin /41/. Tutkimuksissaan hän havaitsi sattumalta, että kun piikarbidikiteeseen (SiC) johdettiin elektrodein sähkövirtaa, alkoivat rajapinnat hohottaa heikkoa valoa. Ilmiö oli uusi ja tuntematon. Tämän saattoi havaita myös Roundin julkaisemasta tiedotteesta, jossa hän epäili eri aineiden rajapinnan olevan ehkä vain toisarvoinen selitys ilmiölle, ja että ensisijaisesti valo syntyi lämmön

vaikutuksesta. Kuitenkin todellisuudessa, vaikkei löydössä voitu teknisesti pu-
huakaan varsinaisesta p-n-liitoksen diodista, hän oli keksinyt ensimmäisen ledin.
Mainittakoon vielä tässä, että piikarbidi tunnettiin ja tunnetaan vielä nykyäänkin
paremmin mm. hiomapaperin hioma-aineena.

Seuraavien vuosikymmenien aikana piikarbidia ja muutamia uusia puolijohteita
tutkittiin jonkin verran, mutta tuloksetta. Tutkittujen puolijohteiden valontuotto-
ominaisuudet olivat heikkoja ja olosuhteille herkkiä, ja myös materiaalien laatu
oli vaihtelevaa. Nämä kaikki yhdessä aiheuttivat lopulta sen, että mielenkiinto il-
miötä kohtaan tyrehtyi. Nimi tälle oudolle ilmiölle kuitenkin keksittiin, elektro-
luminenssi. /14./

Varsinainen moderni LED-tutkimus alkoi 50-luvulla, kun jo tunnettujen ja luon-
nossa esiintyvien puolijohteiden rinnalle keksittiin uusia, keinotekoisesti seostet-
tuja III-V-tyypin puolijohteita (mm. galliumarsenidi, GaAs). Tämän ryhmän puo-
lijohteet osoittautuivat optisilta ominaisuuksiltaan hyvin aktiivisiksi, mikä alkoi
nopeasti näkyä myös tekniikan kehittymisenä. Tutkittavista yhdisteistä ylitse
muiden nousi jo edellä mainittu galliumarsenidi, josta valmistettiin ensimmäi-
nen kaupalliseen levitykseen tullut LED vuonna 1961. GaAs-LED säteili ainoas-
taan infrapuna-valoa (870 nm), mutta tuote löysi silti heti tiensä markkinoille.
Käyttöä infrapunaledille löydettiin mm. erilaisissa teollisuuden anturi- ja valo-
kennosovelluksissa. Aluksi GaAs-LEDien valmistuserät olivat tosin melko pieniä
tuotteen kovan listahinnan vuoksi, 130 US\$ / kpl. /14./

Infrapunaledin jälkeen LED-tekniikka tunnettiin teoriassa hyvin, eikä mennytkään
enää kuin vuosi, kun ensimmäinen näkyvää valoa lähettävä LED keksittiin. Asial-
la oli silloin General Electricin palveluksessa toiminut fyysikko, Nick Holonyak
Jr. Tutkiessaan galliumarsenidin infrapunavalon ominaisuuksia, hän seosti yhdis-
teeseen mukaan fosforia ja sai näin GaAs:n lähettämän valon taajuuden kasva-
maan näkyvän valon alueelle, punaiseen. Hän oli keksinyt ensimmäisen, näkyvän
valon aallonpituudella emittoivan LEDin, GaAsP:n. Alkujaan General Electricin
tarjoaman tuotteen listahinta oli 260 US\$ kappaleelta, joten ymmärrettävästi
myynti oli melko vähäistä. Muutos tilanteeseen saatiin 1968, kun Monsanto Co.
aloitti punaisten GaAsP-LEDien massatuotannon. LEDien myynti lähti eksponen-

tiaaliseen kasvuun ja kahdentui aina muutaman kuukauden välein, LEDit valtasiivat maailman. /14/.

Seuraavien kahdenkymmenen vuoden aikana kehitettiin lukuisia uusia puolijoh-teita, joiden avulla valmistettiin hyötysuhteeltaan aina vain entistä parempia ja te-hokkaampia LED-lamppuja. Samalla myös värien skaala laajeni ensin keltaiseen ja oranssiin sekä muutamaa vuotta myöhemmin vihreään. Superkirkkaat uudet LEDit seurasivat toisiaan ja kehitys kulki eteenpäin. Yksi suuri ongelma kuiten-kin vielä oli, sininen valo. Ennen kuin sinisen LED-valon ongelma saatiin ratkais-tua, ehti infrapunaLEDin keksimisestä kulua aikaa yli 30 vuotta. /12;14/.

Sinistä valoa tuottava LED oli oikeastaan kehitetty jo 60-luvun lopulla, jolloin en-simmäisen LEDin puolijohdemateriaalista, piikarbidista, oli uusilla menetelmillä saatu sinistä valoa emittoivaa. Hyötysuhteet SiC-LEDeissä olivat kuitenkin mak-simissaankin vain 0,03 %:n luokkaa, joten markkinoilla ne eivät olisi ikinä pysty-neet kilpailemaan III-IV-tyyppin puolijohdeista valmistettujen LEDien kanssa. Pii-karbidi oli siis auttamatta hylättävä sinisen valon tehokkaana tuottajana, minkä vuoksi 90-luvun taitteessa oli tutkimus sinisen LED-valon synnyttämiseksi keskit-tynyt etupäässä kahden III-VI-tyyppin puolijohdeiden, sinkkiselenuidien (ZnSe) ja gal-liumnitridin (GaN) ympärille. Jälkimmäinen puolijohde oli jo ennestään tunnettu materiaali LED-markkinoilla, sillä saatiin aikaan ultrakirkkaita vihreän sävyjä. Sinkkiselenuidi taas oli uusi haastaja, jota tutkittiin ahkerasti useimmissa yliopis-toissa. Suurin osa tutkijoista uskoikin nimenomaan sinkkiselenuidien tarjoavan rat-kaisun sinisen valon ongelmaan, mutta toisin kuitenkin kävi. Vuonna 1993, neljän vuoden työn tuloksena, julkaistiin ensimmäinen tehokas sinisen valon LED, jonka materiaalina toimi indiumilla seostettu galliumnitridi (InGaN). Sinisen valon ke-hittäminen oli todella merkittävä virstanpylväs LED-tekniikan saralla. Keksinnön merkittävydestä kertoo esimerkiksi se, että sinisen LEDin kehittäjä, japanilainen Shuji Nakamura, sai keksinnöstään miljoonan euron Millenium-tekno-logia-palkinnon vuonna 2006. /12;14/.

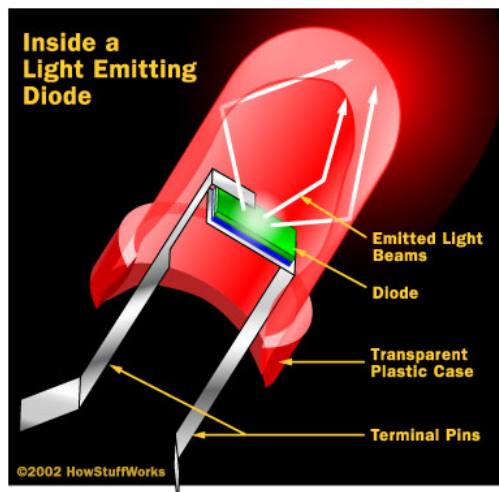
Ennen sinistä valoa oli LEDejä käytetty lähinnä merkkilamppuina, mutta nyt kun tutkijoilla oli käytössään valon koko spektri, saatiin myös valkoista valoa synty-

mään. Unelma LEDeistä tulevaisuuden yleisvalonlähteinä oli jälleen askeleen lähempänä ja kiinnostus alaa kohti kasvoi.

Aina 90-luvun puolesta välistä tähän päivään asti on LEDien kehitys- ja tutkimustoiminta ollut koko ajan kiihtyvää. Paljon uusia, tehokkaita puolijohdemateriaaleja on tullut markkinoille, tuotantomenetelmät ovat kehittyneet entisestään ja LED-sovellutusten määrä on kasvanut koko ajan. LEDit ovat nyt horjuttamassa yleisvalonlähteiden asemaa, tulevaisuus näyttää valoisaalta. /3;14;48;49./

4.2 LEDin rakenne ja toiminta

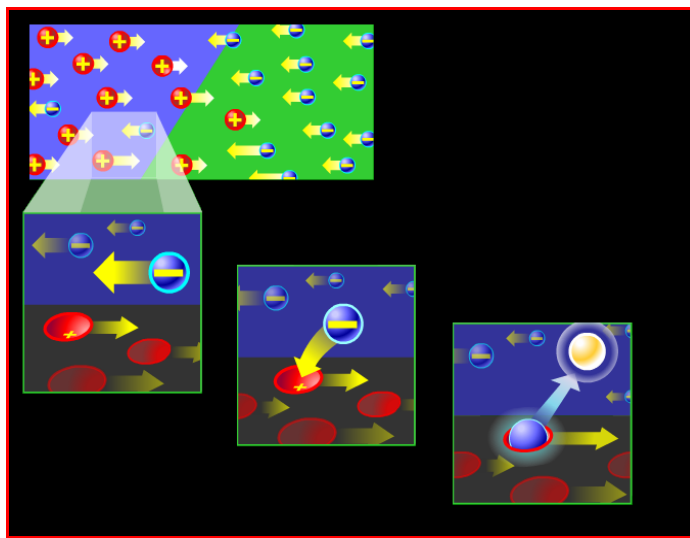
LED on valoa lähettävä puolijohdediodi, jonka toiminta perustuu jo edellä mainittuun elektroluminenssiin, ilmiöön, jossa kiinteään aineeseen johdettu sähkövirta saa aineen emittoimaan näkyvää valoa. LED-lampun rakenne muodostuu yksinkertaistettuna kytkentäpinneistä, puolijohdesirusta ja kotelosta, jonka sisään tekniikka on valettu (kuva 3). Koska LED on tasajännitteellä toimiva puolijohdekomponentti, se päästää virtaa lävitseen vain yhteen suuntaan. /29./



Kuva 3 LED-lampun rakenne /30/

Itse LED-lampun sydän, puolijohdeklide, koostuu kahdesta yhteen liitetystä puolijohdemateriaalista. Toinen materiaaleista on P- ja toinen N-tyyppinen, joten yleisesti puhutaankin P-N-tyypin puolijohdeesta. P-tyypin materiaali on seostettu positiivisesti varautuneeksi ja sen atomeilla on siitä syystä radoillaan elektronivaja-

usta eli aukkoja. Negatiivisesti varautuneessa N-tyypin materiaalissa taas on ylimääräisiä elektroneja, jotka liikkuvat aineessa vapaasti. N- ja P-puolijohdeiden kosketuspintaa kutsutaan rajakerrokseksi. Lepotilassa puolijohhteessa ei kulje virtaa ja rajakerros on tyhjä, mutta kun positiivinen virta kytketään, alkaa puolijohhteessa tapahtua. Rajakerroksen läpi alkaa tällöin kulkea elektroneja, jotka kohdatessaan aukkoja yhtyvät niihin ja vapauttavat samalla energiaa fotonien muodossa (kuva 4). /12;29/



Kuva 4 Ledin, eli valoa lähettävän diodin toiminta yksinkertaistettuna, kun virta on kytketty.

LED-lampun lähettämän valon väri eli taajuus riippuu siitä, kuinka syvälle atomiin elektroni putoaa. Mitä syvemmälle atomiin elektroni putoaa, sitä suuremman energiamäärän se vapauttaa. Suurempi energiamäärä tarkoittaa myös korkeampaa fotonin värähtelytaajuutta ja samalla siis korkeampitaajuisia valoa. Koska valon muodostus perustuu tällaiseen ilmiöön, ovat LED-lamput aina koherenttia eli yksitaajuisia valoa lähettäviä. Yksittäisen LEDin valon spektri on siis kapea. Erivärisiä LED-lamppuja saadaan aikaan yhdistelemällä erilaisia puolijohdemateriaaleja tai lisäämällä puolijohdeaineen päälle joitain säteilyä suodattavia ainesosia. Yksi yleisessä käytössä oleva suodattava materiaali on fosfori, jolla voidaan esimerkiksi muuttaa sinisen LED-lampun säteilemä valo valkoiseksi. /12;29./

4.3 LEDin vahvuudet ja heikkoudet verrattuna muihin nykyisin käytössä oleviin valonlähteisiin

Kuten jo edellä on useasti mainittu, on LED-tekniikka muihin valonlähteisiin nähden monilta osin aivan yliverstaista. LED-lampulla on, ja sille tulee vielä tulevaisuudessa kehittymään, monia ominaisuuksia, joita ei millään muulla nykyisellä valonlähteellä tulla ikinä saavuttamaan. Mutta vaikka LED-tekniikan kehitys on viimeisen vuosikymmenen aikana ollut vireätä, on LEDeillä kuitenkin edelleen myös heikkouksia. Tässä luvussa käsitellään LED-tekniikan tämänhetkistä tilaa.

4.3.1 Tekniset ominaisuudet

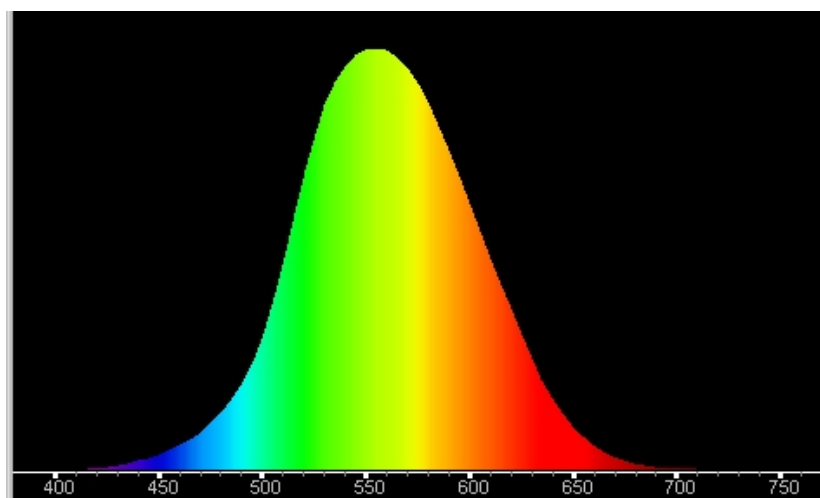
LEDien teknisiä etuja verrattuna perinteisiin valaistusratkaisuihin ovat mm. pitkä, jopa 100 000 tunnin käyttöikä. Hehkulampulla polttoikä on keskimäärin n. 1000 h /42/ ja suurpainenaatriumilla maksimissaan n. 32 000 h /23/. Muita LEDin etuja ovat matala käyttöjännite, tärinän kesto ja helppo säädettävyyys sekä ohjattavuus. Lisäksi LED on materiaaliensa puolesta helposti kierrätettävä, koska se ei sisällä ongelmajätteitä. /3;48/. Myös LEDien lämmöntuotto on huomattavasti pienempää kuin useimmilla valonlähteillä, ja koska lämpö poistuu lampusta johtumalla eikä lämpösäteilyä niin kuin muilla valonlähteillä, ovat sovellusmahdollisuudet entistä laajemmat. LED-lamput eivät myöskään säteile lainkaan ihmisille ja kasveille haitallista UV-säteilyä, ellei kyseessä nimenomaan ole UV-LED (käytetään mm. kehityksmaissa juomaveden desinfiointiin /4/). Normaalivalaistuksessa erityisesti loistelamput ovat UV-valon lähteitä. LED-valaistuksen ratkaisut ovat perinteisiin valaisimiin ja lamppuihin verrattuna myös kevytrakenteisiä, mikä tuo huomattavia etuja kiinnitys- ja rakennesuunnitteluun. Osittain kevytrakenteisyyteen vaikuttaa myös se, että LED-lamput eivät tarvitse ulkopuolisia heijastimia ja linsejä valon suuntaukseen. Valon suuntaus hoidetaan LEDiin itseensä integroiduilla heijastin- ja linssirakenteilla. LEDien valokeilaa pystytään tällä hetkellä suuntaamaan n. 10°:sta aina 120°:seen /28/.

LEDien teknisiä heikkouksia on ainakin niiden herkkyys lämpötilan vaihtelulle, ts. se, että niiden käyttöikä laskee merkittävästi korkeissa lämpötiloissa. Tasavirtakäyttöinen LED tarvitsee myös sähköverkkoon liitettäessä aina jonkinlaista oh-

jauselektroniikkaa toimiakseen. /24./ Ohjauselektroniikan suurimpana ongelmana on LEDin kohdalla, että se sisältää yleensä hakkurivirtalähteen, jonka vuoksi LED-valaistus saattaa laajemmassa mittakaavassa aiheuttaa verkkoon harmonisia yliaaltoja. Ne taas aiheuttavat ylimääräistä rasitusta verkolle. Toisaalta LED-valaistus ei muuhun purkauslamppuvalaistukseen verrattuna kuitenkaan kuormita verkkoa induktiivisella loisteholla, joka saattaa purkauslamppuvalaistuksen kohdalla olla merkittäväkin ongelma. /51/ Elektroniikan puolijohdeena LEDillä on myös sellainen heikkous, että se on komponenttina melko herkkä sähköstaattisille purkauksille (ESD) /4/. Lisäksi vielä yksi huono puoli tämän hetken LED-tekniikassa on alalta puuttuva standardointi. /24./

4.3.2 Valotehokkuus, kustannukset ja energiansäästö

Valotehokkuuden ymmärtämiseksi on ensin tunnettava valovirran määritelmä. Valovirta (yksikkönä lumen, lm) on SI-järjestelmän mukainen suure, jolla ilmaistaan valonlähteen lähettämä, ihmissilmän spektriherkkyyskäyrällä painotettu säteilyteho. Ihmissilmän spektriherkkyys on tarkimmillaan noin 555 nm valossa, joka sijoittuu keltaisen ja vihreän valon raja-alueelle (kuva 5) /14./. Jos verrataan esimerkiksi samalla säteilyteholla säteilevää keltaista ja punaista valonlähdettä, näyttää keltainen valo ihmissilmään kirikkaammalta ja sen lähettämä valovirta on siis myös suurempi.



Kuva 5 Ihmissilmän spektriherkkyyskäyrä, joka on herkimmillään n. 555 nm aallonpituusalueella /46/

Valotehokkuus on suure, jolla ilmaistaan valonlähteen tuottaman valovirran määrä suhteessa sähköiseen ottotehoon. Valotehokkuus ilmoitetaan lm/W -arvolla (luumenta per watti). Suurempi valotehokkuus tarkoittaa käytännössä yleensä energiatehokkaampaa valonlähdettä. Valotehokkuus voidaan valonlähteen lisäksi määrittellä myös koko valaisimelle.

Nyt käytössä olevien LEDien valotehokkuudessa liikutaan yleisesti hyötysuhteissa n. 30 - 50 lm/W (hehkulamppu max. 17 lm/W) /11/, mutta Japanilainen Nichia Corporation on jo julkaissut valkoisen valon LEDin (4600 K), jonka valotehokkuus on 150 lm/W. Tämä 150 lm/W arvo on jopa suurempi, kuin suurpainenatriumlampulla (120 - 140 lm/W), lampulla, jota on aina pidetty tehokkaimpana mahdollisena valonlähteenä /40/. Lisäksi tässä mainittakoon, että teoreettisesti LEDin valotehokkuus voidaan saada nostettua arvoon 400 lm/W /21/.

Kustannuksia ajatellen LEDin heikkoja puolia on ainakin toistaiseksi sen melko korkea hinta, kun ajatellaan yleisvalaistuskäyttöä. Verrattuna halvimpaan valaistusratkaisuun, loisteputkeen, on LED suhteessa vielä n. 20 kertaa kalliimpi. Tämä arvo on saatu kun valaistusratkaisun hankinta- ja käyttökustannuksia on verrattu tuotettuun valotehoon ja käyttötunteihin /24/.

4.4 LED-lamppujen kehitys, tulevaisuuden näkökulmia ja odotuksia

Alkujaan pelkästään merkkilampputekniikassa käytetyt LEDit ovat jo tänä päivänä levinneet kaikkialle, niitä on käytössä esimerkiksi autojen ja moottoripyörien lamppuissa, taskuvalaisimissa, näyttöjen taustavaloina, videoprojektoreissa, liikennevaloissa, optisessa tiedonsiirrossa, koristevalaistuksessa, kohdevalaistuksessa, jopa tievalaistuksessa /3;12;14;48;49/. Lisäksi sovellutuksien määrä kasvaa koko ajan. LEDien markkinoiden laajenemisesta kertoo myös se, että kun vuonna 2001 maailmassa myytiin LED-komponentteja 1,2 miljardin dollarin edestä oli vuonna 2005 LED-komponenttien myynti jo 3,9 miljardia dollaria /4/. Myynnin markkina-arvo siis yli kolminkertaistui tuona aikana, vaikka LED-komponenttien hinnat vielä laskevat joka vuosi n. 30 % /48/.

Kuten edellisessä luvussa jo mainittiin, ovat LEDit vielä tällä hetkellä melko kal-
liita vaihtoehtoja useimpiin yleisvalaistusratkaisuihin. Asiantuntijalausuntojen ja
alan yleisen näkemyksen perusteella on kuitenkin odotettavissa, että LEDien hin-
nat tulevat jatkossakin laskemaan n. 30 %:n vuosivauhtia ja valoteho kaksinker-
taistumaan n. 2 vuoden välein /48;49/. Tosin huomioitavan arvoinen seikka on, et-
tä pelkästään viimeisen puolen vuoden aikana julkaistujen LEDien kohdalla valo-
tehokkuus on kasvanut yli 50 % /34;40/. Nämä uutiset antavat siis viitteitä siitä,
että nykyinenkin arvio LEDien kehitysnopeudesta on melko varovainen ja kehi-
tysnopeus tulee varmasti vielä entisestään kasvamaan.

Jo nykyisellä kehitysnopeudella on odotettavissa, että LEDit tulevat seuraavan
kymmenen vuoden aikana syrjäyttämään useita perinteisiä valaistusratkaisuja
/24/. TKK:n tutkija Paulo Pinho uskoo, että seuraavan 5 - 10 vuoden aikana LE-
Dit ovat yleisesti käytössä myös kasvihuoneiden valaistuksessa ja valoviljelyssä
/8/.

Jotta lähitulevaisuuden LED-tekniikan leviämisestä ja sovellutusalueista saisi
jonkinlaisen käsityksen, mainittakoon tässä yhtenä ajankohtaisena tutkimusesi-
merkkinä Salon kaupungissa joulukuussa 2006 alkanut katuvalokokeilu. Salossa
yhden tieosuuden suurpainenatriumvalaistus on tällä hetkellä korvattu kokonaan
LED-valaistuksella ja kyseisellä tieosuudella on päästy jo nyt 80 % sähkönsääs-
töön. Katuvalokokeilusta saadut tutkimustulokset ovat muutenkin olleet todella
lupaavia ja sen vuoksi Salossa sekä muutamissa muissa kaupungeissa pohditaan
nyt vakavasti kaikkien katuvalojen vaihtamista LED-valaistukseen. /1./

5 VALOVILJELY

Valoviljelyllä tarkoitetaan tässä tutkintotyössä ammattimaista, kasvihuoneissa
keinovalotuksen avulla suoritettua ympärivuotista tai lähes ympärivuotista vilje-
lyä. Keinovalotusta käytetään silloin, kun luonnonvalo kasvihuoneessa ei riitä
luomaan kasville optimaalisia kasvuolosuhteita. Eri kasvien vaatimat valotustehot
vaihtelevat melkoisesti, esimerkkinä kurkku n. 250 W/m² ja tomaatti n. 150
W/m². Kasvihuonevalotuksessa käytetyin valonlähde tällä hetkellä on suur-

painenatriumlamppu. Valoviljelyn avulla tuotetaan lähes kaikkia ihmisten tarvitsemia vihanneksia, yrttejä, kukkia ja nykyään myös jonkin verran hedelmiä. Tuotettavien kasvien määrät ja suhteet vaihtelevat maittain melko paljon. /15;32./

5.1 Valoviljely Suomessa

Ammattimaiseen viljelyyn käytettäviä lämmitettäviä kasvihuoneita on Suomessa 430 hehtaaria. Kasvihuoneviljely on päätuotantosuunta noin 1500 yrityksessä. Lämmitetyissä kasvihuoneissa käytetään lähes poikkeuksetta lisävalotusta ja lisävalotuksen käyttö on myös lisääntynyt merkittävästi viime vuosina. Lisävalolla kyetään Suomessa jatkamaan merkittävästi satokautta ja parantamaan tuotteiden laatua. Näillä leveyspiireillä millään muulla tekijällä ei saada niin suurta tuotannon lisäystä, kuin valotuksella /20/. Usein valotuksen käyttö tehostaa tuotantoa siten, että tuoteyksikköä kohti syntyvät energiakulut eivät kasvukautta jatkettaessa kasva. Tyypilliset suomalaiset kasvihuoneet ovat 20 tai 21 metriä leveitä erillishuoneita. Kilpailijamaissa käytössä olevia suuria ryhmäkasvihuoneita Suomessa on käytössä melko vähän. /32/

Jokaiseen suomalaiseen talouteen tuotetaan vuosittain 17 kiloa tomaatteja, 15 kiloa kurkkuja, kolme kiloa salaatteja ja yrttejä, 65 leikkokukkaa, kahdeksan ruukkukasvia ja kaksikymmentä ulos istutettavaa ryhmäkasvia. Ruukkuvihannesten, kurkun, leikko- ja ruukkukukkien tuotanto on monissa yrityksissä täysin ympärivuotista. Myös tomaatin ympärivuotinen tuotanto on viime vuosina lisääntynyt. /32./

5.2 Valoviljely maailmalla

Kasvihuonevihannesten tuotanto globalisoituvassa maailmassa on varsin haasteellista, koska kilpailua käydään yhä enemmän pohjoisen ja etelän maiden välillä. Kilpailun kiristytessä valotusaikoja ja näin myös satoaika pidennetään, mutta samalla energia-asiat ovat yhä vankemmin esillä. Pohjois-Amerikassa USA:n suurista markkinoista kilpailevat lähinnä Meksiko ja Kanada, joista jälkimmäisessä

kasveja tuotetaan erityisesti valoviljelyn avulla. Euroopassa pohjoisen suuria valoviljelymaita ovat, Hollannin ohella, Iso-Britannia, Saksa ja Pohjoismaat. Nämä kilpailevat markkinoista lähinnä etelän Espanjan, mutta tulevaisuudessa myös Marokon ja Turkin kanssa. Valoviljelyä harjoitetaan jonkin verran myös muualla maailmassa, mutta esimerkiksi Japanissa valotuksen käyttö on melko vähäistä johtuen muuten riittävästä luonnonvalosta. Tilanne saattaa kuitenkin muuttua lähitulevaisuudessa, jos tilanpuutteen vuoksi joudutaan viljelyä siirtämään suljettuihin tiloihin, kuten esimerkiksi maan alle. /10;15;51./

6 LED-VALOVILJELYN TUTKIMUS- JA KEHITYSTOIMINTA SUOMESSA JA ULKOMAILLA

Maailmanlaajuisesti LED-lamppujen kehitys on ollut kiihkeää jo useita vuosia ja viimeaikaisten kehitysharppausten johdosta LEDien hyödyntäminen on tullut ajankohtaiseksi myös valoviljelyssä. Tutkimusta LED-valoviljelystä tehdään useissa maissa ympäri maailmaa, suurimpina mainittakoon Kanada, Yhdysvallat, Japani, Liettua ja Suomi. Tutkimusta tehdään erityisesti yliopistoissa, mutta myös muissa tutkimuskeskuksissa valoviljelyä tutkitaan /49/. Yhtenä mielenkiintoisena tutkimusjärjestönä tässä mainittakoon Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallinto NASA, joka tutkii LED-valoviljelyä ja sen käyttömahdollisuuksia avaruuslentojen yhteydessä /33/. LEDien kehityksessä aktiivisesti mukana olevista maailmanluokan yrityksistä mainittakoon tässä esimerkkinä suuret lamppuvalmistajat Osram, Philips sekä Cree Lighting. Tutkimuksissa tapahtuu kehitystä koko ajan ja esimerkiksi Japanissa viljellään jo lehtisalaattia punaisten LEDien loisteessa /8/.

Teknologiamaana on yleisen LED-tekniikan asiantuntemus sekä tutkimus- ja kehitystyö Suomessa korkealaatuista. Varsinaisen LED-valoviljelyn tutkimus on Suomessa myös melko aktiivista, ja koska sitä tehdään yhteistyössä alan yritysten ja toimijoiden kanssa, voidaan olettaa, että myös tekninen kehitys on ajantasaista /44/.

7 LED-VALOTUKSEN TUTKIMUSTULOKSIA SUOMESTA, KEHITYKSEN KOHTEET JA TUTKIMUKSEN TARVE

MTT ja TKK ovat yhteistyössä ja erikseen tutkineet LEDien käyttöä valoviljelyssä jo usean vuoden ajan ja yhdeltä TKK:n tutkijalta, Paulo Pinholta, on aiheesta tulossa väitöskirja syksyllä 2007 /49/. Tämän vuoksi tuoreinta tutkimustietoa ei vielä tähän selvitykseen ollut saatavilla. Seuraavissa kappaleissa kuitenkin esitellään Suomessa tähän mennessä tehtyjä tutkimuksia ja niissä havaittuja asioita.

Suomessa LED-valoviljelytutkimukset ovat keskittyneet lehtisalaattiin ja tutkimustulokset ovat olleet pääosin positiivisia. LED-valon avulla viljellyt lehtisalaatit ovat samoissa olosuhteissa samalla valomäärällä (LEDeillä punavoittoinen valo) saavuttaneet saman kasvun, mutta hieman suuremman biomassan (kompaktius) kuin suurpainenatriumlamppujen alla kasvaneet. /8;49/

Negatiivisina asioina tutkimuksissa on havaittu seuraavia: LEDien valotehokkuus ja hyötysuhteet ovat testivalaisimissa olleet vielä liian heikkoja. Syöttötehot ovat olleet LEDeille lähes yhtä suuret tai jopa suuremmat, kuin suurpainenatriumlampuille. Lamput ja voimalähteet ovat tuottaneet sen vuoksi myös runsaasti hukkalämpöä. Lisäksi kaikkea luonnonvaloa ei ole kyetty hyödyntämään LED-panealien varjostuksen vuoksi. Esiteltyä tuoteideaa, välivalotusmallia, MTT:n professori Tahvonen pitikin tässä mielessä erinomaisena ajatuksena.

Tutkimuksissaan MTT ja TKK päätyivät siis siihen, että nykyisten LEDien valotehot ovat heidän mielestään vielä aivan liian pieniä. Tehojen pitäisi nousta markkinoiden yleisestä 1 - 2 W/lampputehosta tuonne 10 - 15 W/lamppu, jotta LED-valaistus voitaisiin ottaa suuressa mittakaavassa käyttöön. Teknisesti LED kuitenkin kehittyy koko ajan ja sen teho ja hyötysuhde paranevat huimaa vauhtia, sähköiset ominaisuudet eivät siis ole ongelma LEDien matkalla kasvihuoneeseen.

Professori Halosen mukaan suurempi ongelma onkin ehkä se, että koska LED säteilee koherenttia valoa (valon taajuusalue on kapea), eikä sen lähettämää valon spektrihiippua voi rakenteesta johtuen juuri säätää, tulisi kasvin vaatiman spektrin muoto tuntea melko hyvin jo tuotetta valmistettaessa. Lisäksi eri kasvit vaati-

vat optimaaliseen kasvuun hieman erilaista valoa (aallonpituuksia), jonka vuoksi tutkimusta eri kasvien osalta vielä tarvitaan. Myös Professori Tahvonen piti tätä aallonpituusasiaa merkittävänä jatkotutkimusten kohteena. Hän puhui valokoostumuksesta, jolla tarkoitti sinisen ja punaisen suhdetta, ja sen merkityksestä kasvin kokonaiskäyttäytymiseen kasvun aikana. Kokonaiskäyttäytymisestä hän antoi esimerkkejä nivelvälistä, varren paksuudesta, korkeudesta ja salaatin kompaktiudesta. Professori Tahvonen ideoi myös natriumlamppujen ja sinisten LEDien yhteiskäyttöä. Tällainen valaisinratkaisu on myös ollut jo Suomen kasvihuonevalaisinmarkkinoilla, mutta se ei ole ollut ainakaan toistaiseksi toimiva tuote. Suurpainenatriumlampun lämpö on lyhentänyt samassa valaisinelementissä sijainneiden LEDien elinikää merkittävästi ja näin tuhonnut valaisimen ennen aikojaan. /49;52./

Ongelmien kohdalla TKK:n valaistuslaboratorion johtava professori Liisa Halonen, kuten myöhemmin myös MTT:n professori Tahvonen, painottivat erityisesti sitä lisätutkimuksen tarvetta, mikä liittyy eri kasvien tarvitsemaan valon spektriin. TKK:lla ja MTT:llä oltiin kuitenkin sitä mieltä, että LED-valojen käyttö tulee mullistamaan koko viljelytekniikan lähitulevaisuudessa ja vaatii siksi runsaasti uutta tutkimusta. Lisäksi yhteenvetona edellä mainituista ongelmista Halonen mainitsi, että kaikki nämä ovat ratkaistavissa ja tullaan myös ratkaisemaan vielä lähiaikoina.

8 LED-VALOVERHO VASTAAN NYKYISTEN KASVIHUONEIDEN VALOTUSRATKAISUT, TUOTTEEN EDUT JA HAITAT

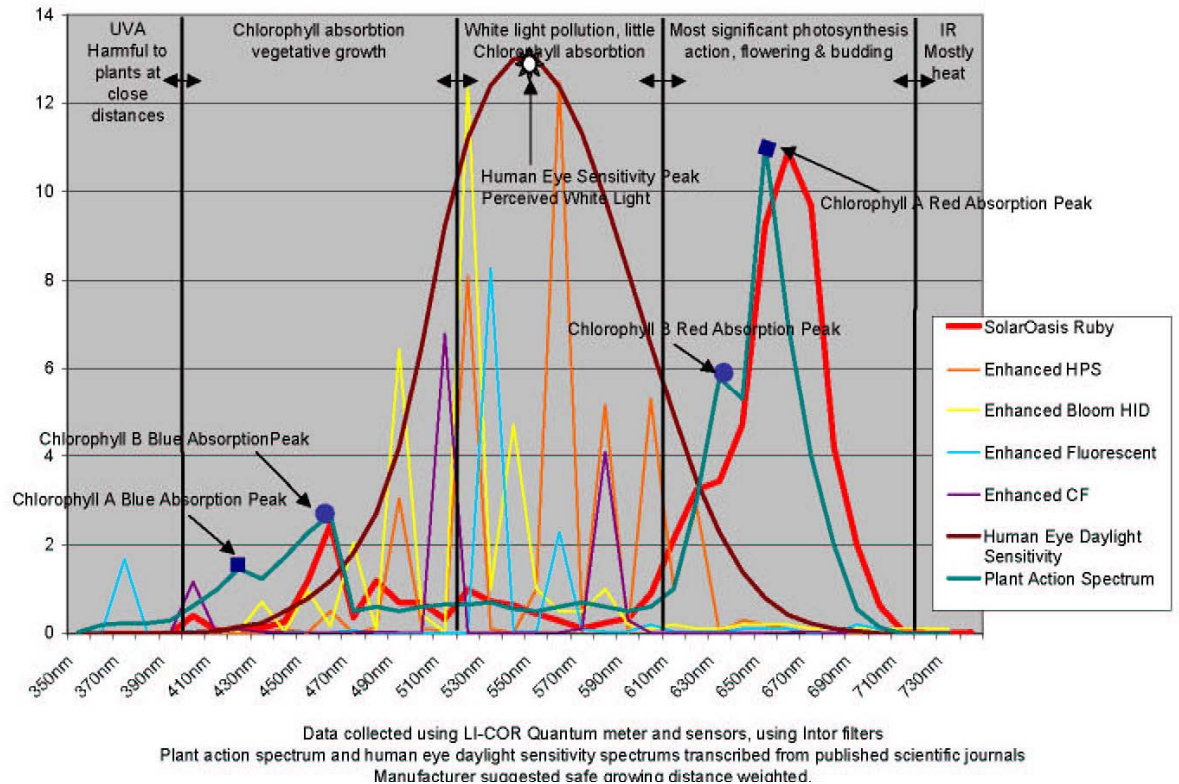
Tässä luvussa käydään läpi edellä esitellyn tuoteidean, LED-valoverhon, hyviä ja huonoja puolia verrattuna perinteisiin ylä- ja välivalotuksen suurpainenatriumratkaisuihin. Suuntaa antavia laskelmia ja vertailuja on myös tehty. Lisäksi niin kasvihuonealaa, kuin maailmaa yleisestikin puhuttaviin ympäristö- ja energianäkökohtiin perehdytään.

8.1 Kasvin hyödyntämä valon taajuusjakauma eli spektri

Kasville optimaalisin valo säteilee punaisen ($\lambda = 625 - 740\text{nm}$) ja sinisen ($\lambda = 430 - 500\text{nm}$) valon taajuuksilla. Sininen valo on olennaista kasvin kasvun kannalta ja punainen kukkimisen ja hedelmien tuoton kannalta /37/. Sininen ja punainen valo sijaitsevat spektrin eri päissä, eikä kasvin tarvitseman valon jakauma ole siis lainkaan tasainen. Ongelmallista tällaisessa valon spektrissä onkin se, että se on vaikea muodostaa nykyään purkauslamppuissa käytössä olevalla tekniikalla ja kaasuseoksilla.

Nykyään käytetyin lamppu kasvihuonevalotuksessa on suurpainenatriumlamppu (HPS, High Pressure Sodium). Suurpainenatriumin tuottama valo on pääosin spektrin punertavasta päästä, valon väriämpötila on normaalisti hyvin matala (n. 2100 K). Suurpainenatriumvalaisimet sopivat siis parhaiten kasvin kukkimisvaiheeseen, mutta spektritasapainotetuilla lamppuilla tyydyttäviä valotustuloksia saadaan myös kasvuvaiheessa. Spektriltään tasapainotettu lamppu tuottaa sinistä valoa 30 - 40 % enemmän kuin tavallinen lamppu. Suurpainenatriumin tekniikasta johtuen kasville täysin optimaalista punaisen ja sinisen valon spektriä ei kuitenkaan pystytä muodostamaan. /51./

Kuvassa 6 on esitetty erilaisten valonlähteiden keskimääräisesti lähettämät spektrit, ihmissilmän herkkyyden spektri (ruskea käyrä) ja kasvin hyödyntämän valon spektri (vihreä). Värikorjatun suurpainenatriumin spektrikäyrä löytyy kuvasta nimellä ”Enhanced HPS” (oranssi käyrä). Mainittakoon tässä myös, että kuvaajalta löytyvä Solar Oasis Ruby-käyrä (punainen), joka seuraa melko hyvin kasvin vaatiman valon spektriä, on erään Amerikkalaisen yrityksen valmistajan kasviledvalaisimen säteilemän valon spektri.



Kuva 6 Erilaisten kasvilamppujen, ihmissilmän ja kasvin hyödyntämän valon spektrit /37/

Edellä olevasta kuvaajasta voidaan havaita, että suurpainenatriumlamput lähettävät paljon sellaista valoa, joka säteilee kasvin kannalta epäedullisilla aallonpituusalueilla. Suurpainenatriumlampun pääsääntöisesti tuottaman keltaisen ja oranssin valon alueelta tulevasta säteilystä kasvi pystyy hyödyntämään vain noin 8 - 12 % /36/. Suurin osa tämän taajuusalueen valosta aiheuttaakin kasville vain ylimääräistä räsitusta liiallisen lämpösäteilyn muodossa. Tutkimusten mukaan jopa 93 % kasvihuoneissa käytettyjen keinovalonlähteiden ottotehosta muuttuu suoraan tai välillisesti lämpöenergiaksi /25/. Esimerkiksi laajalti käytössä olevan General Electricin Lucalox suurpainenatriumlampun 1000 watin tehosta kasvi pystyy hyödyntämään vain noin 124 W /36/.

Lämmöksi muuttuva ylimääräinen säteily on tietenkin lämmitystä tarvitsevilla kasvihuoneissa hyväksyttävää, mutta ei silti taloudellisin lämmitysvaihtoehto. Usein kasvien lähelle asennetut suurpainenatriumlamput alkavat lisäksi myös lämmittää ja polttaa kasveja, jolloin niitä on siirrettävä valaisemaan entistä kau-

empaa. Tällöin valoa tietenkin, hyvistä heijastimista huolimatta, säteilee aina enemmän muualle kuin haluttuun kohteeseen, kasveille. /51/.

LED-valaistusratkaisuilla ei valon spektrin kanssa tule ongelmia, sillä spektri voidaan muokata juuri kasville mieluisaksi. Koherenttia valoa lähettäviä LEDejä yhdistelemällä saavutetaan helposti kasville optimaalinen spektrijakauma ja hukkavalo minimoidaan. Tämä voidaan havaita esimerkiksi kuvan 6 LED-kasvivalaisimen spektrikäyrästä. Lisäksi LED-lampusta lämpö siirtyy pois johtumalla (konvektio), jolloin kasveihin suoraan kohdistuvaa lämpösäteilyä ei ole, vaan lämpö voidaan johtaa ilmaan paikoissa joissa siitä ei ole haittaa kasveille. Lämmön poistuminen johtumalla antaa myös mahdollisuuden siihen, että valonlähde voidaan viedä lähelle kasvia. Näin vähennetään merkittävästi valosaasteen aiheuttamia haittavaikutuksia, joista lisää luvussa 8.8.1. /49./ Professori Halosen mukaan nykyään käytössä olevien LED-lamppujen tehosta noin 25 % muuttuu lämmöksi /49/. Kasveille ja ihmisille haitallisesta UV-säteilystä ei muodostu ongelmaa LEDeillä, mutta ei myöskään suurpainenatriumlampuilla. Kummankaan valonlähteen spektri ei ulotu valon korkeataajuudessa päässä UV-valon alueelle asti. /36/.

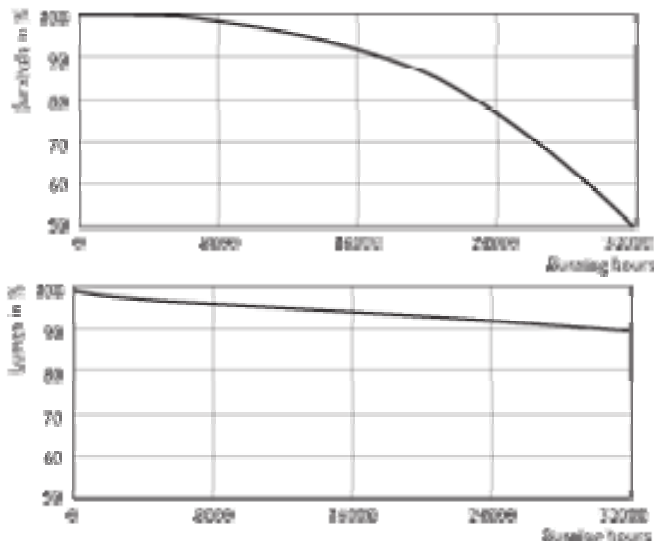
8.2 LEDin ja suurpainenatriumlampun valotehokkuus kasvien valotuksessa

Kasvivalotukseen tarkoitettujen suurpainenatriumlamppujen valotehokkuus on n. 140 lm/W /23/ ja valaistuskäytössä olevien valkoisen valon LEDien keskimääräinen valotehokkuus tällä hetkellä n. 30 - 50 lm/W /11/. Julkaistu on jo kuitenkin aina 150 lm/W arvoon yltäviä LED-lamppuja /40/. Tästä voidaan havaita, että kehitys on nopeaa. Kasvien kohdalla tulee kuitenkin huomioida, että niiden vaatiman valotehon määrää ei voida arvioida lm/W arvoina, koska valovirran yksikkö luumen on ihmissilmän spektriherkkyyssä painotettu suure (luku 4.3.2). Kasvien vaatiman valon spektrijakauma on ihmissilmään verrattuna lähes päinvastainen (kuva 6) ja tämän vuoksi niiden tarvitseman valotehokkuuden määrittämiseen vaaditaan erilaista valotehon määritelmää. TKK:n professori Halosen mukaan kasvien tarvitseman valotehon mittauksissa tulisikin puhua kasvien vaatimasta säteilytehosta (W/m^2) ja säteilysummasta eri valon aallonpituuksilla /49/.

Koska suurpainenatriumlamppujen säteilyteho ilmoitetaan ainoastaan valotehokkuutena, ei suurpainenatriumlampun ja LED-valoverhon suoranainen vertailu tässä selvityksessä ole mahdollista. Jotain suuntaa antavaa määrittelyä suurpainenatriumin ja LEDien valotehokkuuden erosta kasveille voidaan kuitenkin hahmotella luvussa 8.1 esitetystä tiedosta, jonka mukaan jopa 93 % suurpainenatriumlampun tehosta menee hukkaan kasvien valotuksessa. Suurpainenatriumilta vaadittu valotusteho kurkulle on n. 250 W/m^2 (mainittu luvussa 5). Toisin kuin suurpainenatriumlampulla, LEDeillä pystytään muodostamaan juuri kasville optimaalinen spektrijakauma (luku 8.1). LED-valon lähettämä säteilyteho pystytään siis hyödyntämään lähes kokonaan. Tämä ero ilmenee nykyisillä LEDeillä johdannossa-kin mainitun 60 %:n sähköenergiansäästön muodossa. Edellä mainittu arvo tulee LED-tekniikan kehittyessä varmasti vielä entisestään kasvamaan. Spekitritutkimuksiin ja vaadittuun valotustehokkuuteen tulee kehitysprojektin jatkuessa keskittää runsaasti voimavaroja tai tutkimustietoa tulee vaihtoehtoisesti hankkia aktiivisesti alan tutkimuslaitoksilta, koska on tärkeää että lopulliset tehovertailut saadaan hyvissä ajoin suoritettua.

8.3 Lamppujen polttoikä ja valovirran alenema ajan kuluessa

Kasvihuoneiden valotuksen käyttömäärät vaihtelevat maittain melko paljon, mutta esimerkiksi Suomessa normaali vuosittainen valotusaika on noin 3000 - 4000 tuntia. /51/. Suurpainenatriumlampun käyttöikä on maksimissaan n. 32 000 tuntia, mutta lampun prosentuaalinen elinkaari alkaa laskea jo noin 6000 polttotunnin kohdalla (kuva 7, ylempi kuvaaja). Lisäksi suurpainenatriumlampun lähettämä valovirta alkaa alentua välittömästi, kun lamppu otetaan käyttöön (kuva 7, alempi kuvaaja) /23/. Edellä mainittujen syiden vuoksi kasvihuoneiden lamput vaihdetaankin yleensä kolmen vuoden välein, jolloin niitä on poltettu noin 8000 - 10 000 tuntia /25;51/. Jotta kasveille siis taataan suurin mahdollinen valotusteho, joudutaan suurpainenatriumlamppuja vaihtamaan, vaikka polttoikää on vielä jäljellä. Elinkaariajattelun kannalta hukkaprosentti muodostuu todella suureksi.



Kuva 7 Suurpainenatriumlampun prosentuaalinen selviytymisaste (yllä) ja valovirran alenema (alla) suhteessa käyttötunteihin /23/

LEDin osalta tilanne näyttää paremmalta, LEDin tehollinen polttoikä on tällä hetkellä maksimissaan jopa 50 000 - 100 000 tuntia /3;21/. Valovirran alenemaa ei verhoon suunnitelluilla, litteillä pintaliitosledeillä tapahdu lainkaan ainakaan ensimmäiseen 15 000 käyttötuntiin /14/. Suunniteltu käyttöikä valoverholle on tällä hetkellä 10 vuotta, joka tarkoittaa noin 30 000 polttotuntia.

8.4 Luonnonvalon hyödyntäminen, valaisimien asennus, suuntaus ja heijastimet

Perinteisen ylävalotustavan ongelmana on usein, että luonnonvaloa ei pystytä täysin hyödyntämään. Näin käy, koska valaisimet varjostavat ja estävät auringonvalon pääsyä kasvustoihin. Tämä sama ongelma on myös nykyään kehityksen alla olevilla LED-kasvivalaisimilla, jotka ovat ylävalaisimia. Ylävalot siis varjostavat kasveja, mutta on niillä muitakin heikkouksia. Kun keinovalo tulee ylhäältäpäin, suurin osa valosta jää usein vain kasvien yläosiin. Valaistuksen tulisi kuitenkin olla sellainen, että kasvustorivit saisivat valoa tasaisesti sekä latvoihin, että kasvuston pystyseinämiin /9/. Suurpainenatriumvalaistusta käytetään myös jonkin verran ns. välivalotuksena, eli perusajatus on samanlainen kun valoverholla. Kasvirivien väliin laskettujen suurpainenatriumlamppujen ongelmana on kuitenkin ollut tutkimuksien mukaan se, että ainakin standardivalaisimilla tasaisen valotuksen aikaansaaminen on ollut vaikeaa /9/. Ratkaisuna tälle on Suomessa tutkittu liikutel-

tavaa välivalotusta, jota tällä hetkellä myös käytetään yhdellä kasvihuoneella. Liikuteltavalla välivalotuksella saadut viljelytulokset ovat olleet positiivisia, mutta tekniikka on kuitenkin melko monimutkaista. /7;16./

Ylävalon suuntaus on suurpainenaatriumvalaisimilla hoidettu erilaisilla heijastimilla. Heijastimet ovat kyllä toimiva ratkaisu valon suuntauksessa, mutta niiden ongelma on likaantuminen ja heijastuskyvyn heikkeneminen ajan kuluessa. Jos kasvihuonetilan arvioidaan olevan keskimääräistä tilaa likaisempaa (alennemakerroin 0,7), niin heijastimen likaisuudesta johtuva valaistustason alenema on 30 % vuodessa /25/. Likaantumista voidaan estää heijastimien pesulla ja vaihdolla. Heijastimien vaihto suoritetaan yleensä joka viides vuosi. Nämä toimenpiteet ovat kasvihuonetiloissa ymmärrettävästi kuitenkin melko työläitä. /51./

Verrattaessa LED-valoverhoa perinteisiin ylävaloratkaisuihin, voidaan todeta sen paremmuus kaikin puolin. Luonnonvalo pääsee yläpuolelta vapaasti kasvustoihin, eikä verholle suunniteltu rakenne kohtuullisen läpinäkyvänä juuri estä sivuiltaakaan tulevaa luonnonvaloa. Nykyisellä optiikalla LEDien valokeilaa voidaan ohjata ja kohdistaa juuri sinne missä valoa tarvitaan, eli kasvien lehdistöjen yläpinoille. Kasveille ohjautuva valo on myös tasaista, koska LEDit on sijoitettu tekstiilirakenteeseen tasavälein. Lisäksi, koska verho on asennettu matalalle, on sen puhdistus helppoa. Puhdistus voidaan materiaalien puolesta suorittaa painepesulla käyttäen lisäksi mahdollisesti joitakin mietoja pesuaineita, jotka soveltuvat kasvihuoneympäristöön (esim. mäntysuopa /51/). Tässä tulee myös huomioida, että varsinaisille heijastin- ja optiikkapinnoille ei suoranaisesti pääse edes likaa pinttymään, sillä ne sijaitsevat kaikki LED-valonauhan kumirakenteen sisällä. Puhdistettavaa osuutta on siis vain kumi, joka oikein pinnoitettuna on jo itsessään likaa hylkivää.

8.5 Valaistuksen ohjaus valotustarpeen mukaan

Nykyään on tutkittu energiansäästömielessä valotusratkaisua, jossa keinovaloa käytetään luonnonvalon lisäksi vain sen verran, että kasvien vuorokaudessa vaatima säteilysumma saavutetaan /25/. Käytössä olevan tekniikan vuoksi tällaisissa

ratkaisuissa valaisimia joudutaan monesti ohjaamaan vuorokaudessa useita kertoja päälle ja pois. Valaisin siis joko palaa tai on sammuksissa. Koska ylimääräiset sytytykset kuluttavat aina valaisimia ja lamppuja lyhentäen niiden elinikää, ei tämä ratkaisu ole taloudellisesti paras mahdollinen. Mainittakoon tässä kuitenkin vielä, että katuvalaistusjärjestelmiin ollaan parhaillaan kehittämässä myös säädettävää suurpainenatriumvalaistusta. /2/.

LEDien lähettämän säteilyn määrää (kirkkautta) on helppoa säädellä lineaarisesti syöttövirran suuruutta muuttamalla. Valoverhoa voidaan tämän vuoksi polttaa tarvittaessa vaikka läpi vuorokauden, jolloin sen lähettämää säteilytehoa vain säädetään automatiikan avulla maksimaalisen hyötysuhteen saavuttamiseksi.

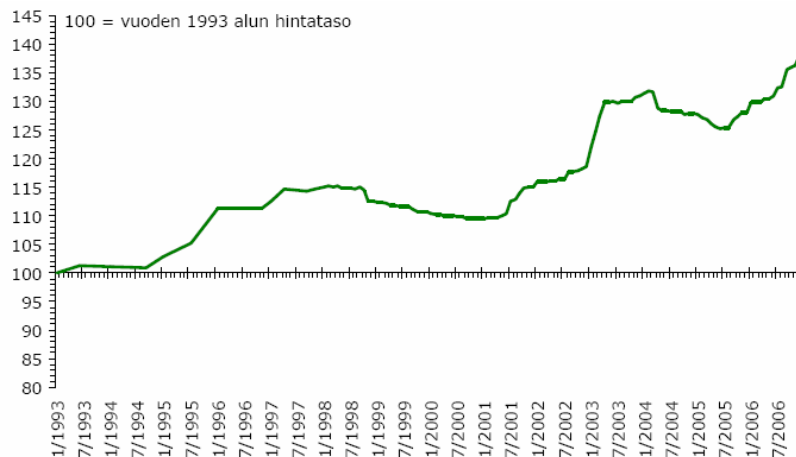
8.6 Valaistuksen huolto

Kasvihuoneissa ylävalaistukselle suoritettavat huoltotyöt ovat, ainakin kasvuston ollessa kasvamassa, melko hankalia. Kasvirivit ovat ahtaita ja korjaustyöt joudutaan kapeista käytävistä sekä valaisinten asennuskorkeudesta johtuen toteuttamaan käyttäen tikapuita tai telineitä. Työskentely on tällöin usein hidasta ja hankalaa. Valoverhon huolto on tässä mielessä paljon mielekkäämpää, sillä huolto voidaan verhon liikuteltavuuden vuoksi suorittaa aina halutulta korkeudelta. Lisäksi, kun verhon yksittäisen LED-nauhan tai LED-moduulin liitännään onnistutaan kehittämään suunnitellun kaltainen, tiivis ja luotettava pikaliitostekniikka, tulee yksittäisen nauhan uusiminen verhoon olemaan helppoa ja nopeaa.

8.7 Energianäkökulmat

Vaikka LED-valoverholla on useita hyviä puolia verrattuna perinteisiin kasvihuoneen valotusratkaisuihin, on energiansäästö kuitenkin se tärkein tavoiteltu ominaisuus. Kasvihuoneiden vuosittainen valotus kuluttaa nykyään valtavia määriä sähköenergiaa, joka ei voi jatkua enää kauan. Maailmanpolitiikkaa puhuttavat ilmastomuutos ja ympäristöasiat vaativat uusia ratkaisuja säästää energiaa ja tuottaa sitä luontoa tuhoamatta. Tämän vuoksi myös sähköenergian hinta markkinoil-

la on noussut ja nousee edelleen kiihtyvällä vauhdilla (kuva 8). Pelkästään vuoden 2005 heinäkuusta vuoden 2006 heinäkuuhun sähkönhinta nousi noin seitsemän prosenttia /5/.



Kuva 8 Sähkön kokonaishinnan kehitys 1993-2006 /27/

Suomen sähköenergian kulutuksen ennustetaan kasvavan noin kahden prosentin vuosivauhdilla /5/. Lisääntyneen keinovalotuksen vuoksi myös kasvihuoneiden sähköenergian kulutus on kasvanut Suomessa rajusti viimeisen 15 vuoden aikana. Vuonna 1991 Suomen kasvihuoneet kuluttivat sähköenergiaa 52 300 MWh, kun taas vuoden 2002 tilastoissa kulutus oli jo noin 400 000 MWh /25/. Esimerkkinä sähkökulutuksesta voidaan ottaa vaikka KKK-vihanneksen Honkajoella sijaitsevan kasvihuoneen valotusteho. Kasvihuoneen koko on 1,85 hehtaaria ja, koska viljeltävänä tuotteena on tomaatti, on valotusteho neliölle n. 180 W/m². Tällaisella valotusteholla kasvihuoneen valaistus kuluttaa vuodessa 7500 MWh sähköenergiaa. Normaalin sähkölämmitteisen omakotitalon vuosittainen sähkökulutus on noin 20 MWh. Jos ajatellaan, että LEDeillä on jo tämänhetkisen tutkimuksen valossa saavutettu samankaltaisissa kasvihuoneissa jopa 60 %:n sähköenergiansäästö, nähdään heti, että saavutettavat säästöt tulevat olemaan merkittäviä..

Suurpainenatriumvalaistuksen hukkalämmöllä, ts. -energialla, lämmitetään nykyisiä kasvihuoneita merkittäviä määriä. Tähänkin LED-sovellutukset kuitenkin tarjoavat osaltaan ratkaisun. LEDien lämmön- ja energiantuotto tulee kasvihuoneissa olemaan pienempää, kuin suurpainenatriumien, mutta kun LED-valaistus-

ratkaisuihin siirrytään, voivat kasvihuoneet alkaa tuottamaan tarvitsemansa sähköenergian itse. Tällä hetkellä on kauppapuutarhoilla lähes mahdotonta tuottaa kokonaan omaa sähkö- ja lämpöenergiaa, koska sähköntuotannosta vain neljäsosa saadaan sähköenergiana ja loput on lämpöä. Lämpöenergiaa tulee siis suhteessa niin paljon liikaa, ettei hukkalämmölle normaalitilanteessa löydy järkevää käyttöä. /25./ Lisäksi paikallistuotannolla säästytään energian turhalta siirrolta, niin lämmön kuin sähkönkin osalta. LED-valaistus ei myöskään rasita verkkoa loisteholla toisin kuin suurpainenatriumvalaistus.

8.8 Muut ympäristövaikutukset

Kasvihuoneiden valaistuksella ja valonkäytöllä on runsaasti ympäristöhaittoja, joista kaikkia ei varmasti vielä edes tunneta. Merkittävimpänä, puhtaasti valaistuksen aiheuttamana ympäristöhaittana pidetään tällä hetkellä valosaastetta. Tämän luvun alla käsitelläänkin erityisesti valosaastetta ja sen aiheuttamia haittavaikutuksia. Lisäksi käydään hieman läpi materiaalien ja lamppujen kierrätykseen liittyvää asiaa.

8.8.1 Valosaaste

Valon on todettu olevan hyvä parannuskeino esimerkiksi kaamosmasennukseen. Valo kuitenkin säätelee myös ihmisen biologista kelloa ja viimeaikaisten tutkimusten mukaan turha, häiritsevä valo, valosaaste, on peräti haitallista elimistölle. Yöaikaisella valosaasteella saattaa jopa olla yhteyksiä naisten lisääntyneisiin rintasyöpädiagnooseihin. /13/. Työterveysmääräyksissä on annettu ohjeistuksia työtilojen valaistuksen minimimääristä, mutta liian voimakkaasta valosta ei ole mainintoja. /25/.

Valosaasteella tarkoitetaan kasvihuoneympäristöissä sitä valoa, joka kasvivalotuksesta karkaa kasvihuoneen ulkopuolelle ja häiritsee näin muuta lähiseudun elämää ja asutusta (kuva 9). Valon haitallisuuteen vaikuttaa sen voimakkuus, väri ja heijastukset. Suomessa kasvihuoneyritykset ovat hajautuneet siten, että suuria

kasvihuonekeskittymiä ei ole ja näin ollen valotuksestakaan ei meillä ole vielä aiheutunut merkittäviä haittoja. Suomessa ei olekaan valosaasteen liialliselle määrälle vielä toistaiseksi annettu ohjearvoja, vaan viihtyvyyden aleneminen ja mahdolliset haittavaikutukset on mietittävä aina tapauskohtaisesti. Toisin on kuitenkin esimerkiksi Hollannissa ja Kanadassa, joissa valosaaste on jo osoittautunut suureksi ongelmaksi. Kanadassa, British Columbian provinssissa, on valosaasteen vähentämiseksi annettu suosituksia jotka edellyttävät, että kasvuvalotus on rajattava alle 5000 luksiin tai se on sammutettava kello 18.00 jälkeen vähintään neljäksi tunniksi. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että ainakin kasvihuonevihannesten viljelijät joutuvat sammuttamaan valonsa, koska vihannekset vaativat normaalisti yli 5000 luksin valaistusvoimakkuutta kasvuvalotuksessa. /8;15;25./



Kuva 9 Kasvihuoneet ovat merkittäviä valosaasteen lähteitä /47/

Nykyisten valaistusratkaisujen kohdalla valosaasteen vähentämiseksi on muutamia keinoja. Edullisin ratkaisu vähentää valosaastetta on kallistaa kasvihuoneen reunimmaisista valaisinriveistä kasvihuoneen keskiosaa kohti. Tällä voidaan rajoittaa hajasaäteilyä ainakin jonkin verran. Toinen, yleisesti Suomessa käytössä oleva keino on käyttää verhoja, jotka voidaan levittää kasvuvalotuksen ajaksi kasvihuoneen kattoon ja näin estää säteilyn pääseminen kasvihuoneen ulkopuolelle. Verhojen ongelmana on vielä nykyäänkin kuitenkin se, että ne saattavat nostaa niiden

alapuolella olevan kasvuston lämpötilan ja kosteuden liian suureksi. Kolmantena vaihtoehtona on kiinnittää valoa läpäisemätön muovi sille seinäosuudelle, jonka läpi valon säteilyä halutaan vähentää. /25./

Nyt kun tarkastellaan LED-valoverhoratkaisua valosaasteen vähentämisen kannalta, havaitaan sen olevan pelkästään hyvä vaihtoehto. LED-valoverhon läheltä valaisevat, tarkasti kasveille suunnatut ja matalalle sijoitetut valokeilat eivät juuri heijastele ylimääräistä valoa ulospäin. Lisäksi valon spektrin ollessa enemmän punaisen ja sinisen valon alueella, ei valo ole niin häiritsevää ihmissilmälle. LED-valoverhon kanssa ei myöskään tarvittaisi valoverhoja valosaasteen estämiseksi, jolloin kosteuden ja lämmönsäätelyn kanssa ei tulisi ongelmia ainakaan valotuksen takia.

8.8.2 Materiaalien kierrätys, päästöt

Tämän päivän maailmassa on enenevässä määrin tarkasteltava tuotteen elinkaarta myös sen aiheuttamien ympäristösaasteiden ja -päästöjen kannalta. Tuotetta suunniteltaessa on huomioitava kierrätysmahdollisuudet, energiataloudellisuus ja tuotteen aiheuttamien ympäristörasitusten minimointi. LED on itsessään siitä hyvä tuote, ettei se sisällä ongelmajätettä ja on siksi helposti kierrätettävissä oleva komponentti /3/. Muuten valoverho on myös täysin kierrätettävissä, onhan kumia, metallia ja erilaisia tekstiilejä uusiokäytetty jo kauan. Edellä mainittujen syiden vuoksi LED-valoverho on päästöiltään melko ympäristöystävällinen. Suurpainenaatriumlamput ja valaisimet ovat kuitenkin nykyään myös melko hyvin kierrätettäviä, joten tässä suhteessa ei merkittäviä eroja LED-valoverhoon ilmene.

8.9 LED-valoverhon ja suurpainenaatriumvalaistuksen kustannukset kasvihuonekäytössä

Jos huomioidaan energiankulutuksen ja valaisinhuollon hinta 10 vuoden periodilla, voidaan suurpainenaatriumille ja LEDille laskea jonkinlaisia suuntaa antavia lukuja niiden käyttökustannuksista. Otetaan taas esimerkiksi Honkajoen KKK-vihanneksen 1,8 hehtaarin kasvihuone. Tiloissa on yhteensä 6400 suurpainenaatri-

umvalaisinta ja vuosittainen valaistuksen kuluttama sähköenergia on noin 7500 MWh. Oletetaan, että LEDeillä sähkönkulutus on puolet suurpainenatriumien kulutuksesta, koska kuten edelläkin on jo mainittu, on niillä päästy kasvihuoneissa jopa 60 % sähköenergiansäästöön /8/. Energianhinta on tällä hetkellä noin 7,22 s/kWh (keskisuuren teollisuuden keskiarvo 1.9.2006) /43/. Suurpainenatriumlamppun hinta on n. 20 €/kpl, heijastimen hinta sama /51/. Lamppujen vaihto suoritetaan 3 vuoden ja heijastimien 5 vuoden välein. Huoltotyölle ei ole laskettu hintaa. Taulukosta 1 voidaan havaita huomattavat erot pelkissä käyttökustannuksissa LED- ja suurpainenatriumratkaisujen välillä. Tosin on huomioitava, että suurpainenatriumvalaisimia ei tarvitse uusida 10 vuoden välein, kun taas LED-valoverho on suunniteltu 10 vuoden käyttöperiodille.

Taulukko 1 Suurpainenatriumlamppuvalaistuksen ja LED-valoverhon käyttökustannusten vertailu nykyisellä sähköenergian hinnalla

Lamppujen poltto n.3000 h/a		Kulutus LED, 3250 MWh/a
Kulutus HPS, 7500 MWh/a	Suurpainenatrium	LED
Val.kul. sähköenergia/10v	541 500,00 €	234 650,00 €
Lamppujen vaihto/3v välein (3.kertaa)	384 000,00 €	-
Heijastimien vaihto/5v välein (1 kerta)	128 000,00 €	-
Yhteensä (10v käyttö)	1053 500,00 €	234 650,00 €

Tarkempaa vertailua LEDien ja suurpainenatriumlamppujen kustannuseroista ei tämän selvityksen aikana voitu toteuttaa. Tarkempaa vertailua ajatellen tulee ensin selvittää toimivan LED-valoverhon valmistuksen metrikustannus, jonka jälkeen uudet laskelmat voidaan suorittaa. Tulevissa laskelmissa tulee selvittää erityisesti suurpainenatriumvalaisinten ja LED-valoverhon valmistus- ja asennuskustannusten ero. Näissä laskelmissa tulee huomioida myös suurpainenatriumvalaisinten pidempi käyttöikä, jonka jälkeen voidaan arvioida LED-valoverhon taloudellisuus LEDien nykyisessä kehitys- ja markkinatilanteessa.

Mainittakoon suurpainenatriumvalaisinten kustannuksista tässä kuitenkin vielä sen verran, että esimerkiksi KKK-vihanneksen 1,8 hehtaarin tarhalla valaisimia on yhteensä 6400 kpl ja valaisinyksikön hinta on noin 70 €. Valaisinten hankin-

takustannus on siis ollut kasvihuoneeseen yhteensä noin 450 000 €. Tarhoilla on tomaattikasvi-linjaa 12 km, joka tarkoittaisi LED-valoverhon kohdalla 24 km LED-valaisinlinjan rakentamista.

9 MARKKINAT TUOTTEELLE SUOMESSA JA MAAILMALLA

Valoviljelyä harjoitetaan laajalti niin Suomessa, kuin myös ympäri maailmaa (luku 5). Kiristyvän ympäristö- ja energiapolitiikan vuoksi myös valoviljely on koko ajan tarkkailun alla ja uusia, tehokkaampia valotusvaihtoehtoja etsitään jatkuvasti. Kuten jo luvussa 4.4 mainittiin, LED-sovellutuksien uskotaan tarjoavan seuraavan 5 - 10 vuoden kuluessa ratkaisun myös näihin kasvihuoneiden keinovalotuksen ympäristö- ja energiakysymyksiin /8/. LED-valoverhoratkaisun onnistuessa sille onkin maailmalla laajat markkinat avoinna. Näitä markkinoita lähdettiin selvittämään muutamien valoviljelyä harjoittavien maiden kohdalta. Selvityksen teki tutkimusryhmän toimeksiannosta Finpro ry, joka suoritti tiedonhankinnan Ruotsin, Norjan, Tanskan, Kanadan ja Japanin osalta. Suomen tilastot ja valoviljelyn eri tiedot on hankittu Kauppapuutarhaliitosta. Selvitykseen kerättiin tiedot kohde- maissa toimivien valoviljelyä harjoittavien yritysten lukumäärästä, viljelypinta- alasta ja viljeltävistä kasveista.

9.1 Markkinat Suomessa

Kuten jo luvussa 5.1 mainittiin, on Suomessa ammattimaiseen viljelyyn käytettäviä lämmitettäviä kasvihuoneita 430 hehtaaria. Lämmitetyissä kasvihuoneissa käytetään myös lähes poikkeuksetta lisävalotusta. Tomaatin ja kurkun ympärivuotiseen valoviljelyyn on näistä lämmitetyistä kasvihuoneista valjastettu tällä hetkellä 40 hehtaaria kasvihuone pinta-alaa. Lisäksi myös ruukkuvihannesten ja leikkosekä ruukkukukkien tuotanto on monissa yrityksissä ympärivuotista. /32./

9.2 Markkinat Pohjoismaissa, Kanadassa ja Japanissa /15/

Pohjoismaiden merkittävimmät kasvihuonemarkkinat ovat Tanskassa. Viljelypinta-alat ovat: Tanskassa 500 hehtaaria, Ruotsissa 275 hehtaaria ja Norjassa 200 hehtaaria. Energian säästö on tärkeä keskustelunaihe. Korkeat energiakustannukset ovat vähentäneet alan yrityksiä ja pakottaneet siirtymään yhä suurempiin tuotantoyksiköihin. Keinovalon käyttö vaihtelee 2 kuukaudesta koko vuoteen.

Kanadassa kasvihuoneviljelmää on kaikkiaan 2000 hehtaaria 3425 kasvihuoneessa. Kukkien viljelijöiden lisäksi myös vihannesten viljelijät ovat alkaneet käyttää keinovaloa. Keskimääräinen valotusaika vuodessa on noin 7 kk. Kukkien kasvatuksen osuus on Kanadassa 55 % ja vihannesten osuus 45 %. British Columbian provinssin suositukset edellyttävät, että viljelijät rajoittavat valosaasteen alle 5000 luksiin tai vaihtoehtoisesti sammuttavat valaistuksen muutamaksi iltatunniksi.

Japanissa kasvihuoneiden viljelyala on 52 300 hehtaaria. Japanissa ei harjoiteta ympärivuotista kasvihuoneviljelyä normaaleissa kasvihuoneissa johtuen kuumasta kesästä, vaan tuolloin viljelyksessä on 2 - 3 kk tauko. Japanissa luonnonvalon määrä ei ole ongelma, koska pääviljelyalueet sijaitsevat Ateenan korkeudella. Keinovaloa kuitenkin käytetään seuraavilla kasveilla (suluissa viljelypinta-alat): Krysanteemi (3200 ha), tomaatti (7300 ha), mansikka (5200 ha) ja pinaatti (5300 ha).

10 YHTEENVETO, LED-VALOVERHON SWOT-ANALYYSI JA LOPPUPÄÄTELMÄT

LED-Valoverhon SWOT-analyysi

Huom. ”Strenghts-Vahvuudet” kohdassa on LED-valoverhon vahvuudet luetteloitu vasemmassa sarakkeessa. Oikealla puolella on vertailun vuoksi esitetty suurpainenatriumlampun vastaavat ominaisuudet.

LED-Valoverho Strenghts-Vahvuudet	Suurpainenatriumlamppu Tekniikan vertailu
+Käytössä olevissa, LED-valotetuissa kasvihuoneissa on päästy jopa 60 % sähköenergiensäästöön verrattaessa normaaliratkaisuihin /8/.	
+ Kasveille voidaan LEDeillä luoda helposti kasvulle optimaalisin valon spektrijakauma (sininen/punainen valo) /8/.	-Valon spektri on kasville epäedullinen, jopa 93 % valosta muuttuu hukkalämmöksi /25/
+ LEDillä on pitkä polttoikä, jopa 100 000 tuntia /3/.	- HPS:n polttoikä kasvihuonekäytössä on n. 8000 tuntia /25/.
+ Pintaliitosledeillä valovirran alenemaa ei tapahdu ainakaan ensimmäiseen 15 000 käyttötuntiin /14/.	-Valovirta alkaa laskemaan tasaisesti heti lampun käyttöönoton jälkeen /23/.
+LED-valoverho on 10 vuoden käyttöperiodilla huoltovapaa (ei huollettavia osia).	-Suurpainenatriumvalaistukseen joudutaan 10 vuoden aikana vaihtamaan lamput n. 3 kertaa ja heijastimet kerran. /51/
+ Viimeaikoina julkaistujen valkoisen valon LEDien valotehokkuus jo 150 lm/ W /40/. (huom. valotehokkuus ihmissilmän spektriherkkyydellä painotettu suure, kasvien spektri poikkeava)	-Suurpainenatriumlampun valotehokkuus on maksimissaan n. 140 lm/W /23/ (huom. valotehokkuus ihmissilmän spektriherkkyydellä painotettu suure, kasvien spektri poikkeava)
+LEDistä hukkalämpö poistuu johtamalla, joten se voidaan asentaa lähelle kasveja /49/.	-Suurpainenatriumlampun hukkalämpö poistuu säteilemällä, säteily polttaa kasvit helposti /51/.
+LEDin rakenteeseen on helppoa integroida erilaisia heijastimia ja optiikkaa /48/	-Valaisimet tarvitsevat erilliset heijastimet, jotka on vaihdettava tietyin väliajoin /51/
+Puhdistus ja huolto helppoa, koska verhon suojausluokitus on IP 68 /39;48/. Lisäksi verho on asennettu matalalle.	-Puhdistus ja huolto hankalaa, koska valaisimet on asennettu korkealle. Toimenpiteisiin tarvitaan telineet avuksi.
+LED-valoverhon kirkkauden säätö ja ohjaus valotustarpeen mukaan on helppoa /48/.	-Suurpainenatriumlampun kirkkauden säätö on nykyjärjestelmillä hankalaa. Jatkuvat valaistuksen kytkennät kuluttavat laitteistoja.

Strengths-Vahvuudet

- +Suunnattavuuden ja asennusmahdollisuuksien vuoksi LED ei tuota juurikaan valosaastetta. Sininen- ja punainen valo ei muutenkaan ole häiritsevää silmälle.
- +Toimii matalalla käyttöjännitteellä, joten antaa vapauksia rakenteen suunnittelussa /3/. Turvallinen ratkaisu.
- +LEDit eivät rasita verkkoa induktiivisella loisteholla /51/.
- +LED-valaistuksen käyttö tasapainottaisi valaistuksen kuluttamaa sähköenergiaa niin, että paikallisen sähkön tuotanto olisi mahdollista ja järkevää.
- +Tutkimuksissa LED-valolla kasvatettujen lehtisalaattien saavuttama biomassa on ollut suurempi kuin suurpainenatriumin valossa kasvatettujen /8/.
- +LEDit eivät sisällä ongelmajätteitä, joten ne ovat tältäkin osin ympäristöystävällisiä /3/. Verhon materiaalit ovat yleisesti helposti kierrätettäviä.
- +LEDit eivät säteile ihmisille ja kasveille haitallista UV-säteilyä, toisin kuin jotkin purkauslamput /36/.

Weaknesses-Heikkoudet

- LEDin valo on koherenttia, joten sen taajuusalue on kapea. Eri kasvit tarvitsevat kasvaakseen eritaajuisia valon aallonpituuksia, mutta tutkimus on vielä pahasti kesken /49/.
- Nykyisin markkinoilla olevien LEDien valotehokkuus on vielä liian heikko /49/.
- LEDin tämänhetkinen hinta (tuotettu valo ja käyttötuntimäärä/ kustannukset) on vielä melko korkea verrattuna muihin valonlähteisiin /24/.
- LED-tuotteilta puuttuu vielä nykyään standardointi /24/.
- LEDeillä on jo nyt suuri pintakirkkaus eli luminenssi /35/, joka saattaa tulevaisuudessa aiheuttaa terveystriskejä.
- LEDien syötössä yleisesti käytetyt hakkurivirtalähteet saattavat aiheuttaa verkkoon harmonisia yliaaltoja.

Tekniikan vertailu

- Valosaaste on suuri ongelma ympäri maailmaa niin kasvihuoneympäristöissä kuin muuallakin /8;25;15/.
- Normaali verkkojännitteellä toimiva valaistusratkaisu, jolla on tiukemmat rakenne- ja turvamääräykset /51/.
- Suurpainenatriumit ovat purkauslamppuja, joiden kuluttama loisteho aiheuttaa ylimääräistä rasiutusta verkossa.
- Suurpainenatriumlamput tuottavat lämpöä ja kuluttavat sähköenergiaa niin paljon, että paikallinen sähköntuotanto ei ole järkevää, koska lämpöenergiaa menee hukkaan /25/.

Opportunities-Mahdollisuudet

- *Onnistuessaan tarjoaa energiatehokkaan ja ympäristöystävällisen keinovalotusratkaisun.
- *Kasvihuoneissa ympäri maailman panostetaan nyt energiatehokkuuteen. Mahdolliset markkinat ovat tuotteen onnistuessa laajat.
- *LEDien odotetaan olevan kasvihuonekäytössä viimeistään 5 - 10 vuoden kuluessa, viimeaikaisten kehitysharppausten vuoksi jopa aikaisemmin /8;49/.
- *Valoverhon markkinat saattavat laajentua muillekin aloille, jos valoverho ratkaisee myös valosaasteongelman /15/.

Threats-Uhat

- *LED-valaistusta kehitetään jo ympäri maailmaa, joten kilpailevia tuotteita saattaa olla tulossa markkinoille.
- *Jos standardoinnin luominen viivästyy, saattaa valmistajien mielenkiinto LED-sovellutuksia kohtaan heikentyä /24/.

Yhteenveto ja loppupäätelmät

Edellä olevasta SWOT-analyysin, tutkintotyön aikana tehtyjen haastattelujen ja hankitun tiedon perusteella voidaan todeta, että tässä selvityksessä tarkastellun LED-valoverhoidean hyödyt ovat merkittäviä verrattuna perinteisiin kasvihuoneiden keinovalotusratkaisuihin. Tämän vuoksi LED-valoverhon tekninen kehitys tulee aloittaa mahdollisimman ripeällä aikataululla. LED-tekniikan kehitys on tällä hetkellä niin kiihvasta, että seuraavan 10 vuoden sisällä LEDit tulevat syrjäyttämään useimmat perinteisistä valaistusratkaisuista. Suomessa LEDien tutkimus- ja kehitystoiminta on maailman huipputasoa, joten lähtökohdat LED-valoverhon kehittämiseksi täällä ovat erinomaiset. Jos valoverhosta saadaan kehitettyä luotettava ja tehokas keinovalotusratkaisu kasvihuoneisiin, sille on maailmalla tiedossa laajat markkinat. Valoverhon markkinointivaltteina tulevat olemaan erityisesti energiansäästöominaisuudet ja ympäristöystävällisyys.

Suomessa LED-valoviljelytutkimusta tehdään erityisesti TKK:lla, mutta lisäksi LED-valotusta tutkitaan paljon ympäri maailmaa. Tutkimustietoa on runsaasti tarjolla ja sitä pystytään tarvittaessa hankkimaan yhteistyökumppaneiden avulla helposti lisää. Sen vuoksi ei varsinaiseen kasvien spektritutkimukseen tulisi tämän selvityksen perusteella tuhlaata suuria resursseja, vaan keskittyä enemmän valoverhon perusrakenteen ja -tekniikan kehittämiseen. Kun nämä asiat ovat kunnossa, on valoverhon ominaisuuksia yhteistyökumppaneiden tutkimuksen edessä ja LED-tekniikan kehittyessä helppoa päivittää.

Tämän selvityksen perusteella tullaan lähiaikoina tekemään kehitysrahoitushakemukset tuotteen kehittämiseksi ja sen saattamiseksi markkinoille. Patenttihakemus tuoteidean suojaamiseksi on jo käsittelyssä

Ensimmäisinä toimenpiteinä mahdollisen kehitysprojektin alkaessa on yhteistyökumppaneiden kanssa ryhdyttävä selvittämään erilaisin mittauksin, testauksin ja tutkimuksin niitä tämän selvityksen aikana mainittuja asioita, joihin ei vielä ole saatu vastauksia. Näitä asioita ovat erityisesti valoverhon suurpiirteisen markkinahinnan selvittäminen (€ / m), verhon syöttötehon (tarvittavien LED-lamppujen

määrän) selvittäminen (W / m), LEDien valovirran aleneman selvittäminen pitkällä aikavälillä ja eri kasvien vaatimien valon taajuuksien lisäselvitykset. Lisäksi erityisesti työterveyden kannalta tulee selvittää LED-valoverhon pintakirkkauden mahdollisesti aiheuttamat haittavaikutukset, riittävän työskentelyvalaistuksen saavuttaminen ja olemassa olevat, luotettavat liitostekniikat verhon LED-nauhojen liittämiseksi verhon yläpään syöttöväylään. Kun edellä mainitut asiat on saatu selvitettyä, voidaan olettaa että ollaan tilanteessa, jossa on hankittu riittävästi tietoa toimivan prototyypin luomiseksi. Tämän jälkeen voidaan aloittaa varsinaiset kenttäkokeet. Ainakin KKK-Vihannes Oy Honkajoelta on ilmoittanut halukkuutensa vuokrata tarvittaessa kehitysprojektin käyttöön kasvihuonetilaa valoverhotutkimuksia varten.

LÄHDELUETTELO

Painetut lähteet

- 1 Adamsson, Virpi. "Salon katuvalaistus siirtyy led-aikaan?". Kuntatekniikka 1/2007, s. 24 - 25.
- 2 Eloholma, Marjukka, TKK Valaistuslaboratorio. "Älykäs tievalaistus säästää energiaa turvallisuudesta tinkimättä". Tekniikka ja Kunta 8/2006, s. 34 - 36
- 3 Halonen, Liisa, "LED-valaistusjärjestelmä lähellä läpimurtoa". Seminaarimoniste 2003. TKK:n valaistuslaboratorio.
- 4 Heikkinen, Veli. VTT "Edessämme loistava tulevaisuus – Ledit tulevat". esselloo, SLO-Asiakaslehti 1/2007, s. 28 - 29.
- 5 Kallonen, Tapio. "Sähkön kokonaiskulutus kasvaa". Sähkömaailma helmikuu/2007, s. 14.
- 6 Kasvihuoneviljelijän energia- ja ilmasto-opas. Gaia Group Oy, lokakuu 2005.
- 7 Kokousmuistio. Talviviljelyn kehittämishanke, kurkunviljelijöiden hankeryhmä. Kauppapuutarhaliitto 7.1.2003
- 8 Leino, Raili. "Salaatti rakastaa LED-valoa". Tekniikka & Talous 13.10.2005.
- 9 Murmann, Tom. "Valitse valaisin viisaasti". Puutarha & kauppa 6/2005, s. 30.
- 10 Murmann, Tom. "Miten kasvihuonetuotanto voi kehittyä?". Puutarha & kauppa 6/2006, s. 24 - 25.
- 11 Purhonen, Antti. "Keittiössä valaistus on valonlähdettä tärkeämpi". Rakennusmaailma 1/2007, s. 34 - 37.

- 12 Rantanen, Kalevi. ”Palkitut ledit syntyivät sisulla ja tuurilla”. Tiede-lehti 6/2006, s. 16 - 23.
- 13 Ruukki, Jukka. ”Valosta syöpää”. Tiede 6/2003.
- 14 Schubert, E. Fred. Light-emitting diodes. Cambridge University Press. Cambridge 2003.
- 15 Selvitys valoviljelymarkkinoista maailmalla, Finpro, joulukuu 2006
- 16 Soini, Marianna. ”Valot väliin ja liikkeelle”. Puutarha & kauppa 6/2006, s. 10 - 11.
- 17 Standardi SFS-EN 60204-1. Koneturvallisuus, Koneiden sähkölaitteisto. Suomen sähkö- ja elektroniikka-alan kansallinen standardisoimisjärjestö SESKO Ry.
- 18 Standardi SFS-EN 12464. Valo ja valaistus, työkohteiden valaistus. Suomen sähkö- ja elektroniikka-alan kansallinen standardisoimisjärjestö SESKO Ry.
- 19 Standardi SFS 6000-7-705. Maa- ja puutarhatalouden laitteistot, kohta 705.512. Suomen sähkö- ja elektroniikka-alan kansallinen standardisoimisjärjestö SESKO Ry.
- 20 Standardi SFS 6000-7-705. Maa- ja puutarhatalouden laitteistot, kohta 705.532.2. Suomen sähkö- ja elektroniikka-alan kansallinen standardisoimisjärjestö SESKO Ry.
- 21 Suomen valoteknillinen seura. ”Valonlähteet: Missä mennään – LED?”. Valolehti 2/2004.
- 22 Tetri, Eino. ”Modular LED-PLC Lighting System”. Annex 45 Energy Efficient Electric Lighting for Buildings, E³Light, Biannual Newsletter 2/2005, s. 4.

- 23 Tuote-esite, kasvihuonesuurpainenatriumlamppu MASTER Agro 400W E40 SLV, Philips
- 24 Wilfried, Pohl - Tetri, Eino. "Luminaires with LEDs". Annex 45 Energy Efficient Electric Lighting for Buildings, E³Light, Biannual Newsletter 1/2006, s. 4.
- 25 Äystö, Hannu - Rahkola, Mikko. Kasvihuoneyrittäjän ympäristöopas. Kauppapuutarhaliitto. Helsinki 2004.

Sähköiset lähteet

- 26 Adlux Oy, julkaisut, Kirkasvalohoito ja silmien turvallisuus.
<http://www.adlux.fi/public/tyo/sinisensvalonhaitta.html> [Viitattu 10.01.2007]
- 27 Energiamarkkinavirasto. <http://www.energiamarkkinavirasto.fi>
[Viitattu 16.12.2006]
- 28 Hebei I.T Co. <http://www.hebeild.com.cn/?p=led.diode> [Viitattu 14.1.2007]
- 29 Herkelrath, Megan - Laksberg, Alina - Woods, Liila. "A Brighter Future: Advances in LED Energy Efficient Lighting Technology". University of Washington 3.6.2005.
<http://depts.washington.edu/poeweb/gradprograms/envmgt/2005symposium/LEDProjectReport.pdf> [Viitattu 12.3.2007]
- 30 Howstuffworks, How Light Emitting Diodes Work.
<http://electronics.howstuffworks.com/led2.htm> [Viitattu 12.03.2007]
- 31 Karl Mayer Textilmaschinenfabrik. www.karlmayer.com [Viitattu 13.01.2007]
- 32 Kauppapuutarhaliitto Ry. www.kauppapuutarhaliitto.fi [Viitattu 15.12.2006]

- 33 Kim, HH - Wheeler, RM - Sager, JC - Yorio NC - Goins GD. "Light-emitting diodes as an illumination source for plants: a review of research at Kennedy Space Center".
http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&list_uids=15751143&dopt=Citation [Viitattu 27.03.2007]
- 34 LEDs Magazine, June 2006.
<http://ledsmagazine.com/articles/features/3/6/3/1> [Viitattu 09.10.2006]
- 35 LEDs Magazine, June 2006. <http://ledsmagazine.com/articles/news/3/6/23/1>
[Viitattu 14.01.2007]
- 36 Led PlantBar Research Lab Report, Technology Comparison.
http://www.ledtronics.com/ds/plantled/LED_Plant-Bar_Technology_Comparision.pdf [Viitattu 6.1.2007]
- 37 LGL Technologies, Inc. www.ledgrowlights.com [Viitattu 3.1.2007]
- 38 Maa- ja elintarviketeollisuuden tutkimuskeskus, MTT. www.mtt.fi [Viitattu 3.1.2007]
- 39 MTG-Engineering Ltd. www.mtg.fi [Viitattu 09.10.2006]
- 40 Nikkei Business Publications, Inc. Uutinen 21.12.2006 16:39.
http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20061221/125713/
[Viitattu 04.01.2007]
- 41 Opetusmoniste. Ledien käyttö valaisimina. Oulun yliopisto, Elektroniikan laboratorio.
http://www.electronics oulu.fi/Opetus/OE/Ledien_k%EA4ytt%F6_valaisimina_2.pdf [Viitattu 12.2.2006]

- 42 Oy OSRAM Ab, lamppuopas, hehkulamput.
<http://www.osram.fi/guide/hehkulamput.shtml> [Viitattu 18.12.2007]
- 43 Tilastokeskus, sähkön hinta kuluttajatyypeittäin.
http://www.stat.fi/til/ehkh/2006/03/ehkh_2006_03_2006-12-20_tau_008.xls
[Viitattu 20.12.2006]
- 44 TKK:n tutkimus: LED-based Lighting System for Plants Illumination (2004-2006). <http://lightinglab.fi/research/national/LEDplant/index.html>
[Viitattu 09.10.2006]
- 45 Työterveyslaitos, ionisoiva ja ionisoimaton säteily.
<http://www.ttl.fi/Internet/Suomi/Aihesivut/Tyohygienia/Sateily+ja+valaistus/>
[Viitattu 14.01.2007]
- 46 Digital Color Solutions Co.
<http://www.colorvision.com/images/greenscanarticle1.jpg> [Viitattu 16.04.2007]
- 47 Vildaphoto.net. <http://www.vildaphoto.net/photo.php?id=4698>
[Viitattu 13.12.2007]

Asiantuntijalausunnot

- 48 Hajatsalo, Leo, Managing Director- Rinko, Kari, Director (Industrial R&D).
Haastattelu 3.11.2006. MTG-Engineering Ltd. Helsinki.
- 49 Halonen, Liisa, professori. Haastattelu 3.11.2006. Teknillinen korkeakoulu,
valaistuslaboratorio. Helsinki.
- 50 Honkiniemi, Martti, insinööri, päätoiminen tuntiopettaja. Haastattelu 17.1.2007.
Tampereen ammattikorkeakoulu. Tampere.

- 51** Selvityksen projektiryhmä, keskustelut ja palaverit 19.10.2006 – 31.1.2006.
Kivioja, Esa, yrittäjä. KKK-Vihannes Oy.
Piikkilä, Veijo, DI, Lehtori. Tampereen ammattikorkeakoulu.
Heinola, Juha, DI, Koulutuspäällikkö. Tampereen ammattikorkeakoulu.
Horppu, Matti, Insinööri, Lehtori. Tampereen ammattikorkeakoulu.
Kallioharju, Kari, Sähköasentaja, Opiskelija. Tampereen ammattikorkeakoulu
- 52** Tahvonen, Risto, professori - Särkkä, Liisa, vanhempi tutkija. Haastattelu
31.10.2006. MTT kasvintuotannon tutkimus, puutarhatuotanto. Piikkiö.