

Lauri Turunen & Kari Mönkkönen (toim.)



LedTrix - Led-tekniologian osaamispankki

Loppuraportti





LedTrix - Led-tekniologian osaamispankki

Loppuraportti

Lauri Turunen & Kari Mönkkönen

Julkaisusarja

C: Raportteja, 17

Vastaava toimittaja

Kari Tiainen

Sivuntaitto

Kaisa Varis

Kansikuva

Manu Eloaho/Mamk

© Tekijät ja Karelia-ammattikorkeakoulu

Tämän teoksen osittainenkin kopiointi on tekijänoikeuslain mukaisesti kielletty ilman nimenomaista lupaa.

ISBN 978-952-275-128-7

ISSN-L 2323-6914

ISSN 2323-6914

*Julkaisujen myynti
ja jakelu*

Karelia-ammattikorkeakoulu
julkaisut@karelia.fi
tahtijulkaisut.net

Joensuu 2014

Sisällys

1 Alkusanat	7
2 Tausta	8
3 Tavoitteet ja tulokset	9
4 Ledien kiihdytetty elinikätestaus	10
4.1 Testiympäristön suunnittelu	10
4.2 Piirilevysuunnittelu	12
5 Ledien valovirtamittaukset	14
5.1 Mittausten kulku	14
5.2 Testatut ledit	14
5.3 Valovirtamittausten tulokset	15
5.4 Ledien suhteellisen valonvoimakkuuden muuttuminen	20
5.5 Standardin mukaisen laskentamallin analysointi	27
5.6 BTS 256 -led-testerin kalibroinnin muutoksen vaikutukset mittaustuloksiin	29
6 Pinnoittaminen	32
6.1 Suojapinnoituksen hyödyt	32
6.2 Suojausmenetelmät	32
6.3 Markkinoilla olevat pinnoitteet	33
6.4 Pinnoituslaboratorio ja led-levyjen pinnoittaminen eri testipinnoitteilla	34
6.5 Pinnoitteiden ikäännyttäminen ympäristörasitustesteillä	35
6.6 Pinnoitettujen led-levyjen visuaalinen tarkastus	35
6.7 Pinnoitteiden kovuus ja tarttuvuus piirilevyyn	37
6.8 Ympäristörasitustestien jälkeen havaittu hapettuminen	39
6.9 Optiset mittaukset ennen ympäristörasitustestejä ja niiden jälkeen	41

7 Lämmönhallinta	42
7.1 Lämpösimulointi led-piirilevyllä	42
7.2 Lämpöä johtavan muovin testaus	45
7.3 Lämpöputken testaus	50
8 Led-lamppujen päälle-pois -testaus	53
8.1 Led-lamppujen päälle-pois -testauksen tulokset	55
Liitteet	56
Liite A. TM-21:n mukainen raporttitaulukko (soveltuvin osin)	
Liite B. Ledin lämpötilan määrittäminen NTC-vastuksen avulla	
Liite C. RF-häiriömittaukset	

1 Alkusanat

Tämä julkaisu on Ledtrix – Led-teknologian osaamispankki -hankkeen loppuraportti. Hanke toteutettiin vuosina 2010–2014. Hanketta rahoittivat Innovaatorahoituskeskus Tekesin (Euroopan aluekehitysrahasto EAKR) lisäksi tutkimusosapuolet sekä yritykset. Hanke toteutettiin kolmena rinnakkaishankkeena, joissa tutkimusosapuolina olivat Karelia-ammattikorkeakoulun Liiketalouden ja tekniikan keskus, Itä-Suomen yliopiston fysiikan ja matematiikan laitos sekä Mikkelin ammattikorkeakoulu (30.3.2013 asti Elektroniikan 3K-tehdas). Yrityksistä yhteistyökumppaneina mukana olivat Realpast Oy, Savled/Diranet Oy ja Teknoware Oy.

Raportissa esitellään aluksi hankkeen taustaa ja sen jälkeen hankkeen aikana tehtyjä tutkimuksia, kuten ledien kiihdytetyn elinikätestauksen testiympäristön suunnittelua, ledien lämmönhallintaa, pinnoitteiden olosuhdetestausta ja häiriömittauksia.

2 Tausta

Ledien käyttö on yleistynyt valaistuksessa niiden energiatehokkuuden ansioista, ja ne ovat korvaamassa Euroopan alueella perinteiset valaisuratkaisut. Ledien käyttöä tukee EU:n säätämä ns. hehkulamppudirektiivi. Sen mukaan hehkulamput ja muut paljon sähköä kuluttavat lamput poistuvat vaiheittain 1. syyskuuta 2009 alkaen vuoteen 2016 mennessä. Korvaavia tuotteita ovat energiansäästölamput, halogeenilamput ja ledit.

Ledit ovat kehittyneet suuresti viime vuosina, ja tulevaisuudessa ne korvaavat vähitellen perinteisiä hehkulanka- ja halogeenivalonlähteitä. Ledien hyviä ominaisuuksia ovat niiden pieni koko, pitkä käyttöikä ja hyvä hyötysuhde. Hyvä hyötysuhde perustuu siihen, että ledien tuottama säteily osuu kokonaan näkyvän valon alueelle. Hehkulamppu puolestaan muuttaa suurimman osan (n. 95 %) ottamastaan sähkövirrasta infrapunasäteilyksi eli lämmöksi. Näin ollen hehkulampun valohyötysuhde on vain noin 5 %. Lisäksi hehkulampun käyttöikä on melko lyhyt. Ledit eivät myöskään sisällä hehkulankaa tai ohutta lasia, jotka rikkoutuisivat helposti. Tästä syystä led-valaisimia voidaan hyödyntää tehokkaasti myös paikoissa, joissa perinteisiä hehkulamppuja ei ole järkevää käyttää.

Ledejä sisältävän lampun hankintahinta on kuitenkin toistaiseksi paljon kalliimpi kuin hehku- ja halogeenilamppujen, mutta pidemmän käyttöiän vuoksi se maksaa itsensä myös takaisin. Valkoista valoa tuottavien ledien valontuotto on n. 50–100 lm/W ja se paranee jatkuvasti lamppujen kehittymisen myötä. Ledit tarjoavat myös aivan uudentyylisiä ratkaisuja, joita ei juuri voida toteuttaa perinteisillä valaisimilla. Ledejä myydään esimerkiksi nauhoina, joihin led-moduulit on asennettu tietyin välimatkoin. Näitä nauhoja voidaan upottaa rakennusvaiheessa seinien ja listojen sisään, jolloin valaisimet saadaan esimerkiksi osoittamaan hätäpoistumisteitä tai luomaan sisustuksellisia tai tunnelmallisia elementtejä. Tiedot ledien ominaisuuksista, kestosta ja sopivuudesta eri tuotesovelluksiin ovat kuitenkin komponenttivalmistajien varassa, ja tieto on riittämätöntä tuotekehityksen näkökulmasta.

3 Tavoitteet ja tulokset

Ledtrix-projektin tavoitteena oli tuottaa uutta tutkimustietoa ledien käytöstä valaisus-, lääke- ja muun teollisuuden tarpeisiin. Lisäksi hankkeen tarkoituksena oli Itä-Suomen alueen yritysten kilpailukyvyn, työllistämismahdollisuuksien ja uusien yritystoimintojen lisääminen perustutkimuksen keinoin. Monitieteellinen projekti yhdisti Itä-Suomen yliopiston mikro-optiikan, Karelia-ammattikorkeakoulun Liiketalouden ja tekniikan keskuksen sekä savonlinnalaisen Elektroniikan 3K-tehtaan (hanke siirtyi 1.4.2013 alkaen Mikkelin ammattikorkeakoulun hallinnoimaksi) elektroniikkavalmistuksen osaamisalat.

Projektin tavoitteita olivat

- » testata standardien mukaisten laskentamallien luotettavuutta ledien eliniän määrittämisessä
- » tutkia ja testata led-piirilevyjen suojaukseen tarkoitettuja pinnoitteita sekä niiden vaikutusta ulostulevaan valoon
- » simuloida led-sovellusten lämpökäyttäytymistä ja testata uusia lämmönsiirtotekniikoita
- » koota tietopankki ledeistä sekä niihin liittyvistä tekniikoista [www-sivuille \(www.ledtriks.fi\)](http://www.ledtriks.fi).

Lisäksi projektin aikana tutkittiin uusien muovien soveltuvuutta ledien jäähtymykseen ja markkinoilla tarjolla olevien E27-kantaan kierrettävien led-lamppujen kestoja. Projektin aikana syntyi lisäksi muutamia opiskelijoiden tekemiä laajempia harjoitustöitä, joista esimerkkinä liitteessä C: Tutkimus ledien aiheuttamista radioaaltohäiriöistä.

4 Ledien kiihdytetty elinikätestaus

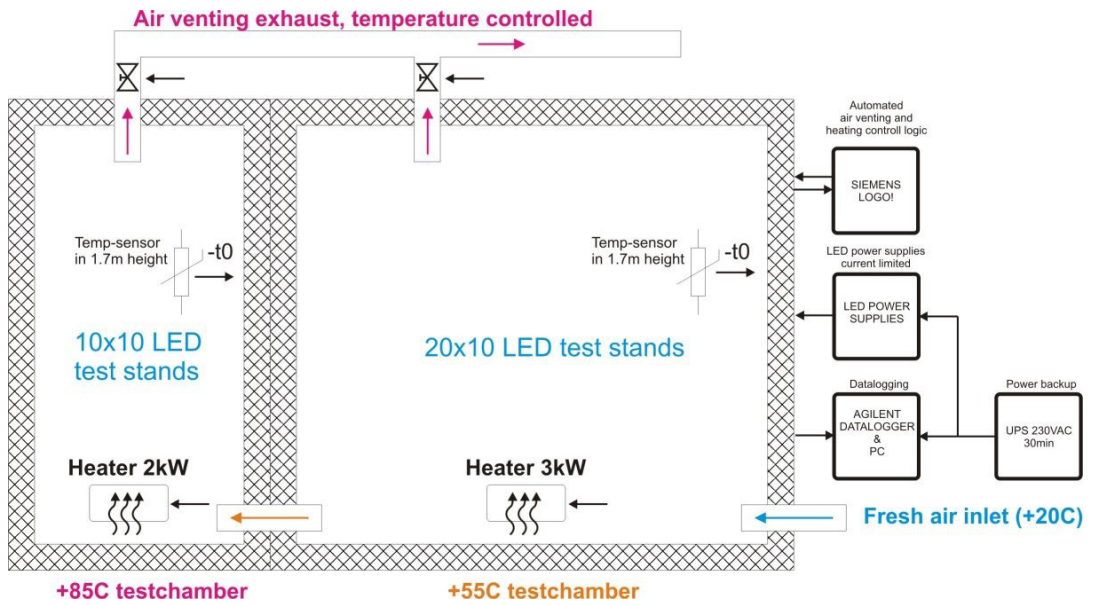
Elina Havia & Henri Montonen, Mikkelin ammattikorkeakoulu

Ledin elinikä on tyypillisesti pitkä, minkä vuoksi ledien eliniän pituutta selvittäessä on käytettävä nopeutettua vanhennusta. Vanhenemista voidaan nopeuttaa kohottamalla lämpötilaa, jossa tuotteita testataan. Ledin katsotaan tulleen elinkaarensa päähän, kun sen suhteellinen valonvoimakkuus hiipuu 70 % alkuperäisestä. Kiihdytetyssä elinikätestauksessa ledien suhteellista valonvoimakkuutta mitataan eri lämpötiloissa tuhannen tunnin välein ja saaduista kuvaajista voidaan matemaattisesti määrittää hiipumiskerroin (standardin IES TM-21-11 mukaisesti). Tässä luvussa kerrotaan, kuinka ledien kiihdytetty elinikätestaus suunniteltiin ja suoritettiin sekä millaisia tuloksia mittauksista saatiin.

4.1 TESTIYMPÄRISTÖN SUUNNITTELU

Ledien vanhennusta varten suunniteltiin standardia IES LM-80-08 soveltuvien osien mukainen testijärjestely, jossa ympäristön lämpötila saadaan pidettyä vakiona. Erityistä huomiota kiinnitettiin siihen, että pitkäkestoisessa testauksessa kulutettaisiin mahdollisimman vähän energiaa testihuoneen lämmitykseen. Testihuoneesta tehtiin siis hyvin lämpöeristetty.

Huone rakennettiin kaksiosaiseksi siten, että voitiin käyttää kahta eri vanhennuslämpötilaa (kuva 1). Valitut testauslämpötilat olivat +55 °C ja +85 °C (kuva 2). Kolmas mittauslämpötila oli 95 °C, ja se toteutettiin Karelia-ammattikorkeakoulun lämpökaapissa (kuva 3). Lämmitysjärjestelmää ohjattiin Siemens LOGO! -logiikalla, ja se sisälsi lämpötila-anturit, lämmitysvastukset sekä ohjattavat poistoilmaventtiilit puhaltimiseen. Mittausjärjestelmä koostui Agilent-dataloggerista ja PC:stä. Tietoa kerättiin ledien virrasta ja lämpötilasta. Ledien tehollähteissä käytettiin virtarajoitusta ja ne sijaitsivat testauskammion ulkopuolella. Ledien tehollähteet ja dataloggeri tietokoneineen olivat varavirtajärjestelmään kytkettyinä, jotta lyhyet sähkökatkot eivät katkaisseet mittauksia.



Kuva 1. Ledien vanhennus kohotetussa lämpötilassa. Kaaviokuva testihuoneesta.



Kuva 2. Kohotetun lämpötilan testihuone. Etualalla 55 °C:n huone ja taka-alalla 85 °C:n huone.



Kuva 3. Lämpötilan 95°C lämpökaappi.

4.2 PIIRILEVYSUUNNITTELU

Ledien testipiirilevy oli muodoltaan pyöreä ja läpimitaltaan 60 mm. Testattaviksi ledeiksi valittiin markkinoille äskettäin tulleita valkoisia teho-ledejä (taulukko 1). Jokaiselle ledille suunniteltiin oma piirilevynsä. Levyt olivat muuten keskenään identtiset, mutta kullakin levyllä oli valmistajan kyseiselle ledille suosittelema jäähdytyskuvio, jonka avulla ledin tuottamaa lämpöä siirtyi led-sirulta piirilevyllä. Levyillä oli led-komponentin lisäksi NTC-vastus lämpötilan mittaamista varten, led-etuvastus, virransyöttö/mittausliitin sekä RFID-siru ja piirilevykuparointiin integroitu antennikuvio levyn tunnistamista varten.

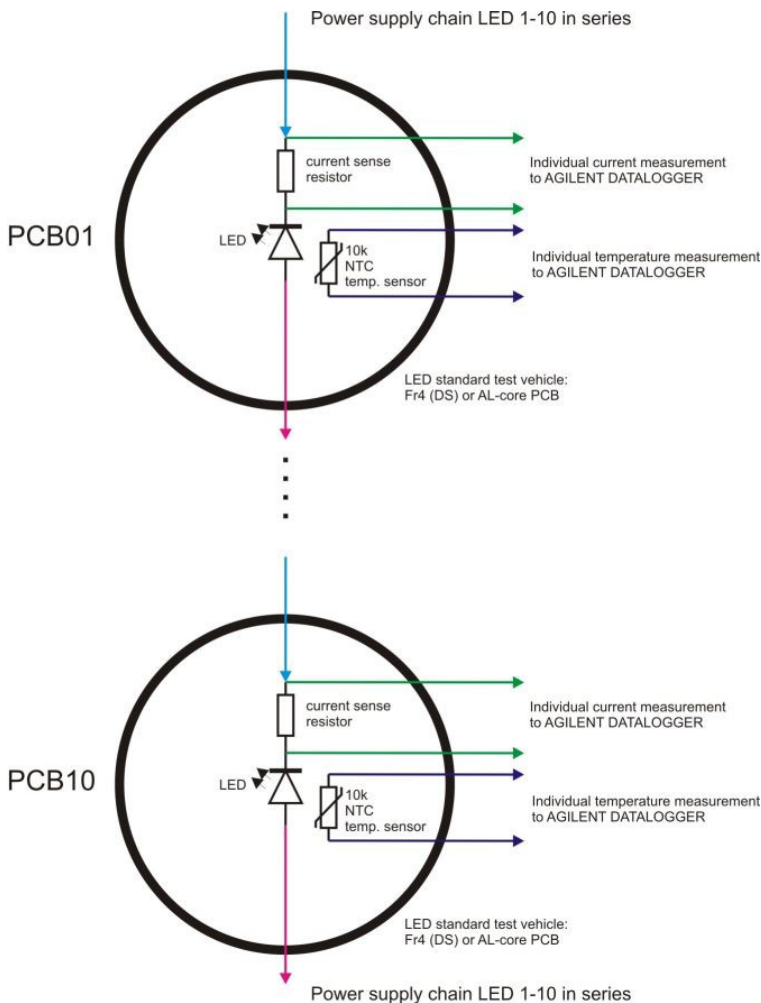
Taulukko 1. Elinikätesteihin valittujen ledien ominaisuuksia.

LED	maksimivirta [mA]	ledin pinta-ala [mm ²]	valoheilan avautuskulma	maksimilämpötila, sirun pn-liitos [C]	lämpöresistanssi sirun pn-liitoksen ja juotospisteen (lämmönsiirtopadin) välillä [C/W]
Led A	200	4		120	55
Led B	3000	25	125	150	2,5
Led C	1000	13	120 [total 160]	150	6

Led D	700	2	120 [total 140**]	130	6
Led E	800	7	150 [at 50 % Iv]	125	typ. 9.6, max 10.8
Led F	1000	12	115–130	150	9

Piirilevy oli kaksipuolinen, paksuudeltaan 1,0-millimetrinen FR-4-piirilevyateriaalista tehty levy. Myös alumiinipiirilevyä testattiin yhdellä led-mallilla. Alumiinipiirilevy johtaa lämpöä paremmin kuin tavallinen FR4-piirilevyateriaali. Piirilevyssä ei käytetty jäähdytys-siiliä, vaan lämpö siirtyi piirilevyateriaalista ympäröivään ilmaan.

Yhtä pienempitehoista led-mallia (led A) ajettiin 150 mA:n virralla ja muita led-malleja 700 mA:n virralla. Virransyöttö tapahtui säädettyillä virtalähteillä ja testilevyt oli sijoitettu palkkeihin, joissa oli 10 kpl testilevyjä sarjassa (kuva 4).



Kuva 4. Kaavio testipiirilevyjen sarjaankytkennästä.

5 Ledien valovirtamittaukset

*Miska Piirainen, Jani Kangas, Karelia-ammattikorkeakoulu
Pertti Silfsten, Itä-Suomen yliopisto*

5.1 MITTAUSTEN KULKU

Miska Piirainen

Mittaukset suoritettiin standardien TM-21 ja LM-80 mukaisesti. Testaustilan saavutettua testauslämpötilan ledit laitettiin päälle. Testausintervallin 1000 h kuluttua ledit sammutettiin ja tila jäähdytettiin noin 25 °C:n lämpötilaan. Tämän jälkeen ledit käynnistettiin uudestaan tarkkuusvirtalähteellä ajettuna ja ledien valovirran annettiin tasaantua 5 minuuttia, minkä jälkeen suoritettiin mittaukset. Tämän jälkeen testausta jatkettiin edellä kuvatulla tavalla. Mittaukset suoritettiin BTS 256 -led-testerillä, jolla saadaan mitattua muun muassa valonlähteen spektri (säteilyteho 380–755 nm, viiden nm:n välein), valovirta [lm], huipputeho ja sen aallonpituus ja värikoordinaatit.

Korkeammissa mittauslämpötiloissa (55 °C ja 85 °C) jouduttiin ajoittain hieman joustamaan 25 °C:n mittauslämpötilasta, esimerkiksi kesähelteillä tilan lämpötila saattoi olla joidenkin asteita korkeampi. Muutamissa yksittäisissä tapauksissa ledin linssi irtosi mittapään kosketuksesta. Muilta osin mittauksia voidaan pitää onnistuneina. Mittauskertoja testauksen aikana kertyi 20 (0 kh – 19 kh) eli testausaika kokonaisuudessaan oli noin 2 vuotta ja 2 kuukautta.

5.2 TESTATUT LEDIT

Taulukossa 1 on lueteltu testatut ledit ja testauksessa mitattuja yleisiä ominaisuuksia. Testausvirraksi valittiin 700 mA paitsi led A:lle 150 mA, koska ko. ledin maksimivirta on 200 mA. Tarkasteltaessa 700 mA:n virralla ajettuja ledejä nähdään, että testauksen alussa valovirrat vaihtelivat noin 100:n ja 200 lm:n välillä. Led B:n valovirta oli suurin. Lisäksi havaitaan, että led B:n lämpötila T_s on alhaisin korkeimmasta valovirrasta huolimatta. Tämä

johtunee siitä, että led B oli pinta-alaltaan suurin. Koska kyseisen ledin lämpöresistanssi on lisäksi pieni (todennäköisesti pinta-alasta johtuen), on kyseisen ledin pn-rajapinnan lämpötila ollut testauksen aikana selvästi alhaisin. Vertailtaessa pinta-alaltaan lähes samankaltaisia ledejä C ja F havaitaan, että ledillä C on suurempi valovirta ja pienempi lämpötila.

Taulukko 1. Testatut ledit ja niiden ominaisuudet.

LED	maksimivirta [mA]	testausvirta [mA]	ledin pinta-ala [mm ²]	Ta [°C]	Ts [°C]	maksimilämpötila, sirun pn-liitos [°C]	lämpöresistanssi sirun pn-liitoksen ja juotospisteen (lämmönsiirtopadin) välillä [°C/W]	valovirran keskiarvo testauksen alussa [lm]
Led A	200	150	4	55 85 95	66 96 107	120	55	49 49 49
Led B	3000	700	25	55 85 95	85 104 121	150	2,5	210 210 211
Led C	1000	700	13	55 85 95	97 127 136	150	6	161 156 156
Led E	800	700	7	55 85 95	? ^(?) ? ?	125	typ. 9.6, max 10.8	105 104 107
Led F	1000	700	12	55 85 95	122 145 149	150	9	126 129 X ^(*)

1) Tyyppi F ei kestänyt 95 °C:n testauslämpötilaa.

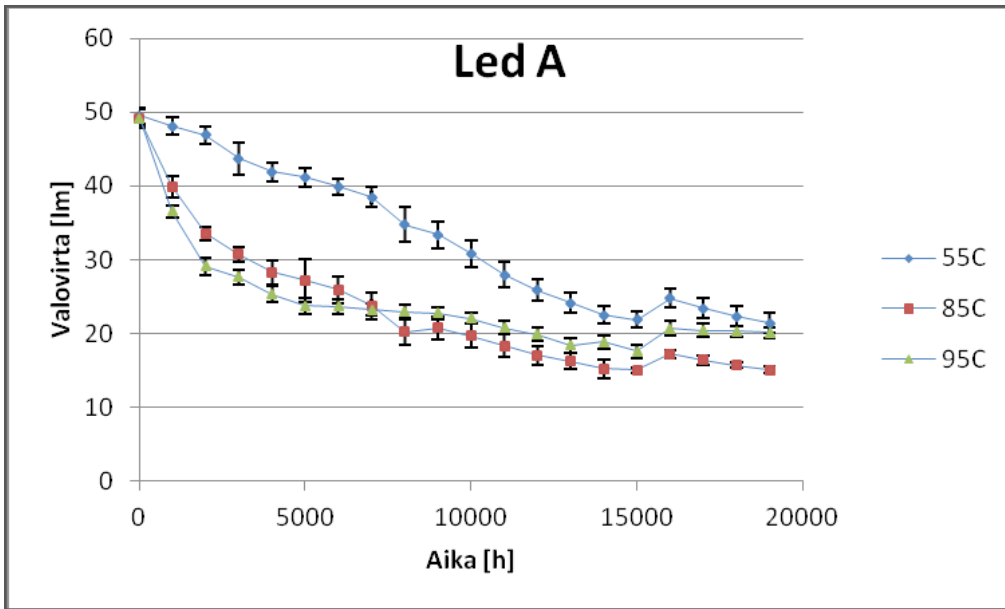
2) NTC-vastuksen ja Ts-pisteen välisen lämpötilaeron mittaus ei onnistunut luotettavasti.

5.3 VALOVIRTAMITTAUSTEN TULOKSET

Seuraavissa kuvaajissa esitellään ledien mitattuja valovirtoja mitatulta 19 kh:n mittausjaksolta. Kuvaajissa on esitetty kussakin lämpötilassa mittaushetkellä ehjänä olleiden ledien valovirran keskiarvo sekä hajonta. Kuvaajissa havaittavaa 16 kh:n kohdalla tapahtuvaa hypäystä on kommentoitu luvussa 5.6.

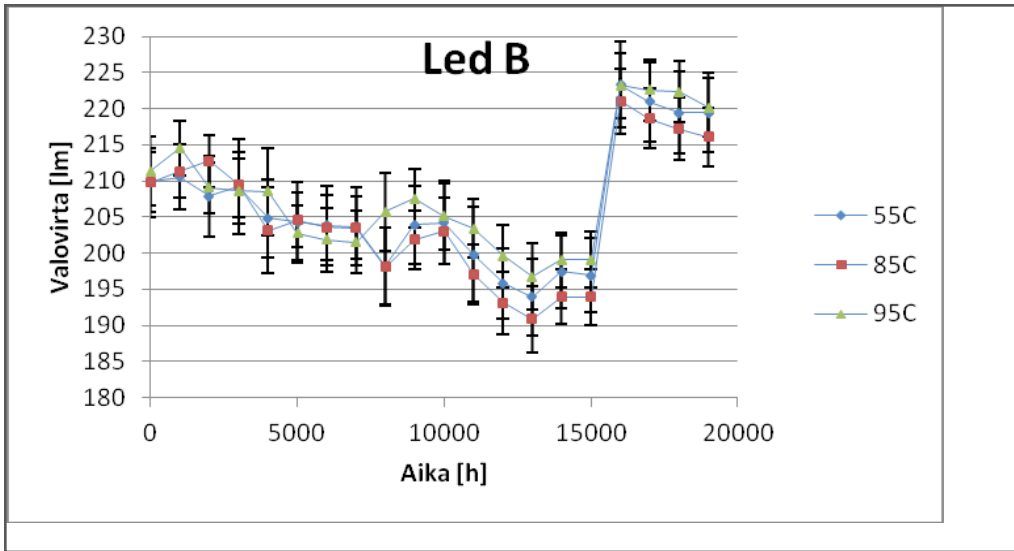
Ennen testauksen aloittamista ledeillä oletettiin tapahtuvan standardeissa kuvatun kaltaista eksponentiaalista valovirran hiipumista. Testatuista ledeistä led A (150 mA) käyttäytyi hieman kyseisen mallin kaltaisesti, joskin korkeammassa lämpötiloissa ensimmäinen 2 kh:n aikana tapahtunut valovirran romahdus ei ollut ennustettua. Valovirran hiipuminen oli tällä led-typillä selvintä (kuva 1). Merkillepantavaa on, että 95 °C:n lämpötilassa testattujen ledien valovirta on testauksen lopussa lähes yhtä suuri kuin 55 °C:ssa testattujen ja selvästi korkeampi kuin 85 °C:n lämpötilassa testattujen. Käytännön kannalta tällä ei

kuitenkaan liene suurta merkitystä, koska tässä vaiheessa ledien valovirta oli jo alle puolet alkuperäisestä. Led A osoittautui kohtuullisen kestäväksi, 55 °C:n ja 85 °C:n testauslämpötiloissa kaikki säilyivät ehjinä, 95 °C:n lämpötilassa 7/10 rikkoutui ensimmäisen rikkoutuessa 12 kh:n kohdalla.



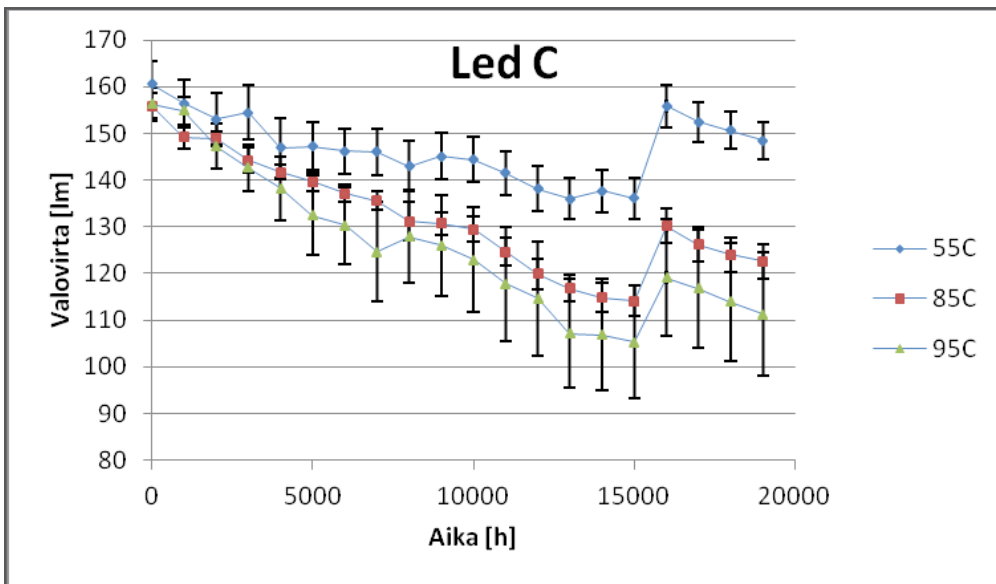
Kuva 1. Led A:n valovirran muutos ajan funktiona.

Valovirran alkuarvoltaan tehokkain ja toimintalämpötilaltaan alhaisin led B osoittautui myös muilta valovirtaominaisuuksiltaan parhaaksi (kuva 2). Kuvaajassa havaittava valovirran hiipuminen ja hyppäys liittyvät mittalaitteen kalibrointiin (ks. luku 5.6). Kun tämä seikka otetaan huomioon, voidaan kuvaajasta todeta, että näiden mittausten puitteissa led B:n valovirta ei käytännöllisesti katsoen riipu ajasta eikä ympäristön lämpötilasta. Lisäksi led on erittäin kestävä. Yhtään rikkoutumista ei tapahtunut missään lämpötilassa. Mielenkiintoinen toistaiseksi selittämätön yksityiskohta on se, että 8 kh:n jälkeen 95 °C:n lämpötilassa testattujen ledien valovirta on suurin, joskin hajonta on sen verran suuri, että tilastollisesti ero ei ole merkittävä.



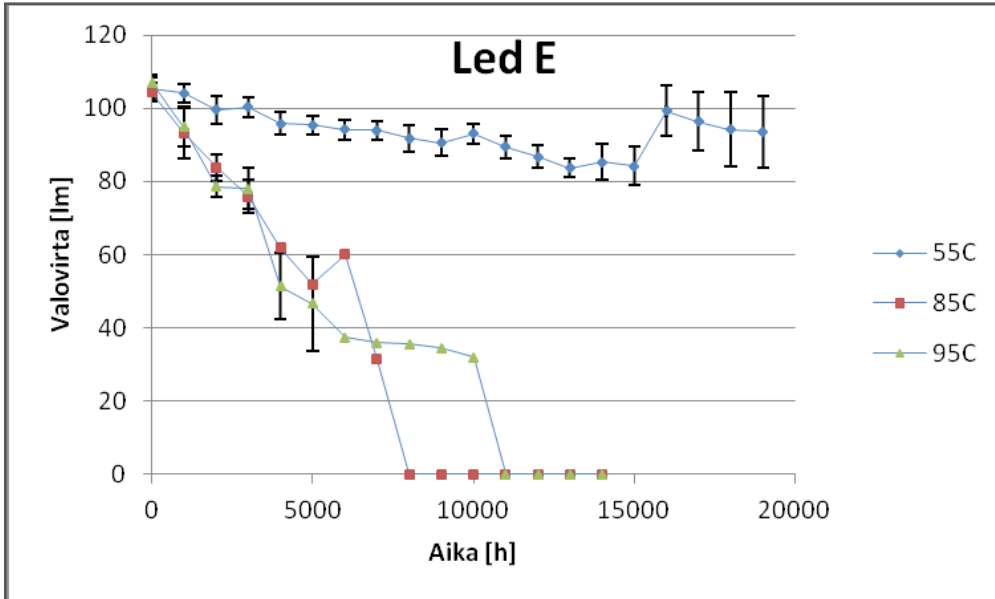
Kuva 2. Led B:n valovirran muutos ajan funktiona.

Ensimmäisenä esitellyn ledin A lisäksi ledissä C havaittiin selvää jossain määrin eksponentiaalista, joskin tyyppiin A verrattuna vähäisempää, hiipumista (kuva 3). Matalimmassa 55 °C:n testauslämpötilassa hiipuminen oli erittäin vähäistä. Lisäksi tämän ledin käyttäytyminen testauslämpötilan mukaan oli johdonmukaista, ja sen hiipuminen oli suurempaa korkeammissa lämpötiloissa. Myös led C oli kestävä, 95 °C:n lämpötilassa kaikki säilyivät ehjänä, alemmissa muutamasta rikkoutui linssi. Alemmissa lämpötiloissa linsien rikkoutumisen yksi syy oli mittaustilanteessa tapahtunut mekaaninen vaurioituminen.



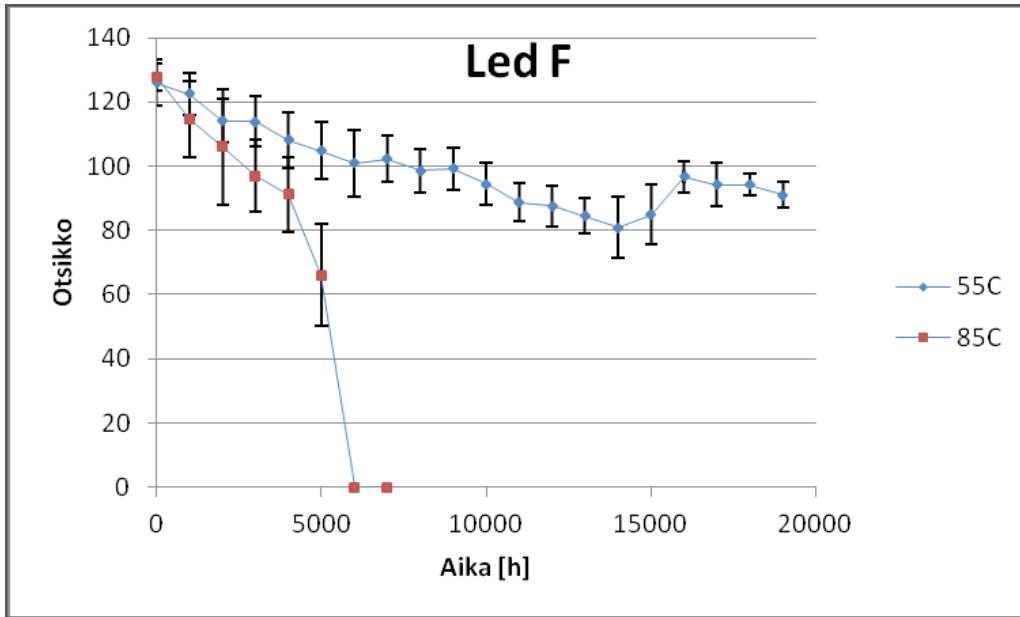
Kuva 3. Led C:n valovirran muutos ajan funktiona.

Led-tyypin E ja myöhemmin käsiteltävän tyypin F terminen resistanssi oli selvästi suurempi kuin samalla virralla ajettujen ledien B ja C (taulukko 1). Tästä voidaan päätellä, että kyseisten ledien puolijohderajapinta on ollut testeissä kuumempi kuin muiden. Ledistä F mittaustuloksista laskettu T_s tukee tätä tulkintaa. Näillä ledeillä 85 °C:n ja 95 °C:n testauslämpötiloissa valmistajan ilmoittama pn-rajapinnan maksimiarvo ylittyi, mikä näkyy selvästi testaustuloksissa. Ledin E valovirta hiipui nopeasti korkeammissa lämpötiloissa, ja ledejä alkoi rikkoutua 6 kh:n kohdalla (kuva 4). Testausjakson kestänyt 13 kh kaikki 85 °C:n ja 95 °C:n lämpötilassa testatut ledit olivat rikkoutuneet. Matalimmassa 55 °C:n lämpötilassa testatut ledit kestivät hyvin ja mittausten hajonnan ja mittarin tarkkuuden huomioiden hiipumista ei juurikaan havaittu.



Kuva 4. Led E:n valovirran muutos ajan funktiona.

Edellä kerrotun lisäksi led-tyypistä F voidaan todeta, että sen lämmönsieto oli heikoin. Korkeimmassa 95 °C:n lämpötilassa testatuista ledeistä kaikki rikkoutuivat ensimmäisen 1000 tunnin aikana. Mahdollisten muiden syiden eliminoimiseksi testi toistettiin uusilla ledeillä samoin tuloksien. Myöskään 85 °C:n lämpötilassa ledit eivät kestäneet hyvin, kaikki testatut olivat rikkoutuneet 6 kh:n kuluttua. Viileimmässä 55 °C:n lämpötilassa 5/20 lediä kesti ehjänä testauksen loppuun ensimmäisten rikkoutuessa 4 kh:n kohdalla. Tässä lämpötilassa valovirrassa havaittiin selvää hiipumista (kuva 5). Hajonnan ja vikaantumisen vuoksi ehjien ledien keskiarvoista piirretyn kuvaajan trendistä ei kuitenkaan voi tehdä päätelmiä (valovirrastaan pienimmän ledin särkyminen nostaa keskiarvoa). Testaukseen myöhemmin otettu led D ei myöskään kestänyt korkeammissa lämpötiloissa, joten tältäkin osin analysointia ei tehty. Taulukossa 2 on esitelty yhteenveto rikkoutuneista ledeistä.



Kuva 5. Ledin F valovirran muutos ajan funktiona.

Taulukko 2. Rikkoutuneet ledit.

Rikkoutuneet			
LED	Ta	KPL	HUOM
Led A	55	0	
Led A	85	0	
Led A	95	7	ensimmäinen rikki 12 kh:n kohdalla
Led B	55	0	
Led B	85	0	
Led B	95	0	
Led C	55	2	todennäköisesti linssi rikki
Led C	85	1	todennäköisesti linssi rikki
Led C	95	0	
Led E	55	1	
Led E	85	10	ensimmäiset rikki 6 kh, kaikki rikki 13 kh
Led E	95	10	ensimmäiset rikki 6 kh, kaikki rikki 11 kh
Led F	55	15	ensimmäiset rikki 4 kh
Led F	85	10	kaikki rikki 6 kh
Led F	95	10	kaikki rikki 1 kh

Valovirran hiipumisen matemaattisesta mallintamisesta ja ennusteiden laskemisesta on kerrottu seuraavassa luvussa. Yleisenä yhteenvetona valovirtamittauksen tuloksista voidaan todeta seuraavaa:

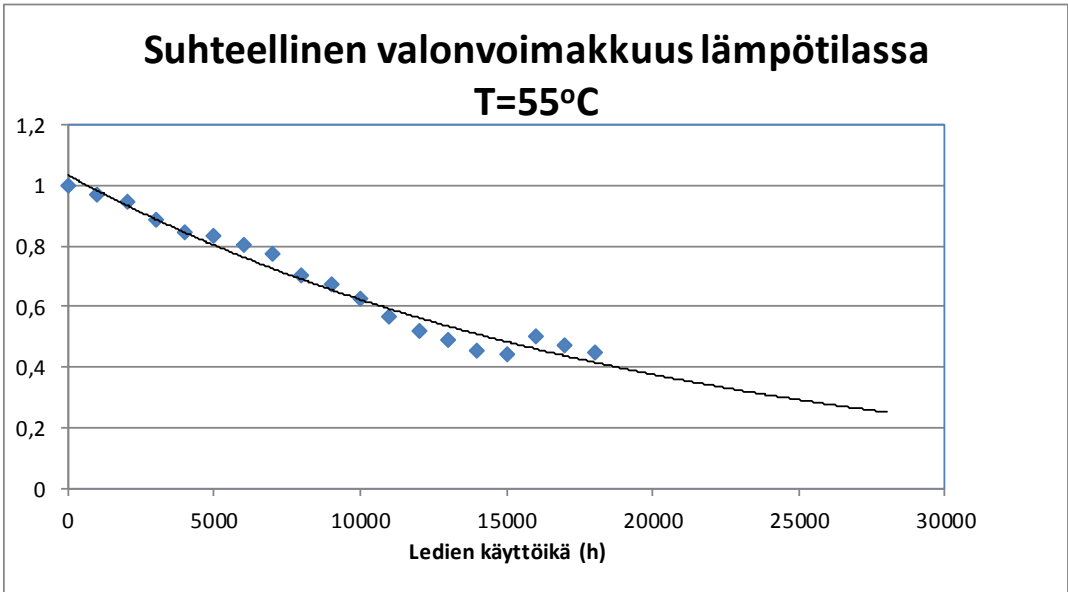
- » Ledien käyttäytymisessä ajan ja ympäristön lämpötilan suhteen on suuria eroja. Kaupallisista led-elementeistä löytyy tyyppejä, jotka kestävät valovirran suhteen hyvin lämpöä ja aikaa.
- » On nähtävissä selviä viitteitä siitä, että led-elementin lämpökäyttäytymisellä on merkittävä vaikutus valovirtaan ja käyttöikään.

5.4 LEDIEN SUHTEELLISEN VALONVOIMAKKUUDEN MUUTTUMINEN

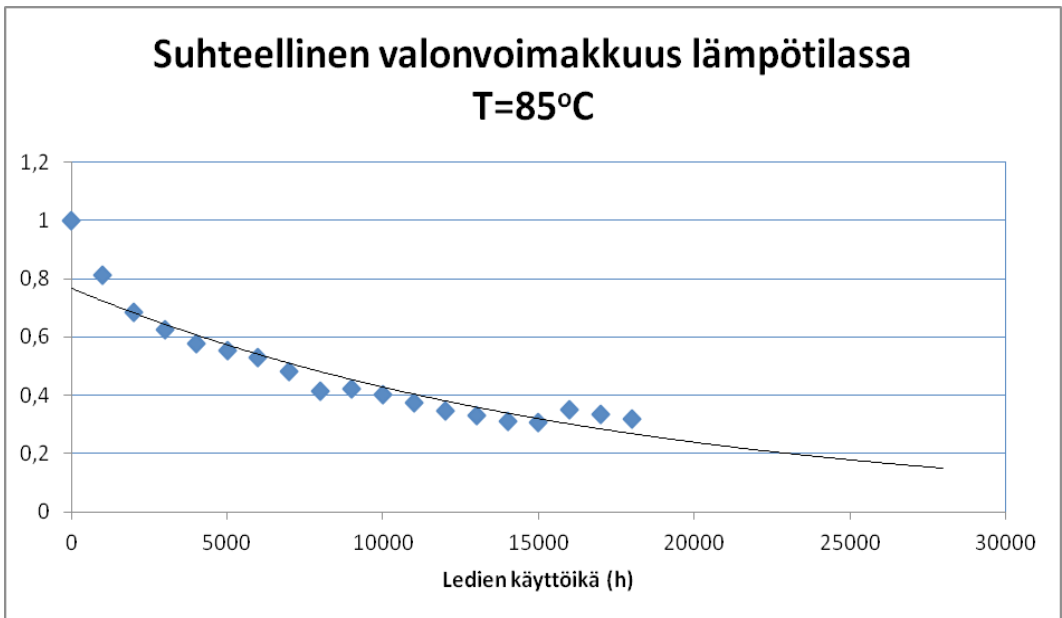
Jani Kangas

Tässä luvussa selvitetään ledien suhteellisen valonvoimakkuuden muuttumista ajan suhteen. Selostus perustuu standardiin IES TM-21-1. Ledien valonvoimakkuuksia on mitattu 18000 h:n ajanjakso. Valonvoimakkuudet on mitattu jokaisen tuhannen tunnin välein. Ledien valonvoimakkuuden hiipuminen on teoriassa sitä nopeampaa, mitä korkeampi on ympäristön lämpötila. Mittausten perusteella luodaan ennuste ledin valonvoimakkuuden käyttäytymisestä esimerkkilämpötilassa $T = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Tarkoituksena on määrittää se ajanhetki L_{70} , jolloin suhteellinen valonvoimakkuus on 70 % lähtöhetken tilanteesta. Tässä selostuksessa tarkastellaan ainoastaan kahta led-tyyppiä. Valitut led-tyypit käyttäytyvät likimääräisesti standardin TM-21 mukaisesti. Muissa led-tyypeissä ei ole tapahtunut 18000 h:n aikana merkittävää valonvoimakkuuden hiipumista tai suurin osa ledeistä on rikkoutunut.

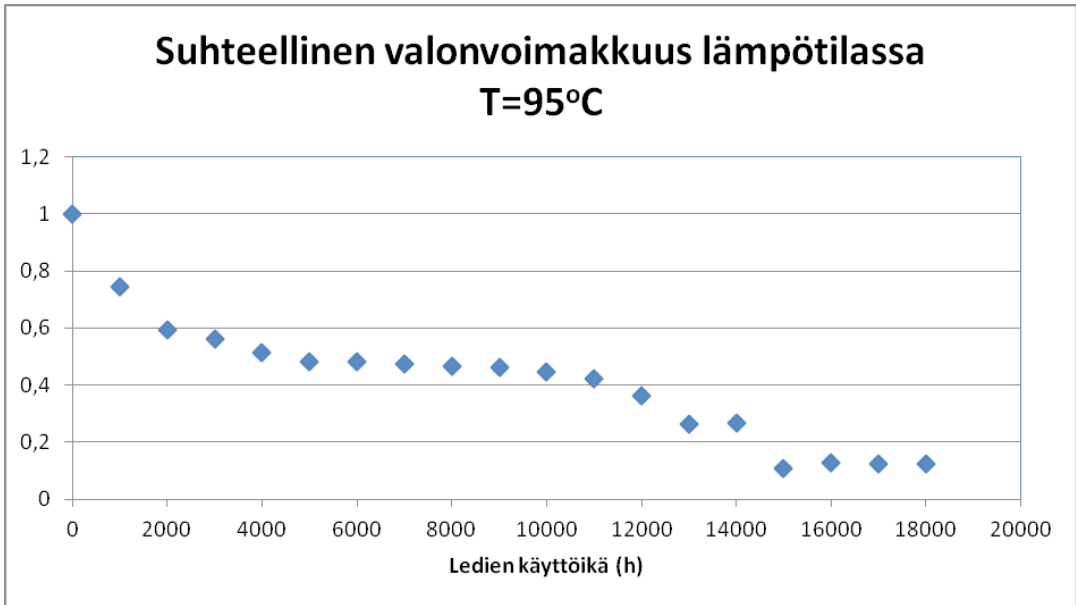
Kuvissa 6 ja 7 on esitetty led A:n suhteelliset valonvoimakkuudet ajan suhteen kahdessa ympäristön lämpötilassa, $55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $85 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Valonvoimakkuuden nousu 16 000 h:n kohdalla johtuu mittauksissa käytetyn laitteen kalibroinnista. Kuvaajassa oleva yhtenäinen käyrä on sovitettu Excel-ohjelmalla mittausdataan. Yhtenäisestä käyrästä saadaan ennuste valonvoimakkuuden pienenemisestä 28 000 h:iin asti. Led A:lla tapahtuu ensimmäisillä 2 000 tunnilla $85 \text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa nopea valonvoimakkuuden pieneneminen (kuva 7). Vastaava ilmiö on havaittavissa myös $95 \text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa (kuva 8). Tämän vuoksi linearisoituun valonvoimakkuuteen sovitetun suoran kulmakertoimen itseisarvo on pienempi korkeammassa lämpötilassa. Tämä havainto on vastoin standardin oletusta. Ilmeisesti lämpötila vaikuttaa ledin rakenteeseen epäedullisella tavalla.



Kuva 6. Led A:n suhteellinen valonvoimakkuus ($T=55^{\circ}\text{C}$).

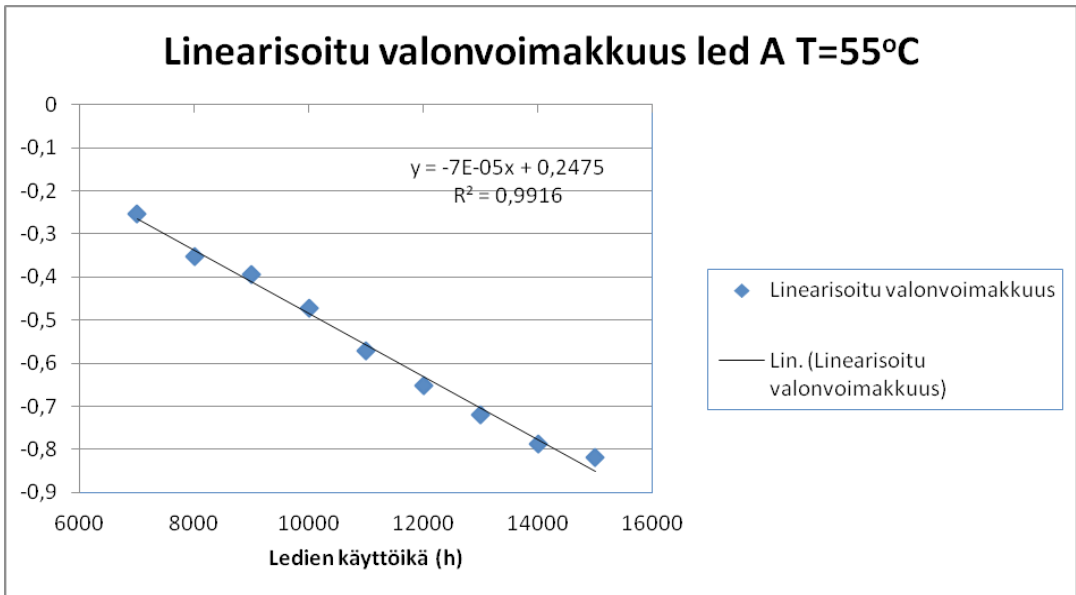


Kuva 7. Led A:n suhteellinen valonvoimakkuus ($T=85^{\circ}\text{C}$).

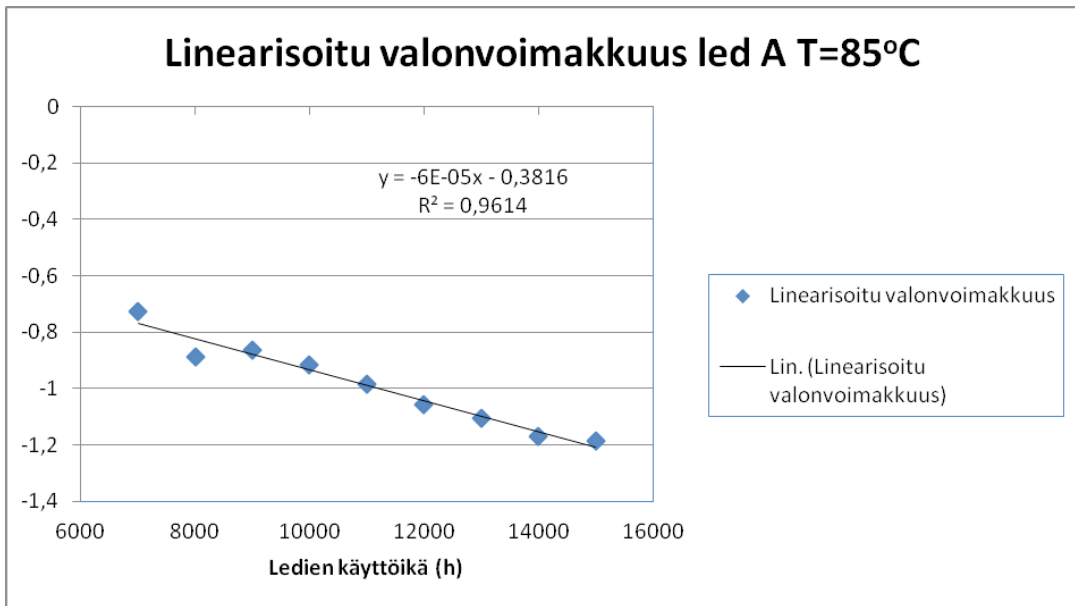


Kuva 8. Led A:n suhteellinen valonvoimakkuus (T=95°C).

Valonvoimakkuuden käyrä linearisoidaan laskemalla suhteellisista valonvoimakkuuksista luonnolliset logaritmit. Saatuun pistejoukkoon sovitetaan suora pienimmän neliön summan menetelmällä. Kuvien 9 ja 10 sovitukset on tehty aikavälille 7 000–15 000 h. Kyseinen aikaväli valittiin standardin TM-21 perusteella.



Kuva 9. Led A:n linearisoitu valonvoimakkuus (T=55°C).



Kuva 10. Led A:n linearisoitu valonvoimakkuus ($T=85^{\circ}\text{C}$).

Pistejoukkoihin sovitettujen suorien kulmakertoimia käytetään vakion A laskemiseen. Vakio A määritetään kaavalla

$$A = \alpha_1 e^{\left(\frac{E_a}{k_b T_{s,1}}\right)}$$

missä

$$\frac{E_a}{k_b} = \frac{\ln \alpha_1 - \ln \alpha_2}{\frac{1}{T_{s,2}} - \frac{1}{T_{s,1}}}$$

led A:lle saadaan

$$A \approx 2,5 \cdot 10^{-6}$$

Vakion A määrittämisessä on käytetty lämpötiloja 55°C ja 85°C . Lisäksi

$$k_b = \text{Boltzmannin vakio } (8,6173 \times 10^{-5} \text{ eV/K})$$

Saadun vakion perusteella lasketaan linearisoidun käyrän kulmakerroin lämpötilassa $T=25^{\circ}\text{C}$ kaavalla

$$\alpha_i = A e^{\left(\frac{-E_a}{k_a T_{s,i}}\right)}$$

Tällöin saadaan kulmakertoimeksi

$$\alpha \approx 1,03 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{h}}$$

Edelleen kerroin lasketaan

$$B_0 = \sqrt{e^{B_1} e^{B_2}}$$

missä B_1 ja B_2 ovat sovittujen suorien vakio termejä lämpötiloissa $T_{s,1} = 55^\circ \text{C}$

ja $T_{s,2} = 85^\circ \text{C}$

Tällöin voidaan määrittää aika, jolloin suhteellinen valonvoimakkuus on 70 prosenttia lähtötilanteesta esimerkkilämpötilassa $T = 25^\circ \text{C}$ kaavalla

$$L_{70} = \frac{\ln\left(\frac{B_0}{0.7}\right)}{\alpha}$$

Standardin TM-21 mukaan laskettuna valonvoimakkuuden hiipuminen 70 prosenttiin alkuperäisestä kestää lämpötilassa $T = 25^\circ \text{C}$ ajan

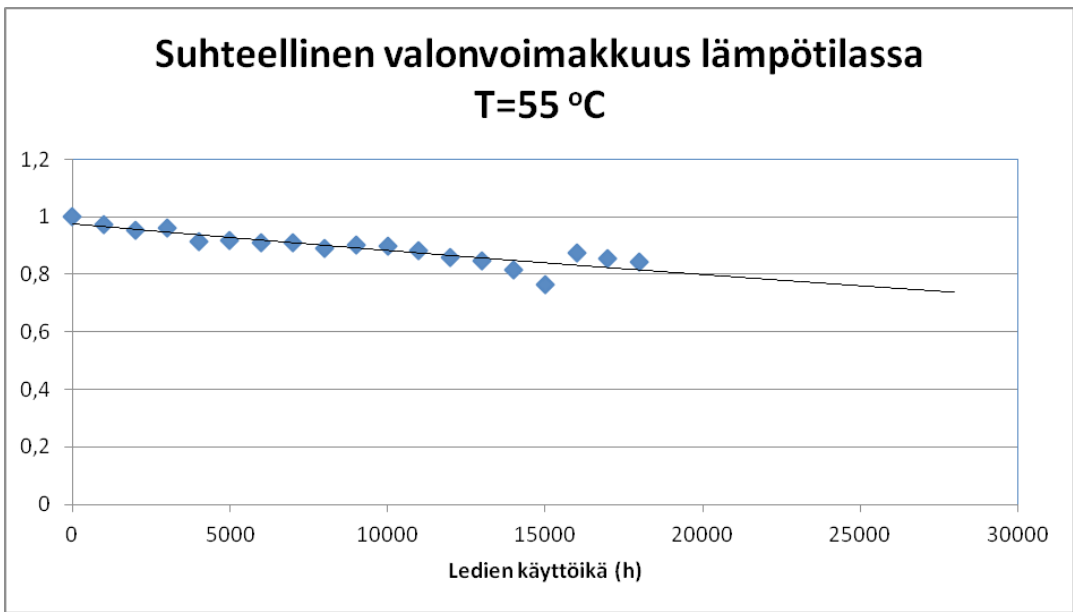
$$L_{70} = 2815 \text{ h}$$

Vertailun vuoksi edellä kuvattu tarkastelu tehtiin myös koko mittausdatalogalle, jolloin

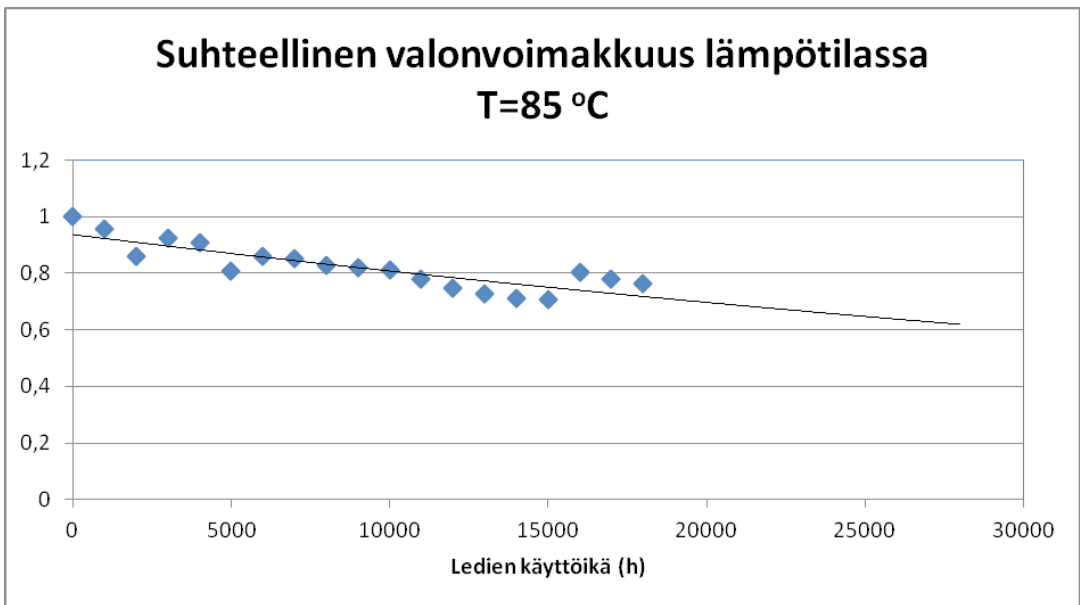
$$L_{70} = 5628 \text{ h}$$

Toinen led-tyyppi, joka käyttäytyi likimain standardin TM-21 mukaisesti, oli led C (kuvat 10–13). Kyseiselle led-tyypille tehtiin vastaavanlainen tarkastelu kuin led A:lle.

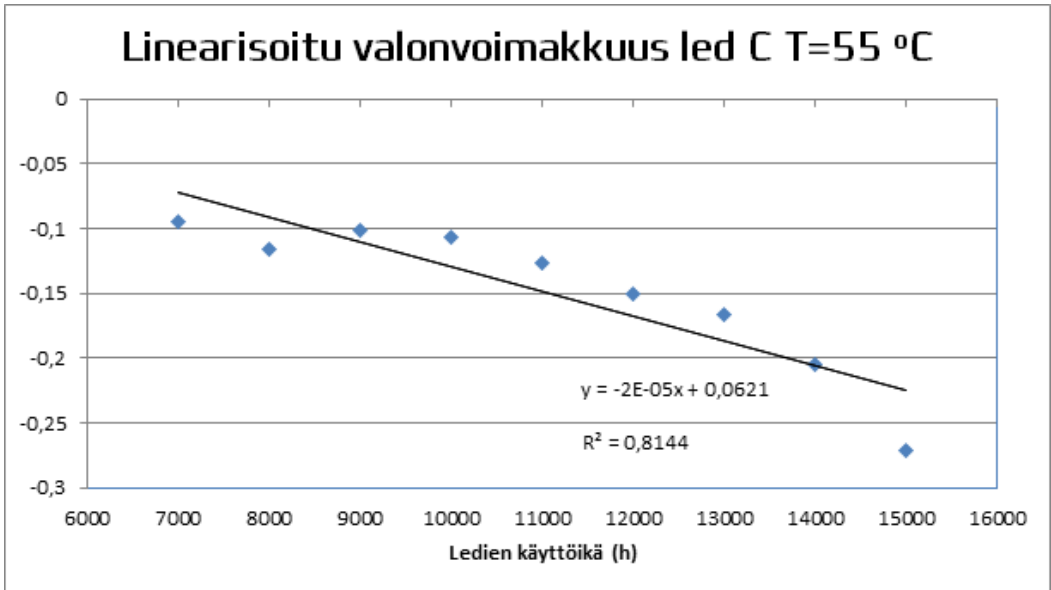
Led C:n valonvoimakkuuden äkillinen kasvaminen 16 000 h:n kohdalla johtuu myös mittarin kalibroinnista. Valonvoimakkuuden pieneneminen ei ole aivan yhtä nopeaa kuin led A:lla.



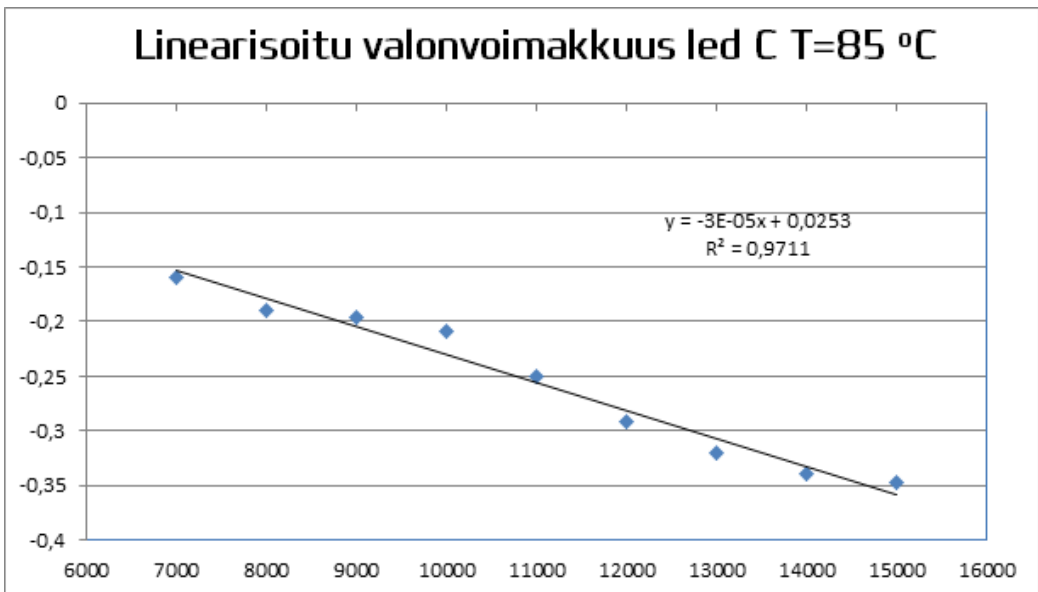
Kuva 10. Led C:n suhteellinen valonvoimakkuus ($T=55^{\circ}\text{C}$).



Kuva 11. Led C:n suhteellinen valonvoimakkuus ($T=85^{\circ}\text{C}$).



Kuva 12. Led C:n linearisoitu valonvoimakkuus ($T=55^{\circ}\text{C}$).



Kuva 13. Led C:n linearisoitu valonvoimakkuus ($T=85^{\circ}\text{C}$).

Standardin TM-21 mukaan led C:n valonvoimakkuuden hiipuminen 70 prosenttiin alkuperäisestä kestää lämpötilassa $T=25^{\circ}\text{C}$ ajan

$$L_{70} = 29646 \text{ h}$$

Laskettuna koko mittausdatasta saadaan

$$L_{70} = 49939 \text{ h}$$

Tulostaulukot löytyvät liitteestä A.

5.5 STANDARDIN MUKAISEN LASKENTAMALLIN ANALYSOINTI

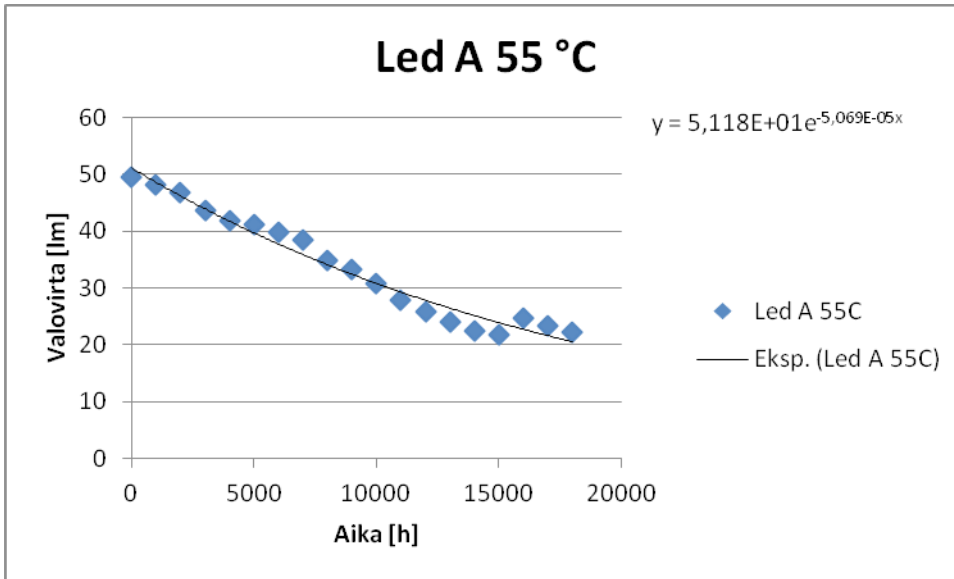
Miska Piirainen

Ensimmäisenä on todettava, että testauslämpötilojen suhteen testiä ei suoritettu standardin mukaan. Standardissa testauslämpötila T_s tulisi mitata elementiltä valmistajan määräämästä pisteestä. Koska testissä olleet ledit olivat lämpökäyttäytymiseltään hyvin erilaisia, standardin mukainen testaus olisi vaatinut kunkin ledin lämpötilan säätöä erikseen, jolloin säädettäviä kohteita olisi ollut satoja. Lähes standardin mukaiseen mittaukseen olisi päästy säätämällä kunkin led-tyyppin lämpötilaa erikseen, jolloin säädettäviä kohteita olisi ollut noin 20. Lopulta yhteisesti päädyttiin ratkaisuun, jossa säädettävä suure on testausympäristön lämpötila (edellä kuvatut 55 °C, 85 °C ja 95 °C). Näin testausympäristö oli kaikille tasapuolinen ja lämmönhallinnaltaan paremmat ledit hyötyivät ansaitusti paremmasta toiminnastaan. Jälkikäteen havaittiin, että joillekin ledeistä 95 °C:n lämpötilaa paremmin olisi sopinut esim. 70 °C:n testauslämpötila. Tällöin kuitenkin parhaimpien ledien toiminnasta ei olisi saatu sitä informaatiota, jota tällä testillä saavutettiin. Valintaa voidaan pitää siis onnistuneena.

Kuten jo aiemmin todettiin, valovirtamittausten perusteella testatut ledit eivät yleisesti ottaen käyttäytyneet standardin kuvaaman eksponentiaalisen hiipumismallin mukaisesti. Standardissa TM-21 valovirran käyttäytyminen mallinnetaan seuraavasti:

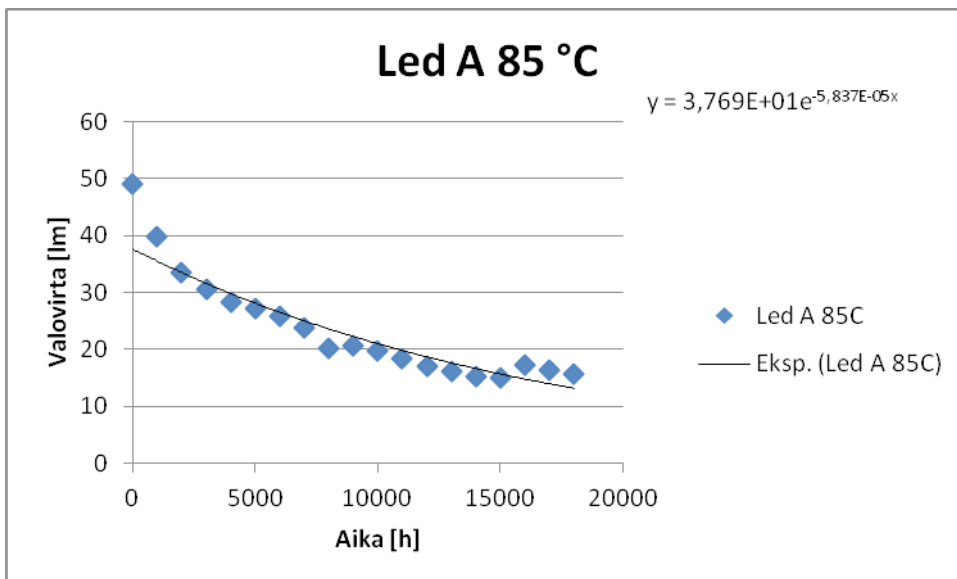
$$\Phi(t) = Be^{-\alpha t}$$

55 °C:n lämpötilassa ledeistä led A noudatti tätä malli parhaiten (kuva 14).



Kuva 14. Led A:n valovirran muutos ajan funktiona sekä eksponentiaalinen malli ($T=55\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Korkeammissa lämpötiloissa led A poikkesi kuitenkin mallista jo selvästi. Ledissä tapahtui ensimmäisen 2 kh:n aikana mallista poikkeavaa nopeampaa hiipumista ja lopussa hiipuminen hidastui suhteessa malliin (kuva 15). Mallin kannalta tämä on erittäin ongelmallista, koska malli olettaa hiipumisen olevan mittausjakson jälkimmäisellä puoliskolla nopeampaa korkeammissa lämpötiloissa. Korkeammassa lämpötilassa tapahtuneen alun nopean hiipumisen vuoksi ledillä A tilanne on toisin päin. Lisäksi mm. ledin A valovirta on mittausten lopussa korkeampi $95\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilassa kuin $85\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilassa, mikä on mallin ennusteiden vastaista.



Kuva 15. Led A:n valovirran muutos ajan funktiona sekä eksponentiaalinen malli. ($T=85\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Ledillä C hiipuminen on lämpötilan suhteen loogista ja mallin mukaista. Hiipuminen ei kuitenkaan ole kaikilta osin eksponentiaalisen mallin mukaista (kuva 12). Lisäksi hiipuminen on hajonnan suhteen vähäistä. Näiden seikkojen vuoksi laskentamallissa laskettujen parametrien virhemarginaali kasvaa kohtuuttoman suureksi ja saatujen ennusteiden tarkkuus on samaa luokkaan kuin kuvaajasta silmämääräisesti tehtyjen arvioiden.

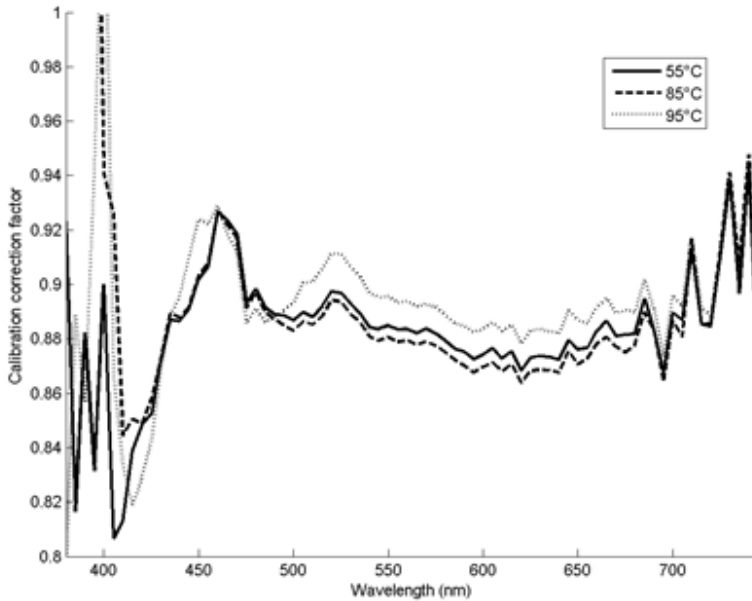
Ledillä B (kaikissa lämpötiloissa) ja ledillä E (55 °C) mallin mukaista hiipumista ei mitaustarkkuuden puitteissa tapahtunut lainkaan, joten laskentamallia ei näihin ledeihin voi soveltaa. Ledissä F on havaittavissa 55 °C:n lämpötilassa hieman mallia muistuttavaa hiipumista. Ledien rikkoutuminen kuitenkin estää mallin soveltamisen.

Yhteenvedona laskentamallista voidaan sanoa, että ainakaan valituille ledeille tässä testissä käytetyllä otannalla standardin TM-21 mukainen laskentamalli ei sovellu. Valovirtamittaustuloksista voidaan kuitenkin tehdä selviä johtopäätöksiä markkinoilla olevien ledien kestävyyksistä. Lisäksi mittaustulosten analyysistä saadaan selvää ja käyttökelpoista informaatiota testattujen ledien käyttäytymisestä. Itä-Suomen yliopistolta on tulossa opinnäytetyö testattujen ledien värianalyysiin liittyen. Lisäksi saatuja kohtuullisen pitkän aikavälin mittaustietoja voidaan ja pitäisikin käyttää jatkoanalyysien materiaalina. Aiheesta toivotaan tulevaisuudessa projektin toimijoiden puolesta myös muita korkeakoulutasoisia opinnäytteitä, jotka julkisina olisivat kaikkien alan toimijoiden hyödynnettävissä.

5.6 BTS 256-LED-TESTERIN KALIBROINNIN MUUTOKSEN VAIKUTUKSET MITTAUSTULOSSIIN

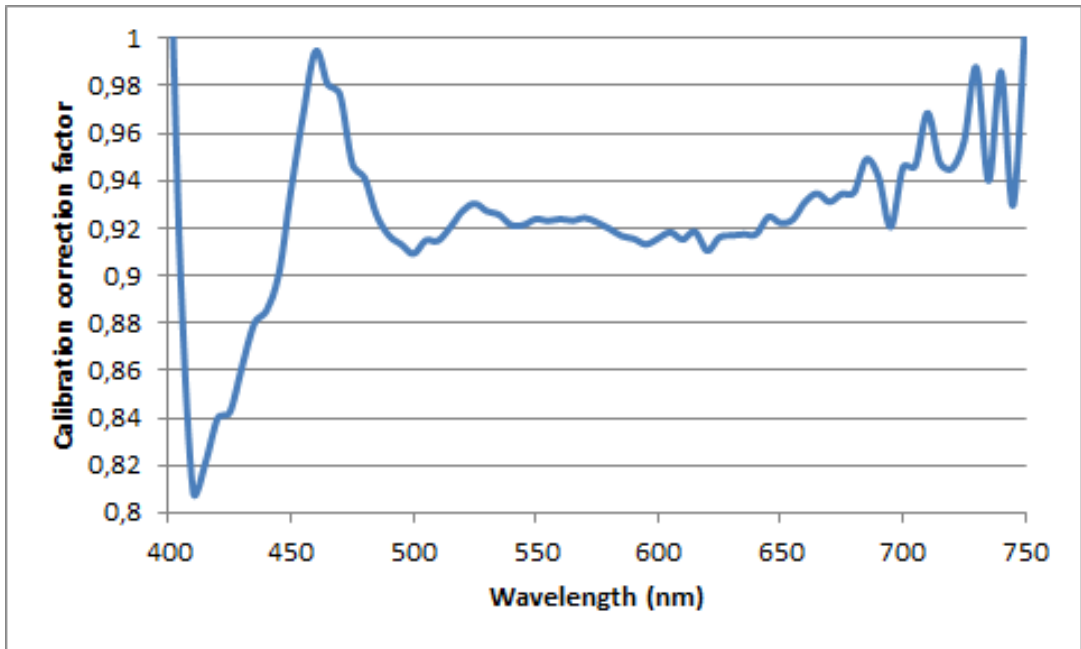
Pertti Silfsten

Suoritettaessa ledien pitkäaikaistestausta 1000 tunnin välein havaittiin mittaustuloksissa vaihtelua eri mittauskertojen välillä sekä ylöspäin että alaspäin. Valmistajan ilmoituksen mukaan ”Luminous flux calibration uncertainty +/- 8 %”. Tarkoittaako tämä sitä, että kalibrointi voi poiketa todellisesta +/-8 % vai sitä, että se voi vaihdella tämän vaihteluvälin sisällä? Mittauksissa esiintyneiden vaihteluiden perusteella ilmoitus näyttäisi tarkoittavan jälkimmäistä. Mittalaite otettiin käyttöön joulukuussa 2011, jolloin mitattiin aloitusmittaukset (0 kh), ja uudelleenkalibrointi suoritettiin joulukuussa 2013. Erään led-tyypin (led B) kohdalla havaittiin, että kalibroinnin jälkeen mittarin antamat kokonaisvalovirran lukemat olivat jopa 0 kh:a lähtöarvoja suuremmat. Tämä indikoi sitä, että näiden ledien valovirta on alussa hiukan lisääntynyt ja pysynyt sen jälkeen käytännössä vakiona. Tällaista käyttäytymistä ensimmäisen tuhannen tunnin aikana on havaittu muuallakin, ja tästä syystä elinaikamallissa standardi suosittelee jättämään ensimmäisen tuhat tuntia pois. Vertaamalla led B:n mitattuja spektrejä juuri ennen kalibrointia ja kalibroinnin jälkeen saadaan laskettua kalibroinnissa tapahtunut muutos. Tämä tulos nähdään kuvassa 16.



Kuva 16. Led B:n spektrien suhteet ennen/jälkeen kalibroinnin. Laskettu erikseen eri lämpötiloissa poltettujen ledien spektrien keskiarvoilla.

Kuvasta 16 voidaan päätellä, että mittarin kalibrointi on siirtynyt ajan kuluessa siten, että se antoi todellista pienempiä arvoja. Nopea muutos aallonpituuden 450 nm kohdalla johtuu siitä, että myös aallonpituuskalibrointia on kalibroinnissa hiukan muutettu. Spekttriä on siirretty ilmaisrivistöllä hiukan lyhyempiin aallonpituuksiin päin. Tällöin muutos muistuttaa kyseisessä kohdassa olevan piikin derivaattaa. Itse spektristä voidaan todeta, että ennen kalibrointia mittarin arvot olivat pudonneet kahdessa vuodessa alkuperäisestä 100 prosentista noin 88–89 prosenttiin. Millä aikavälillä testerin muutos sitten oli tapahtunut? Tämä saatiin selvitettyä mittaamalla kalibroinnin jälkeen uudelleen ledit, jotka oli mitattu sääkaappi- ja suolasumutestien jälkeen marraskuussa 2012 ja pidetty sen jälkeen hyllyssä polttamatta. Näin saatiin selville, kuinka paljon muutosta mittarin kalibrointi oli kulkenut jo ensimmäisen 11 kuukauden aikana. Muutos nähdään kuvassa 17. Ledit ovat useaa eri tyyppiä.



Kuva 17. Sääkaappi- ja suolasumutesteissä olleiden ledien mittaukset marraskuussa 2012 verrattuna kalibroinnin jälkeen tehtyihin mittauksiin. Laskettu keskiarvona ledeille.

Kuvasta 17 nähdään, että 11 kuukauden kuluttua käyttöönotosta mittarin kalibrointi oli muuttunut alkuperäisestä 100 prosentista noin 92 prosenttiin. Myös aallonpituuskalibroinnin pieni muutos näkyy, koska kaikissa ledeissä on piikki noin 450 nm:n kohdalla. Käyrissä näkyvät suuret vaihtelut aallonpituusasteikon alapäässä johtuvat siitä, että kaikkien ledien spektrit käytännössä vasta alkavat aallonpituudesta 400 nm. Aallonpituuksilla, jotka ovat lyhyempiä kuin 400 nm, on vain jaettu kaksi kohinasignaalia keskenään. Samasta syystä vaihtelu lisääntyy myös aallonpituuksilla, jotka ylittävät 700 nm. Kokonaisvalovirran arvoihin näillä kummallakin spektrin päällä on vain marginaalinen merkitys.

6 Pinnoittaminen

*Elina Havia, Henri Montonen, Mikkelin ammattikorkeakoulu
Pertti Silfsten, Itä-Suomen yliopisto*

6.1 SUOJAPINNOITUKSEN HYÖDYT

Led-valaisimia asennetaan haastaviin ympäristöolosuhteisiin, joten usein niitä on suojattava ympäristörasituksilta. Elektroniikan komponenttilevyjen suojapinnoittaminen juotosprosessin jälkeen on yksi keino vähentää elektroniikan rasitusta tuotteen elinkaaren aikana. Pinnoittamalla pyritään parantamaan komponenttilevyn kykyä sietää kosteutta, pölyä, kemikaaleja, ilmansaasteita, mekaanista rasitusta ja/tai lämpötilan vaihtelua.

6.2 SUOJAUSMENETELMÄT

Suojapinnoitteena voidaan käyttää komponenttilevyn pinnalle annosteltavaa ainetta, jota suomeksi kutsutaan usein elektroniikkalakaksi (eng. conformal coating). Lakkauksen sijaan elektroniikan suojaukseen on mahdollista käyttää valettavaa ainetta, jolloin tarvitaan muotti komponenttilevyn ympärille. Valu voi tapahtua huoneenlämpötilassa juoksevaa ainetta muottiin valuttamalla (casting). Toisaalta käytössä on matalan paineen ruiskuvalu (low pressure molding), jossa sulatettua valuaainetta ruiskutetaan muottiin. Matalapaineruiskuvalussa käytetty paine on tyypillisesti välillä 0,1 ...5 MPa. Matalan paineen takia matalapaineruiskuvalussa voidaan käyttää alumiinista valmistettua muottia, mikä alentaa muottikustannuksia. Matalapaineruiskuvalussa käytetty aine on tyypillisesti polyamidityyppistä kuumaliimaa. Myös korkean paineen ruiskuvalu on tutkittu elektroniikan ja optiikan suojausmenetelmänä. Korkean paineen kaksikomponenttiruiskuvalulla on mahdollista toteuttaa mekaanisesti poikkeuksellisen kestävä, tiivis kotelo ilman erillistä kokoonpanovaihetta. Korkean paineen ruiskuvalu vaatii tyypillisesti karkaistusta teräksestä

työstetyn muotin, mikä aiheuttaa kustannuksia muotin valmistukseen. Korkean paineen ruiskuvalu soveltuukin parhaiten suurten tuotantovolyymien tuotteisiin, jolloin tuotteen valmistuskustannukset kappaletta kohden jäävät pieniksi. Tässä hankkeessa tutkittiin pii-rilevyn pinnalle annosteltavia optisia elektroniikkalakkoja.

6.3 MARKKINOILLA OLEVAT PINNOITTEET

Komponenttilevyn pinnalle annosteltavat lakat jaetaan tyypillisesti perushartsin mukaan epokseihin, akryyleihin, uretaaneihin ja silikoneihin. Neljän peruslakkatyyppin ulkopuolella on tyhjiössä annosteltava paryleenipinnoite, jolla on saavutettavissa erinomaiset kemialliset, mekaaniset ja sähköiset ominaisuudet. Elektroniikan paryleenipinnoitus ei kuitenkaan ole Suomessa käytössä kuin erikoistapauksissa pinnoituksen vaatiman kalliin erikoislaitteiston takia. Perinteisten lakkapinnoitteiden ohella markkinoilla on myös fluori-pitoisia pinnoiteaineita, joilla pyritään muuttamaan komponenttilevyn pintajännitys kosteutta ja epäpuhtauksia hylkiväksi.

Annosteltu lakka voidaan lakkatyyppistä riippuen kovettaa eri menetelmillä, joihin kuuluu muun muassa lakan liuottimen haihduttaminen, kovettaminen erillisen kovetinaineen avulla (kaksikomponenttiaineet) sekä esimerkiksi lämmön tai ilmankosteuden avulla kovettaminen. Liuottimena lakassa on perinteisesti käytetty esimerkiksi alkoholipohjaisia yhdisteitä, mutta näiden haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (nk. VOC-yhdisteiden) käyttöä pyritään ympäristösyistä vähentämään. Kolmivuotisen LedTrix-hankkeen alkuvaiheessa markkinoille oli tullut elektroniikkalakkoja, joissa liuottimena haihtuvien orgaanisten yhdisteiden sijaan on vesi. Nämä VOC free -elektroniikkalakat eivät kuitenkaan toistaiseksi ole saaneet merkittävää jalansijaa markkinoilla. Liuottimen korvaamisen sijaan toinen vaihtoehto on vähentää haihtuvien aineiden ja liuottimen pitoisuutta lakassa. Markkinoilla on elektroniikkalakkoja, joissa kiintoainepitoisuus on yli 90 %. Korkean kiintoainepitoisuuden lakkoihin kuuluvat esimerkiksi sellaiset akryylin ja uretaanin seoksesta koostuvat lakat, joiden ensisijaisena kovetusmenetelmänä on UV-valo. Koska UV-valolla kovetettaessa saattaa elektroniikkalevyllä jäädä varjokohtia, kovetetaan nämä varjoon jääneet kohdat tyypillisesti ilmankosteuden tai lämmön avulla. UV-valon avulla kovettaminen tapahtuu nopeasti (sekunneissa), millä on merkitystä prosessin läpimenoajan osalta. Osa lakoista vaatii kovettuakseen tunteja tai vuorokausia, jolloin lakkauksesta voi muodostua valmistusprosessin pullonkaula.

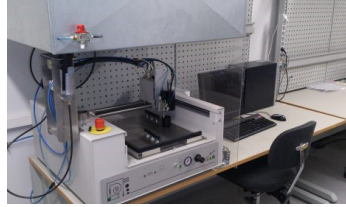
Led-valaisimia varten on kehitetty suojapinnoitteita, joiden suunnittelussa on kiinnitetty erityisesti huomiota siihen, kuinka valo läpäisee pinnoitetta. Nämä optiset pinnoitteet ovat väriltään läpinäkyviä ja niiden taitekerroin on lähellä lasin taitekertoimen arvoa. Pinnoitteiden tutkimusta varten valittiin viisi ledeille soveltuvaa optisen laadun suoja-ainetta. Pinnoitteiden valinnassa pääpaino oli UV-valolla kovetettavissa aineissa, ja mukaan valituista viidestä lakasta kolme oli UV-kovetteisia.

6.4 PINNOITUSLABORATORIO JA LEDILEVYJEN PINNOITTAMINEN ERI TESTIPINNOITTEILLA

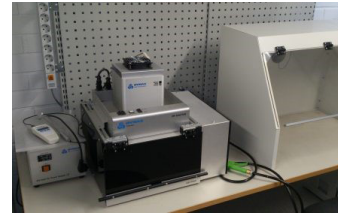
Pinnoitteiden tutkimuksia varten rakennettiin pinnoituslaboratorio (kuva 1), johon hankittiin annostelurobotti (kuva 2), UV-kovetuslaitteisto (kuva 3), radiometri UV-säteilymäärän mittaukseen sekä kalusteita. Ohjelmoitava annostelurobotti kykenee pinnoittamaan piirilevyjä selektiivisesti. Annostelurobotin etuihin kuuluu suoja-aineen annostelun tarkkuus ja hyvä toistettavuus.



Kuva 1. Pinnoituslaboratorio.



Kuva 2. Pinnoitus/annostelurobotti Dima DD500.



Kuva 3. UV-uuni ja käsineläkauspiste (huuva).

Jokaisella valitulla pinnoitelakalla (taulukko 1) lakattiin viittä erilaisen ledin sisältävää piirilevyä, kutakin viisi kappaletta. Yhteensä lakattiin 125 led-piirilevyä. Lakkauksen suoritettiin piirilevyn molemmiin puolin. Lakkauksen paksuus mitattiin mikrometrillä mittaamalla piirilevyn paksuus sekä ennen lakkausta että sen jälkeen. Mitatut pinnoitepaksuudet esitetään taulukossa 1. Suositeltu pinnoitteen paksuus on noin 50–130 µm. Pinnoitettaessa havaittiin, että pinnoituslaitteisto on säädettävä jokaiselle aineelle erikseen sopivaksi. Eri pinnoitteilla on niin erilaiset viskositeetit, että samoilla säädöillä ei voi ajaa. Lisäksi havaittiin, että CC₃-pinnoitetta oli annosteltava kaksi kerrosta, että saatiin riittävä pinnoitepaksuus. Pinnoituskerrosten välissä oli 24 h:n kuivatusaika. Silikonipohjaisen CC₁-pinnoitteen levityksen jälkeen oli erittäin hankala saada lakkauslaitteisto puhdistettua, koska ainut käytettävissä oleva puhdistustapa oli mekaaninen puhdistaminen. Jatkossa pyritään välttämään silikonipohjaisten pinnoitteiden annostelua pinnoitusrobotilla ja tekemään silikonipinnoitukset manuaalisesti.

Taulukko 1. Pinnoiteaineet.

Pinnoite	Tyyppi	Kovetusmenetelmä: varsinainen + toissijainen	Viskositeetti	Väri datalehden mukaan	Pinnoituksen jälkeen mitatut pinnoitepaksuudet [ka ± kh] [µm]
CC1	silikoni	30 min huoneenlämpötilassa	350 cp	läpikuultava	147 ± 7
CC2	uretaaniakryyli	UV + kosteus	500 cp	läpinäkyvä	83 ± 6

CC3	uretaani-akryyli	UV + kosteus	250-350 cp	läpinäkyvä	167 ± 11
CC4	uretaani-akryyli	UV/näkyvä valo + lämpö	2300 cp	kirkkaasta vaalean keltaiseen	153 ± 9
CC5	akryyli	24 h huoneenlämpötilassa	25 cp	läpinäkyvä	49 ± 8

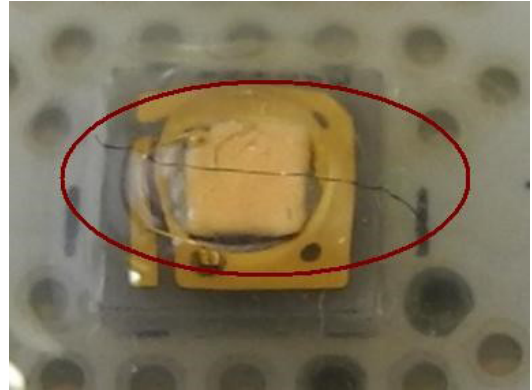
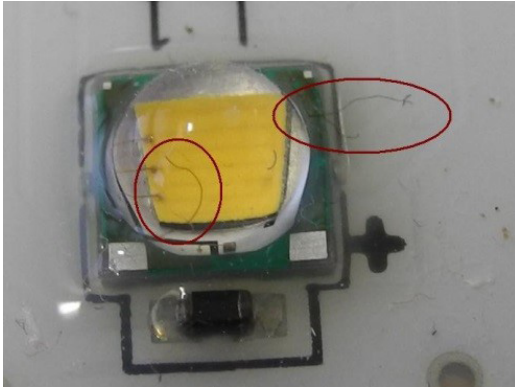
6.5 PINNOITTEIDEN IKÄÄNNYTTÄMINEN YMPÄRISTÖRASITUSTESTEILLÄ

Pinnoitetuista led-levyistä yksi erä sijoitettiin pitkäaikaistestiin 55 °C:n lämpöhuoneeseen. Muita pinnoitettuja led-levyjä vanhennettiin kosteus-lämpötestin sekä suolasumutestin avulla. Kosteus-lämpötestiksi valittiin 'IEC60068, Cyclic Damp Heat' -testi, jossa pinnoitetuille led-levyille kondensoituu kosteutta sekä aiheutuu lämpörasitusta. Lämpötila oli ohjelmoitu muuttumaan testin aikana 25 °C:n ja 85 °C:n välillä suhteellisen kosteuden ollessa 95 %. Testin pituus oli 21 vuorokautta.

Pinnoitettujen led-levyjen suolasumutesti suoritettiin standardin 'ISO 9227, Corrosion tests in artificial atmospheres' mukaan, jossa pinnoitettu piirilevy altistuu voimakkaasti korroosiota aiheuttavalle suolasumulle. Suolasumutestiin meni viisi jokaisella pinnoitella pinnoitettuja led-piirilevyä eli yhteensä 25 piirilevyä.

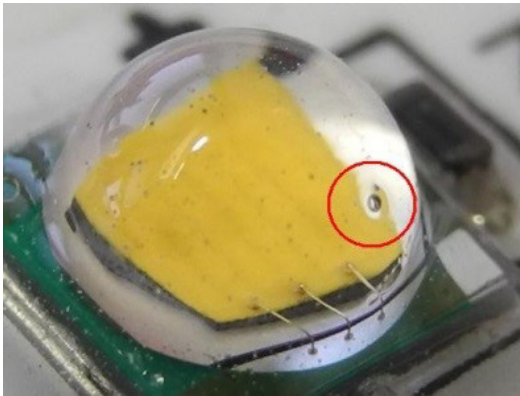
6.6 PINNOITETTUIJEN LED-LEVYJEN VISUAALINEN TARKASTUS

Kaikilla testatuilla lakoilla on mahdollista saada aikaan visuaalisesti arvioituna hyvä pinnoite ledeille. Toisaalta visuaalisessa tarkastuksessa havaittiin yksittäistapauksia, joissa pinnoite ei ole optimaalinen; näistä seuraavassa esimerkkejä. Silikonin havaittiin olevan muihin pinnoitteisiin verrattuna tahmeahkoa, ja silikonipinnoitteisten levyjen pinnalle olikin visuaaliseen tarkastusvaiheeseen mennessä kertynyt joitakin kuitu- tai muita irtopartikkeleita (kuva 4). Silikoni ei ole pinnaltaan likaa hylkivä vaan mieluummin päinvastoin. Mikäli silikonipintaan tarttuneet irtopartikkelit sijaitsevat ledin kohdalla, voivat ne vaikuttaa ledin valokeilaan, vaikka kuidun pinta-ala onkin vähäinen led-linssin pinta-alaan verrattuna. Lisäksi lakan pinnalla olevat irtopartikkelit voivat heikentää muun elektroniikan toiminnan luotettavuutta. Irtopartikkelit ovat myös ulkonäkökysymys.

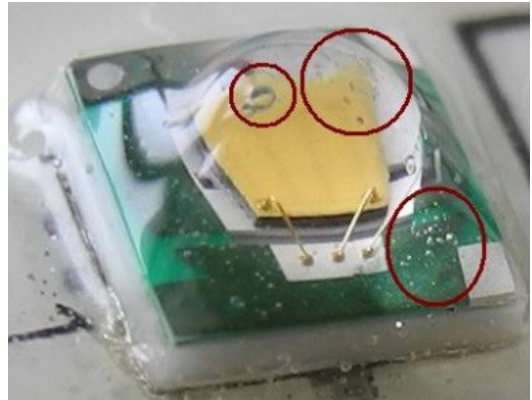


Kuva 4. Kuituja lakkapinnalla. Kuidun pinta-ala on kuitenkin vähäinen led-linssin pinta-alaan nähden.

Lakalla CC3 havaittiin joitakin ilmakuplia yksittäisten ledien pinnalla (kuva 5). Samalla lakalla CC3 esiintyi tapauksia, joissa pinnoite ei ollut levinnyt tasaisesti ledin C pinnalle, vaan led-linssin päälle oli muodostunut hyytelömäinen kerrostuma (kuva 6). Hyytelömäistä muodostelmaa esiintyi kahdella viidestä lakalla CC3 pinnoitetusta ledistä C. Muiden ledien pinnalle lakka CC3 oli levinnyt tasaisesti. Ledin F reunassa esiintyi rengasmaisia ilmakuplia (kuva 7). Tapauksista kolme havaittiin akryylilakalla, yksi akryyliuretaanilakalla ja yksi silikonilakalla. Muilla ledien sivuilla vastaavia rengasmaisia kuplia ei havaittu.

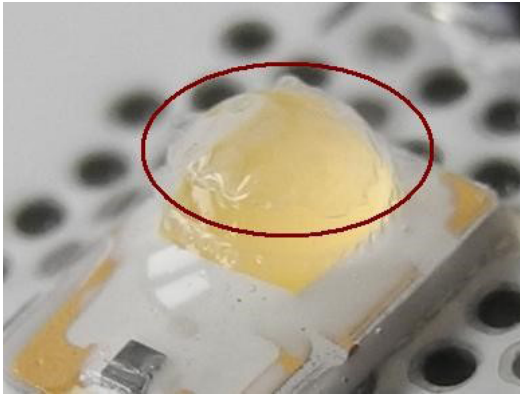


a) Akryyliuretaanilakka CC3
(ledi B)



b) Akryyliuretaanilakka CC3
(ledi F)

Kuva 5. Lakalla CC3 havaittiin joitakin ilmakuplia led-linssin pinnalla. Kuvassa a yksittäinen ilmakupla. Kuvassa b yksittäisen ilmakuplan lisäksi rykelminä pieniä ilmakuplia.



a)

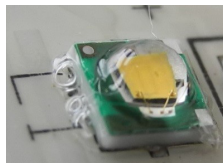


b)

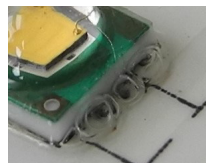
Kuva 6. Akryyliuretaanilakka CC3 epätasaisesti ikään kuin hyytelökrununa ledin C pinnalla. (Epätasaista pinnoitusta esiintyi kaksi samanlaista tapausta samalla led-lakka-yhdistelmällä. Toisaalta kolme muuta samaa led-lakka-yhdistelmää olivat pinnoituslaadultaan moitteettomia.)



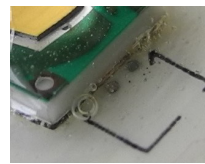
Akryytilakka CC5



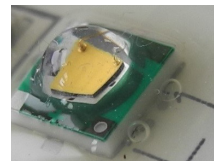
Akryytilakka CC5



Akryytilakka CC5



Akryyliuretaani-
lakka CC3



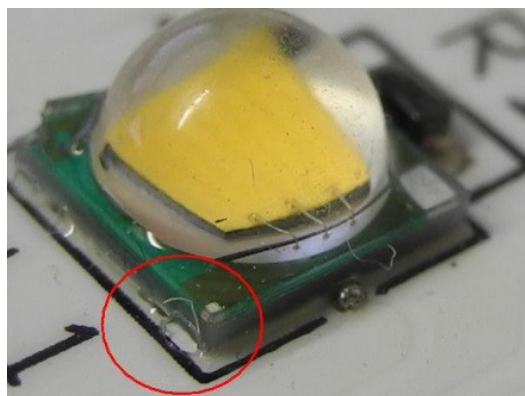
Silikonilakka CC1

Kuva 7. Rengasmaisia ilmakuplia led-komponentin F reunassa. Rengasmaiset ilmakuplat eivät sijaitse led-linssin alueella, joten ne eivät vaikuta ledin optiikkaan. Renkaita esiintyi pelkästään ledin F reunassa. Kolmessa tapauksessa lakkana oli akryytilakka, mutta myös yhdellä UV-koveteisellä akryyliuretaanilakalla CC3 pinnoitetussa led-levyssä sekä yhdellä silikonilakalla pinnoitetussa led-levyssä esiintyi kyseisiä renkaita.

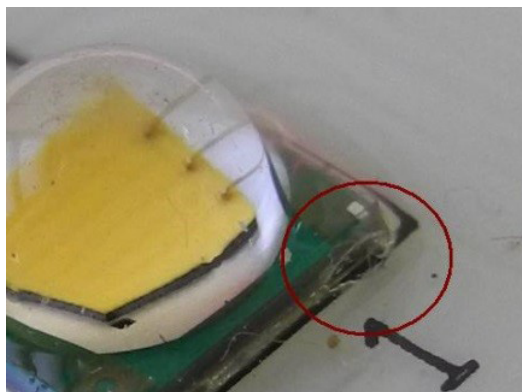
6.7 PINNOITTEIDEN KOVUUS JA TARTTUVUUS PIIRILEVYYN

Pinnoitteiden kovuudessa ja tarttuvuudessa piirilevyn pintaan oli havaittavissa eroja. Silikoni oli kuorittavissa piirilevyn pinnalta melko helposti. Akryylinpinnoitetta ei voinut kuoria piirilevyn pinnalta samaan tapaan kuin silikonipinnoitetta, mutta akryylinpinnoite oli raaputettavissa tai naarmutettavissa piirilevyn pinnalta esimerkiksi paperiliittimellä tai piikkirimaliittimen piikillä. Toisaalta akryylinpinnoite ei ollut yhtä lasimaisen kovaa kuin akryyliuretaanipinnoitteet. UV-koveteiset akryyliuretaanipinnoitteet olivat kovuudeltaan lasimaisen kovia, jolloin pinnoitus oletuksen mukaan kestää hyvin mekaanista rasitusta. Toisaalta kova materiaali saattaa olla hauras. Lisäksi liian kova ja joustamaton pinnoite saattaa rikkoa elektroniikkakomponentin rakennetta lämpötilan vaihteluissa. Yhtään akryyliuretaanipinnoitteen liiallisen kovuuden takia rikkoutunutta lediä ei kuitenkaan havaittu. Kolmella akryyliuretaanilakalla pinnoitetulla led-levyllä havaittiin kuitenkin lak-

kapinnan lohkeama ympäristötestien jälkeen. Kuvassa 8 esitetään kahden B-led-tyyppiä olevan ledin samassa kulmassa havaittu lakkapinnan lohkeama. Kyseisillä led-levyillä lakkana oli kahden eri valmistajan akryyliuretaanilakka (lakat CC2 ja CC4). Koska lohkeama esiintyy saman ledin kulmassa kaksi kertaa, lienee lohkeamaan ainakin osasyllisenä jokin ledin rakenteeseen liittyvä seikka. Selvää syytä kuvan 8 lohkeamiin ei todettu, mutta kyse voisi olla esimerkiksi kuumuuden aiheuttamasta höyrynpaineen noususta, jolloin höyry olisi purkautunut pinnoitetun led-komponentin reunasta ulos. Toinen vaihtoehto voisi olla, että komponentin reunassa on ollut ilmakupla, joka on puhjennut mekaanisen rasituksen seurauksena.



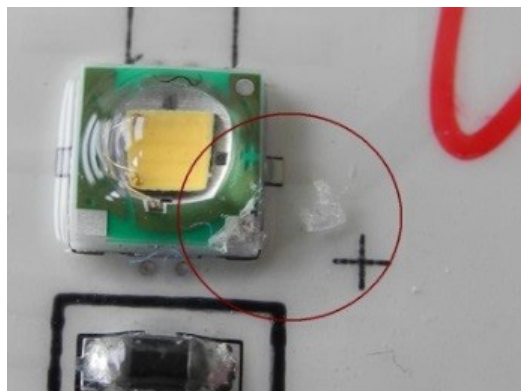
UV-kovetteinen akryyliuretaanilakka CC2 (led-tyyppi B)



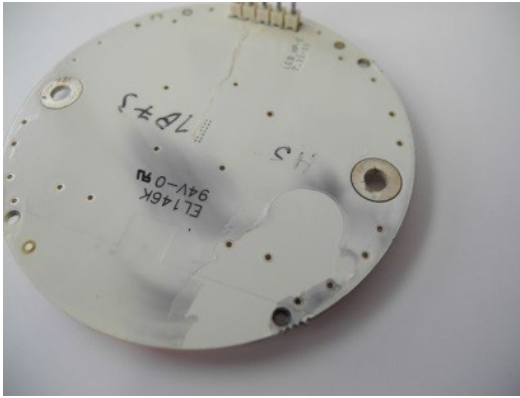
UV-kovetteinen akryyliuretaanilakka CC4 (led-tyyppi B)

Kuva 8. Havaitut lohkeamat akryyliuretaanilakkapinnoitteessa.

Kolmas akryyliuretaanilakalla pinnoitetussa ledissä havaittu lohkeama esitetään kuvassa 9, jossa lohkeaman lienee aiheuttanut tylppä mekaaninen isku esimerkiksi kuljetuksen aikana. Kysymys lienee tylpystä iskusta, koska esimerkiksi piikkirimaliittimen terävällä piikillä testattaessa lakkapintaan saadaan aikaan naarmuja, mutta ei kuvan kaltaista lohkeamaa. Kuvassa 10 esitetään led-levy, jossa levyn takasivun akryylipinnoite on suolasumutestin jälkeen osittain kuoriutunut pois. Pinnoite on kuoriutunut pois laajalta alueelta. Kuvassa näkyvää kuoriutunutta aluetta ei ole helppo laajentaa esimerkiksi mekaanisella raapimisella. On mahdollista, että kyseisellä kuoriutuneella alueella pinnoite ei alun perinkään ole ollut kunnolla kiinni, vaan piirilevyn pinnalla on ollut epäpuhtautena esimerkiksi rasvaa.



Kuva 9. Mahdollisen mekaanisen iskun aiheuttama pinnoitteen lohkeama led-komponentin kulmassa. Pinnoitteena UV-kovetteinen akryyliuretaanilakka CC2. Terävällä metallipiikillä akryyliuretaanipintaa raaputettaessa lakkapintaan tulee lohkeaman sijaan naarmu, joten kuvassa olevan lohkeaman lienee aiheuttanut jokin tylppä isku.






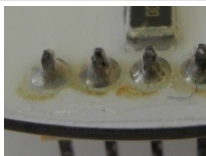






Kuva 10. Osittain kuoriutunut akryylipinnoite.

Pehmeä pinnoite on herkempi mekaaniselle kulutukselle, mutta pehmeä ja joustava pinnoite sallii pinnoitettujen komponenttien lämpölaajenemisen. Datalehden mukaan silikonin kovuus kuului Shore-kovuusasteikolla pehmeiden muovien luokkaan A kovuusarvolla A34. Dymaxin UV-kovetteisen lakan kovuus Shore-kovuusasteikolla kuului kovien muovien luokkaan D kovuusarvon ollessa D60. Pinnoitteen tarttuvuuteen piirilevyyn vaikuttaa muun muassa juotteenestopinnoitteen (JEP) tyyppi. Komponenttilevyn suojukseen käytettävä pinnoitelakka ja juotteenestopinnoite tulee valita toisiinsa yhteensopiviksi. Juotteenestopinnoitteen valintaa ei tule jättää yksin piirilevyvalmistajan tehtäväksi.

6.8 YMPÄRISTÖRASITUSTESTIEN JÄLKEEN HAVAITTU HAPETTUMINEN

Suolasumutestin ja toisaalta kosteus-lämpötestin (25...85 °C, 95 % RH) jälkeen havaittiin led-levyn piikkirimaliittimen ympärillä hapettumaa muilla paitsi akryyllillä pinnoitetuilla led-levyillä (taulukko 3). Akryyllillä pinnoitetut led-levyt olivat puhtaita hapettumista sekä suolasumutestin että toisaalta kosteus-lämpötestin jälkeen. Muilla pinnoitteilla (silikonilla sekä kolmen eri valmistajan akryyliuretaanilakalla) esiintyi piikkiriman ympärillä hapettumaa. Hapettuma oli mahdollisesti juoksutejäämien aiheuttamaa. Suolasumulle (5-prosenttinen suolaliuos) altistuneissa levyissä hapettumaa oli vähemmän kuin kosteus-lämpötestin jälkeen (taulukko 3). On merkillepantavaa, että kosteuslämpötesti on hapettumien muodostumisen kannalta ollut rankempi testi kuin suolasumutesti.

Taulukko 3. Pinnoitteet kosteus-lämpötestin jälkeen (piikkirima-komponentti).

Suolasumutestin jälkeen					
	lakka CC1 (silikoni)	lakka CC2 (UV-kovetteinen)	lakka CC3 (UV-kovetteinen)	lakka CC4 (UV-kovetteinen)	lakka CC5 (akryyli)
Kosteus-lämpötestin jälkeen					
	lakka CC1 (silikoni)	lakka CC2 (UV-kovetteinen)	lakka CC3 (UV-kovetteinen)	lakka CC4 (UV-kovetteinen)	lakka CC5 (akryyli)

Suolasumutestissä lämpötila on noin 35 °C, kun taas kosteus-lämpötestissä lämpötilaa muutettiin välillä 25...85 % °C suhteellisen kosteuden ollessa 95 % RH. Kosteus-lämpötestissä kosteus lienee ollut keskeinen seikka hapettumien syntymisessä ja lämpö lienee nopeuttanut hapettumien muodostumista. Suolaliuosta ei ole tarvittu hapettumien aikaan saamiseen, sillä juoksutteen jäämissä on luultavasti ollut riittävästi ionisia komponentteja. On mahdollista, että hapettumiseen vaadittava kosteus on siirtynyt ehjän lakkapinnan läpi, koska lakat tai muutkaan muovityyppiset aineet eivät ole hermeettisiä, vaan hyvälaatuisenkin lakka läpäisee aina jonkin verran vettä. Lakkapinnan alle jääneet juoksitejäät saattavat olla hygroskooppisia, jolloin ne imevät itseensä kosteutta. Akryylilakan ero muihin pinnoitteisiin oli se, että akryylilakka sisälsi liuottimina käytettyjä haihtuvia orgaanisia yhdisteitä 65 %. Muut testatut lakat eivät sisältäneet liuottimia. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden käyttöä pyritään vähentämään ympäristösyistä. On kuitenkin mahdollista, että tässä tapauksessa akryylilakan sisältämät liuottimet liuottivat juoksitejänteet pois ja siksi hapettumia ei havaittu akryylilakalla lakatuissa levyissä.

Piirilevyjä lakattaessa esitetään usein kysymys, tulisiko piirilevyt pestä ennen lakkausta. Pesemisellä voidaan vähentää juoksitejäämien lisäksi piirilevyllä olevien muiden epäpuhtauksien määrää. Piirilevyille saattaa jäädä sormenjäljistä rasvaa ja suoloja tai piirilevyn päälle saattaa laskeutua pölyä ja muita kuituja tai partikkeleita. Pesemisestä aiheutuu kuitenkin kustannuksia, ja tuotantokustannuksissa on saavutettavissa merkittäviä säästöjä, jos pesua ei käytetä. Testatuissa levyissä juotepastalla juotetuissa komponenteissa ei havaittu korroosiota, vaikka levyjä ei pesty tai muuten puhdistettu ennen lakkausta. Sen sijaan eri juotteella juotetuissa piikkirimaliittimissä on havaittavissa korroosiota käytettäessä liuotinvapaita lakkoja. Liuotinta sisältävällä akryylilakalla pinnoitetuissa levyissä korroosiota ei havaittu. Tehdyt testit osoittavat, että piirilevyjen peseminen ei ole välttä-

mätöntä ennen lakkausta. Mikäli pesua ei käytetä ennen lakkausta, tulee piirilevyt kuitenkin testata ympäristöolosuhdetestien avulla sen varmistamiseksi, että tuotantoprosessissa lakan alle ei jää korrosoivia aineita. Piirilevyjen riittävästä puhtaudesta ja juoksutejäämien riittävän vähäisestä määrästä tulee varmistua ennen lakkausta. Tarvittaessa on mahdollista käyttää puhtauden määrittämiseen niin kutsuttuja puhtaustestejä, jotka perustuvat pinta-resistanssin mittaukseen (surface insulation resistance test), tai mitata sähkönjohtokyky aineesta, johon testipiirilevyn epäpuhtaudet on liuotettu (ionic contamination test). Eri-tyisen suurta luotettavuutta edellyttävän elektroniikan valmistuksessa piirilevyt on syytä pestä joka tapauksessa ennen lakkausta, koska vähäinenkin korrosio tai pintojen epäpuhtaus voi tietyissä tapauksissa olla tuhoisaa laitteen toimivuudelle.

6.9 OPTISET MITTAUKSET ENNEN YMPÄRISTÖRASITUSTESTEJÄ JA NIIDEN JÄLKEEN

Pinnoitteiden ympäristörasitustestien optisten muutosten vaikutusta ledien valojakaumaan selvitettiin mittaamalla valojakauma ennen rasitustestejä ja niiden jälkeen. Ennen rasitustestejä valaisujakaumaa mitattiin käyttäen siirtopöytää, diffuusioheijastinta ja Minolta CS2000 -spektroradiometriä. Rasitustestien jälkeen samanlaista mittausjärjestelyä ei ollut mahdollista järjestää, joten jakauman mittaukseen käytettiin BTS256 -led-testeriä. Visuaalisesti tarkasteltuna havaittiin osan pinnoitteista muuttuneen kirkkaasta varsin selvästi kellertäviksi. Pinnoitteen värin muutos mitattiin vertaamalla led-levyjen heijastusspektrejä kirkkaan ja kellastuneen pinnoitteen läpi. Saatua läpäisykäyriä hyväksikäyttäen saatiin laskettua kyseisen kellertävyysmuutoksen vaikutus ledien valojakaumiin. Laskennallinen muutos sekä värilämpötilaan että värikoordinaatteihin oli varsin merkittävä. Mitatuissa spektreissä muutokset ennen rasitustestejä ja niiden jälkeen olivat kuitenkin hyvin marginaalisia. Tämän tuloksen pohjalta heräsi ajatus siitä, voisiko suuri valoteho ledin kohdalla aiheuttaa optisen valkaistumisen (optical bleaching) kellertyneeseen pinnoitteeseen. Kellertävyys pinnoitteessa muuttaa läpäisy-spektriä siten, että lyhyet aallonpituudet absorboituvat muita tehokkaammin pinnoitteeseen. Toisaalta tässä tutkimuksessa käytettyjen ledien ulostulo muodostuu sinisestä ledistä ja sitä päällystävästä fluoresoivasta materiaalista, joten lyhyen aallonpituuden fotoneja on ledin ulostulospektrissä eniten.

Koska ledin pinnalta materiaalin mahdollinen valkaistuminen oli mahdoton selvittää, tehtiin seuraavanlainen koejärjestely. Maskia käyttäen laitettiin led palamaan lähelle kellastuneen levyn pintaa. Tällöin saatiin kellastuneeseen pinnoitteeseen kohdistumaan suuruudeltaan ledin pinnalla olevan säteilytehon kanssa samaa suuruusluokkaa oleva teho. Vaikka valotuksessa käytettiin pitkäaikaistesteissä käytettävää virtaa selvästi pienempää virtaa, havaittiin jo muutaman tunnin valotuksen jälkeen pinnoitteen selvä valkaistuminen. Valkaistuminen näkyi kellastuneimmista levyissä paljaalla silmällä ja se todettiin myös mittauksella. Valkaistuminen tapahtui kaikilla käytetyillä pinnoitteilla, joissa kellastumista oli havaittavissa. Tulos selvitti, miksi odotettuja muutoksia ei näkynyt ledin värilämpötilassa eikä värikoordinaateissa. Kellastuminen aiheuttaa vain esteettisen haitan, mutta ei muuta varsinaista ledin ulostuloa.

7 Lämmönhallinta

Lauri Turunen, Karelia-ammattikorkeakoulu

Henri Montonen, Elina Havia, Mikkelin ammattikorkeakoulu

Ledien elinikään vaikuttaa merkittävästi ledin ja sen ympäristön lämpötila. Led-elementin lämpötila olisi pyrittävä pitämään mahdollisimman alhaisena, jotta ledin käyttöikä olisi pitkä. Ledissä syntyvän lämmön pois johtamiseen on monia erilaisia jäähdytysratkaisuja. Käytännössä lämpö siirtyy ledistä suuremmalle pinnalle ja sitä kautta ilmaan. Tyypillisimmät jäähdytysratkaisut sisältävät ledin lämmön johtamista piirilevykuparointiin, joka yksin tai alumiinisiilin avulla tehostettuna siirtää lämpöä edelleen ilmaan. Tässä luvussa käydään läpi ledien lämmönhallintaa lämpösimuloinnin sekä lämpöä johtavan putken ja muovin kautta.

7.1 LÄMPÖSIMULOINTI LED-PIIRILEVYLLE

Lauri Turunen

Yhtenä projektin osa-alueena oli tuotekehityksen tukena käytettävän lämpösimulointiosaamisen kehittäminen. Lämpösimuloinnissa tuote mallinnetaan lopulliseen muotoonsa ja siihen laitetaan vaikuttamaan kaikki tekijät, jotka vaikuttavat tuotteen toimintaan ja elinikään. Tällaisia tekijöitä ovat esimerkiksi tuotteeseen kohdistuva teho, ympäristön olosuhteet ja materiaalit sekä niiden väliset kontaktipinnat. Näin tuotetta pystytään simuloimaan sen loppukäyttökohteessa jo tuotekehitysvaiheessa ennen lopullista versiota. Simuloinnin tarkoituksena on havaita, onko ledille suunniteltu jäähdytys riittävän tehokas siirtämään lämpöä pois, jotta led-elementin lämpötila ei pääse nousemaan liian korkeaksi. Led-sovelluksissa on erittäin tärkeää, että lämpö saadaan siirrettyä mahdollisimman tehokkaasti pois ledin luota, jotta sen valoteho ja elinikä eivät kärsisi. Lediltä lämpö siirtyy jäähdyttävään rakenteeseen johtumalla. Jäähdytysrakenteesta lämpö siirtyy ympäristöön kahdella tavalla: konvektion kautta ja pinnalta säteilemällä. Alle 150 °C:n lämpötiloissa konvektio on määräävä verrattuna säteilyn kautta tapahtuvaan lämmönsiirtoon.

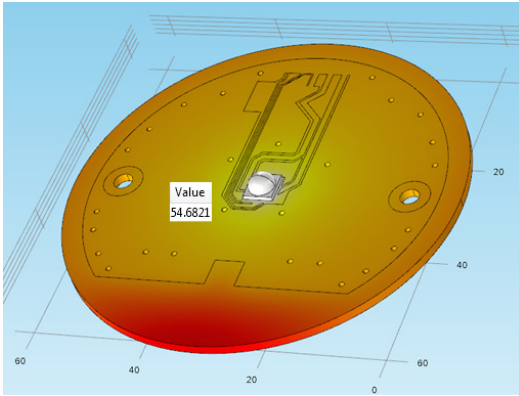
Tässä työssä tarkoituksena oli simuloida elinikätesteissä olevaa lediä ja verrata saatuja simulaatiotuloksia lämpökameralla ja termoparilla saatuihin tuloksiin. Tällä selvitettiin, pystytäänkö led-tuote mallintamaan niin, että simulaatioihin voisi luottaa tulevilla mallinnuksissa ja käyttää niistä saatua tietoa apuna tuotesuunnittelussa. Simulointikohteeksi valittiin elinikätestissä ollut led-malli (led B) ja simulointiohjelmistona käytettiin Comsol Multiphysics 3.4 -ohjelmaa.

Työ aloitettiin mallintamalla 3D-suunnitteluohjelmistolla tarkka malli ledistä ja piirilevystä. FR4-piirilevyn (lasikuituvahvistettu epoksilaminaatti) pinnassa on molemmin puolin ohut kuparoitu kerros sekä kuparoituja reikiä lämmön siirtymisen tehostamiseksi. Haastavin vaihe oli saada ohut 70 µm:n kuparikerros mallinnettua niin, että se toimisi simulaatiossa oikein. Lopulta kuparointi mallinnettiin pintana ja simulointiohjelmistossa sille määritettiin laskennallinen paksuus. Led-moduuli mallinnettiin led-elementistä lähtien, jotta lämpö saataisiin tuotettua rakenteeseen mahdollisimman realistisesti. 3D-mallin valmistuttua se siirrettiin lämpösimulointiohjelmistoon, jossa siihen asetettiin tarvittavia määrittämiä, kuten materiaalit, ledin teho, ympäristön lämpötila ja konvektiokertoimet. Ledin tehosta noin 75 % muuttuu lämmöksi ja loput valoksi. Tässä tapauksessa ledin lämpöä aiheuttava teho oli noin 2,3 wattia. Lämpösimulointiohjelmisto laski automaattisesti konvektiokertoimet levymäiselle kappaleelle.

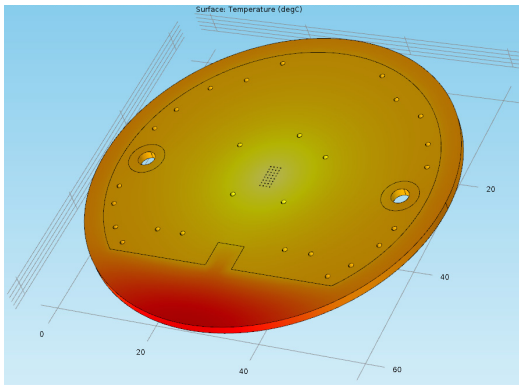
Näiden määritysten jälkeen simulaatio ajettiin staattisena läpi. Staattisessa testissä tulokseksi saadaan lämpötilojen suhteen tasapainotila. Tällöin mikään kohta tuotteesta ei enää lämpene eikä viilene vallitsevissa olosuhteissa. Tällä piirilevyllä tuo aika oli noin 20 minuuttia. Tuloksena saatiin tuotteen lämpökuvat (kuvat 1, 2 ja 3). Saatuja arvoja verrattiin termistorilla ja lämpökameralla mitattuihin arvoihin, ja tuloksia voidaan pitää melko hyvänä. Termistorista saadut arvot poikkesivat tuloksista vain noin 1–2 °C, lämpökameralla mitatut hieman enemmän (6–7 °C). Kuvaan 3 on merkitty tuotteesta olevan termistorin paikan lämpötila (54,7 °C). Termistorin tuotteesta mitaama oikea lämpötila on kyseisessä kohdassa 56 °C.



Kuva 1. Poikkileikkaus led-piirilevystä. Kuvassa näkyy, kuinka ledin vieressä oleva kuparointi lähtee viemään lämpöä tehokkaasti vasemmalle.



Kuva 2. Piirilevyn valmis 3D-malli ja lämpökuva päältäpäin katsottuna. Kuvassa osoitettu nuolella termistorin kohdan simuloitu lämpötila (54,7 °C).



Kuva 3. Piirilevyn simuloitu lämpökuva alaspäin katsottuna. Suoraan ledin alla olevat reiät ovat merkittävässä asemassa lämmönsiirrossa levyn toiselle puolelle.

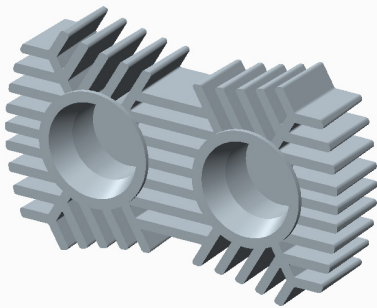
Yleisesti ottaen voidaan todeta, että tuotteen huolellisella lämpösimuloinnilla voidaan selvittää, onko tuotteelle suunniteltu jäähditys riittävä. Jos lopullinen käyttökohde ja siellä vaikuttavat ympäristötekijät ovat tiedossa, voidaan lämpösimuloinnin avulla päästä simuloimaan tuotetta sen lopullisessa sijoituspaikassa. Simulointi säästää aikaa tuotteen kehityksen aikana ja siinä pystytään keskittymään tuotteen toiminnallisuuksien kannalta tärkeisiin asioihin. Tässä testauksessa ollut piirilevy oli siinä mielessä helpohko simuloitava, että siinä ei ollut varsinaisia jäähdytysripoja, joissa tapahtuu pinnalta pinnalle säteilyä. Lisäksi tässä testissä ei tarvinnut ottaa huomioon esimerkiksi muuttuvaa tuulta tai vaihtelevia ympäristön lämpötiloja. Tällöin simuloinneista tulee huomattavan raskaita ja huomioon otettavia asioita on paljon enemmän. Luvun 7.2 lopussa on näistä sekä muista simulaatioiden epävarmuustekijöistä lisää pohdintaa.

7.2 LÄMPÖÄ JOHTAVAN MUOVIN TESTAUS

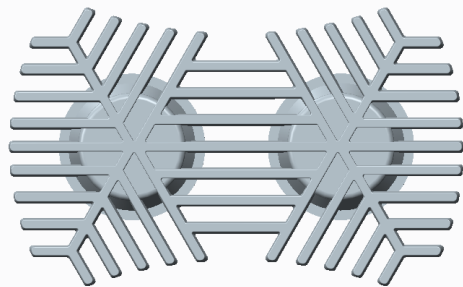
Lauri Turunen

Perinteisesti valaisimien ja tietoteknisten komponenttien jäähdytyksessä käytetään alumiinia tai kuparia niiden hyvien lämmönjohto-ominaisuuksien vuoksi (alumiinin lämmönjohtavuuskerroin ~ 235 W/mK, kuparin ~ 400 W/mK). Materiaalien kehittyessä myös muovimateriaalit ovat nousseet varteenotettavaksi vaihtoehdoksi. Muoviin sekoitetaan tyypillisesti alumiinioksidia tai hiilikuitua lämmönjohtavuuden parantamiseksi. Alumiinioksidilla saavutetaan kaikkiin suuntiin yhtäläinen lämmönjohtavuus, kun taas kuitumaisella täytteellä pinnan suuntainen lämmönjohtavuus on moninkertainen kohtisuoraan pintaan verrattuna. Pienitehoisissa valaisimissa muovia on jo käytetty ledien aiheuttaman lämmön siirtämiseen ympäristöön, mutta teholedien kohdalla muovien alhainen lämmönsiirtokyky aiheuttaa vielä ongelmia. Muovista valmistetun jäähdytyksen etuna on kompleksisemmän jäähdytysrakenteen helpompi sarjatuotanto esimerkiksi ruiskuvalamalla.

Jotta saataisiin selville, kuinka hyvin muovi toimii lämpöä johtavana materiaalina ledsovelluksissa, suunniteltiin lampun runko, joka voitaisiin ruiskuvalaa. Rungon muotoa suunniteltaessa tehtiin useita lämpösimulaatioita erilaisille malleille ja päädyttiin kuvan 4 mukaiseen hiutalemalliin. Kuvassa 5 näkyy, kuinka hiutalemuodon keskikohta on juuri ledien alla, jolloin lämpö lähtee johtumaan kauemmaksi kuumalta alueelta. Lisäksi muoto on hyvin avonainen, jotta jäähdyttävää pinta-alaa olisi mahdollisimman paljon. Erityisesti liikkeessä (mm. ajovalokäytössä) tällainen rakenne jäähdyttää tehokkaasti, sillä ilmavirta pääsee monelta eri suunnalta sivuuttamaan kuumaa aluetta ja viemään lämmön pois.



Kuva 4. Led-lampun 3D-malli.



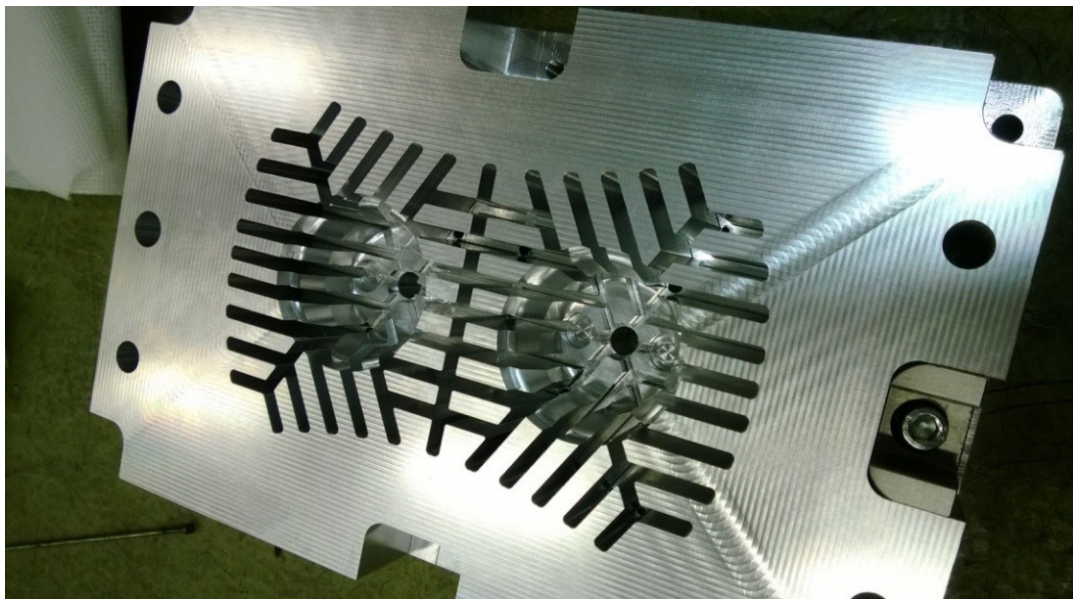
Kuva 5. Led-lamppu takaa.

Materiaaliksi valittiin kaksi eri versiota hiilikuidulla täytetystä PA6/6-muovista. Toisen, paremmin lämpöä johtavan lämmönjohtavuuskerroin on pinnan suunnassa 32 W/mK ja toisen 4 W/mK. Pintaan kohtisuoraan nähden vastaavat luvut ovat $6,3$ ja $1,3$ W/mK. Kuitumainen lisäaine orientoituu ruiskuvaltaessa sularintaman etenemissuunnan mukaisesti, tässä tapauksessa tuotteen keskeltä ruiskutettaessa lähes optimaalisesti hiutalemuodon keskikohdasta ulospäin. Valaisimen komponenteiksi ostettiin kuvan 6 mukaiset kolmen teho-ledin alumiinipiirilevy ja ledien ohjaukseen suunniteltu ohjauksyksikkö. Lisäksi lämmönsiirtoa tehostamaan koneistettiin led-levyn alle tuleva alumiinikielke. Tuotteen 3D-mallin pohjalta valmistettiin Karelia-ammattikorkeakoululla alumiininen muotti, jolla va-

laisimen runkoja pystytettiin ruiskuvalamaan (kuva 7).



Kuva 6. Led-levy, sen alle tuleva alumiinikiekko sekä ohjausyksikkö.

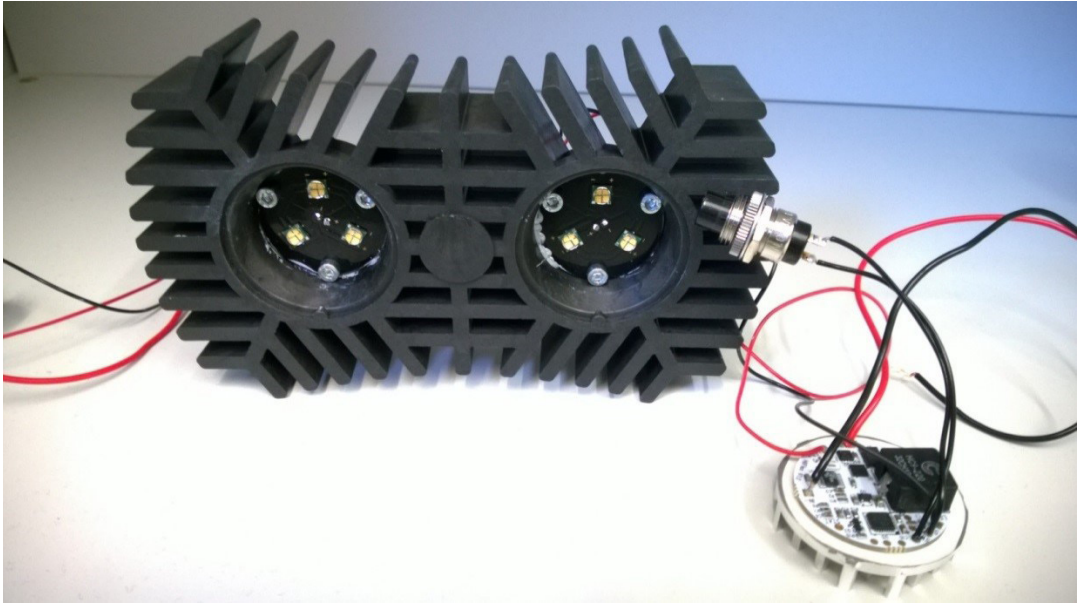


Kuva 7. Led-valaisimen rungon ruiskuvalumuotin toinen puolisko.

Ensimmäiset kappaleet ruiskuvalettiin paremman lämmönjohtavuuden omaavasta materiaalista, joka osoittautui aivan liian jäykäksi tullakseen muotista rikkoontumatta ulos. Koska ruiskuvalu onnistui toisella, lämmönjohtavuudeltaan heikommalla materiaalilla, molemmista materiaaleista tehtiin 50:50-seos. Tällä seossuhteella ruiskuvalu onnistui ja tarvittava määrä valaisimen runkoja saatiin valmistettua. Huonona puolena seostamisessa oli materiaalin jo valmiiksi alhaisen lämmönjohtavuuden laskeminen entisestään.

Kokoonpanovaiheessa ohjausyksiköltä led-levyyn menevät johdot juotettiin ja kupin pohjalle kiinnitettiin alumiinikiekko, jonka päälle led-levy ruuvattiin. Molempien liityntä-

pintojen väliin laitettiin lämpöä johtavaa tahnaa. Lamppuun suunniteltu linssi ei ehtinyt mukaan, mutta lämmönkestotestissä sen puuttumisella ei ole suurta merkitystä. Kuvassa 9 nähdään valmis led-valaisimen kokoonpano.



Kuva 9. Kokoonpantu led-lamppu. Etualalla jäähdytys­siiliin kiinnitetty ohjauksyksikkö sekä ohjau­spainike.

Led-komponenttien toimittajan ilmoittama maksimivaloteho yhdelle kolmen ledin kokoonpanolle on 3 000 lumenia. Tällainen valoteho vaatisi ledien ajamista lähes kolmen ampeerin virralla, jolloin myös lämmöntuotto olisi hyvin korkealla tasolla. Valmistajan ledille ilmoittama maksimilämpötila on 150 °C (ledin valaisevassa osassa, eli puolijohteessa) ja tätä myös pidettiin testauksessa ehdottomana raja-arvona. Tuon lämpötila-arvon kautta päästiin kiinni myös valaisimen taustan maksimilämpötilaan, jota lämpökameralla kuvattaisiin.

Led-valmistajan ilmoittama lämpöresistanssi ledin puolijohteen ja ledin kiinnityspinnan välillä on 2,5 W/°C. Yhden ledin lämmöksi muuttuva teho on n. 5,6 W. Näiden arvojen perusteella saadaan laskettua lämpötilaero ledin ja sen kiinnityspinnan välille kaavalla

$$T_j - T_c = R_{th} * P_t$$

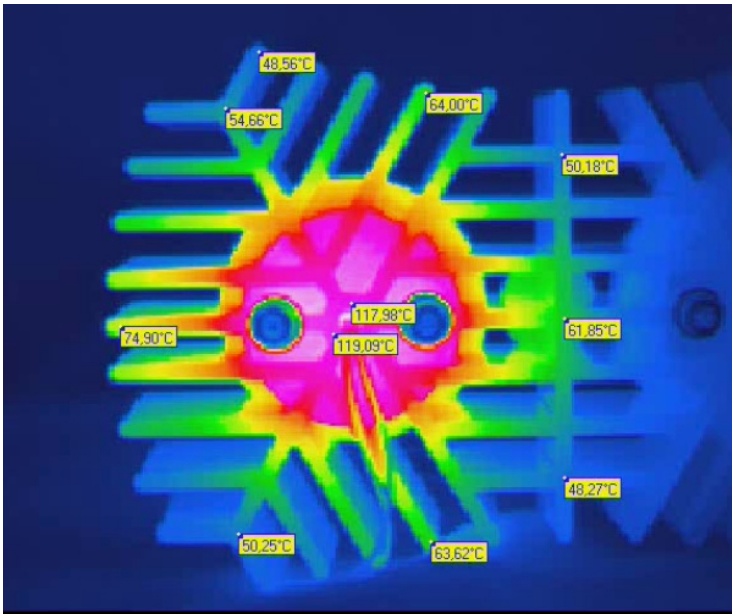
joten lämpötilaeroksi saadaan,

$$T_j - T_c = 2,5 \frac{W}{^\circ C} * 5,6 W = 14^\circ C$$

Valaisimelle tehdyistä lämpösimulaatioista pystyttiin havaitsemaan, että ledien alla olevan alumiinin ja valaisimen taustan lämpötilaero on noin 5°C. Taustan maksimilämpötila, jota testauksessa lähdettiin tavoittelemaan mutta ei ylittämään, oli siis:

$$150^\circ C - 14^\circ C - 5^\circ C = 131^\circ C$$

Testausvaiheessa valaisinta pidettiin päällä ja sen taustaa kuvattiin samanaikaisesti lämpökameralla niin kauan kunnes valaisin saavutti tasapainotilan lämpötilan suhteen. Testit osoittivat, että 1,3 ampeerin virralla ajettaessa kuoren lämpötila nousi n. 120 asteeseen (kuva 10). Tätä suuremmilla virta-arvoilla taustan maksimilämpötila nousi jo yli rajan, joten 1,3 ampeerin virtatasoa pidettiin maksimina, jolla lamppua voidaan sitä rikkomatta käyttää. Testaus suoritettiin sisätiloissa laboratorio-oloissa. Itä-Suomen yliopiston värilaboratoriossa suoritettu valotehomittaus osoitti, että 1,3 ampeerin virralla valaisimen puolikas saavuttaa n. 1 300 lumenin valotehon. Tämän perusteella voidaan arvioida, että tällä jäähdysmateriaalilla saavutetaan noin 40 % ledeille ilmoitetusta maksimivalotehosta.



Kuva 10. Lämpökamerakuva led-valaisimesta. Kuvaan on merkitty rakenteen eri kohtien lämpötiloja (°C).

Huomioitavaa on se, että testissä päällä pidettiin vain valaisimen toista puolikasta, joten molempia puoliskoja ajettaessa lämpökuorma lisääntyy. Toisaalta valaisin suunniteltiin ulkokäyttöön, jossa mm. tuuli ja ajon aiheuttama ilmavirta viilentävät rakennetta tehokkaasti. Tällöin valaisinta voidaan todennäköisesti ajaa myös korkeammilla virtatasoilla. Valaisimelle tehtiin myös useita lämpösimulaatioita ja huomattiin, että tällaisen monimutkaisemman rakenteen simulaatiotulosten saaminen vastaamaan todellisuutta on huomattavasti haastavampaa kuin esimerkiksi luvussa 7.1 esimerkkinä käytetyn led-piirilevyn. Haasteita ja epätarkkuuksia simulointiin toivat muun muassa

- » anisotrooppisen materiaalin lämmönjohtavuuden suuntautuminen riippuen sula rintaman suunnasta
- » erilaiset konvektiokertoimet eri kohdissa rakennetta (vrt. jäähditysriivan pää ja kupin pohja)
- » lämpöä johtavan tahnan mallintaminen (todellisuudessa tahna ei levity tasaisesti joka puolelle)
- » jäähditysriipojen toisiinsa säteilemä lämpö, jota ei otettu huomioon (nk. surface-to-surface-säteily)
- » pinnan emissiivisyyden vaihtelu (vaikutus lämpökameran vertailutuloksiin)
- » testihuoneen ilmastoinnin aiheuttamat ilmavirrat (jäähdyttävä vaikutus, simulaatioissa täysin tasalämpöinen ja tuuleton ympäristö).

Jatkotoimenpiteinä valaisimesta olisi hyvä tehdä edellä mainitut seikat huomioon ottaen lisää simulointeja ja testauksia. Valaisimesta voisi valmistaa myös alumiinisen version, jolloin voitaisiin verrata identtisten, mutta lämmönjohtavuudeltaan erilaisten rakenteiden lämpökäyttäytymistä. Lisäksi lämpöä johtavalle muoville tulisi tehdä testejä, joissa selvittäisiin ruiskutuksen suunnan merkitys lämmönjohtavuudelle.

7.3 LÄMPÖPUTKEN TESTAUS

Henri Montonen

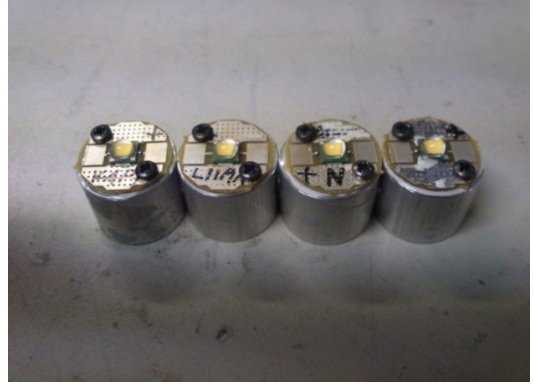
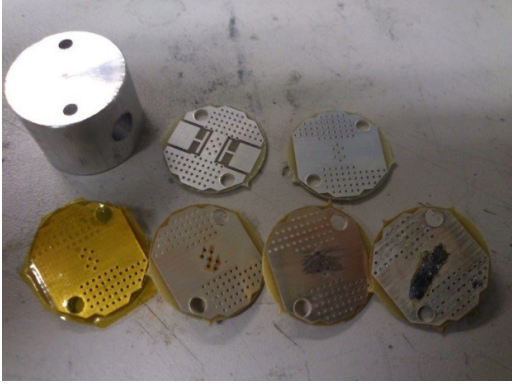
Faasimuutokseen perustuvia lämpöputkia (heat-pipe) käytetään yleisesti tietokoneiden jäähdytyksessä ja lämmönsiirrossa. Lämpöputken lämmönsiirto-ominaisuuksia sovellettiin myös led-valaisinten jäähdytykseen. Lämpöputken datalehden mukaan testatun lämpöputken lämmönsiirtokyky on 50 wattia.

Taulukossa 1 esitetään lämpöputken pinnalta mitattuja lämpötiloja, kun putki on 'oikeinpäin', jolloin lämmönsiirtofluidin eli lämpöputken höyrystymispää sijaitsee alempana kuin lämpöputken tiivistymispää. Taulukossa on esitetty myös mitatut lämpötilat päinvastaisesta 'ylösalaisin'-tapauksesta, jossa putken tiivistymispää on alempana kuin höyrystymispää. Lämpöputken ollessa ylösalaisin oli lämpöero hieman suurempi eli lämpöputki ei johtanut silloin lämpöä aivan yhtä tehokkaasti kuin oikeinpäin sijoitettuna. Ylösalaisinkin sijoitettu lämpöputki siirsi lämpöä huomattavasti tehokkaammin kuin esimerkiksi vastaava kuparista valmistettu putki.

Taulukko 1. Lämpöputken pinnalta mitattuja lämpötiloja, kun putkea lämmitettiin pienellä teholla.

lämpöputken asento	mitattu lämpötila lämpöputken ulkopinnalta [C]		höyrystymis- ja tiivistymispään välinen lämpöero
	höyrystymispäässä	tiivistymispäässä	
oikeinpäin, tarkkailuhetki nro 1	40,8	41,5	0,7
oikeinpäin, tarkkailuhetki nro 2	40,5	41,4	0,9
ylösalaisin	40,2	41,6	1,4

Lämpöputken mittauksissa oli käytössä piirilevyille eri tavoin juotettuja ledejä. Mukana oli muun muassa versiot, joissa on tavallista enemmän juotepastaa lämmönsiirtoa parantamaan ja toisaalta versiot, joissa ledin alla oleviin läpivientireikiin oli estetty juotteen kulkeutuminen, mikä heikentää lämmönsiirtymistä (kuva 11). Piirilevyt ruuvattiin alumiinitankoihin, joissa oli sopivankokoinen reikä lämpöputkelle. Piirilevyn ja alumiinitangon väliin laitettiin lämmönjohtotahnaa.



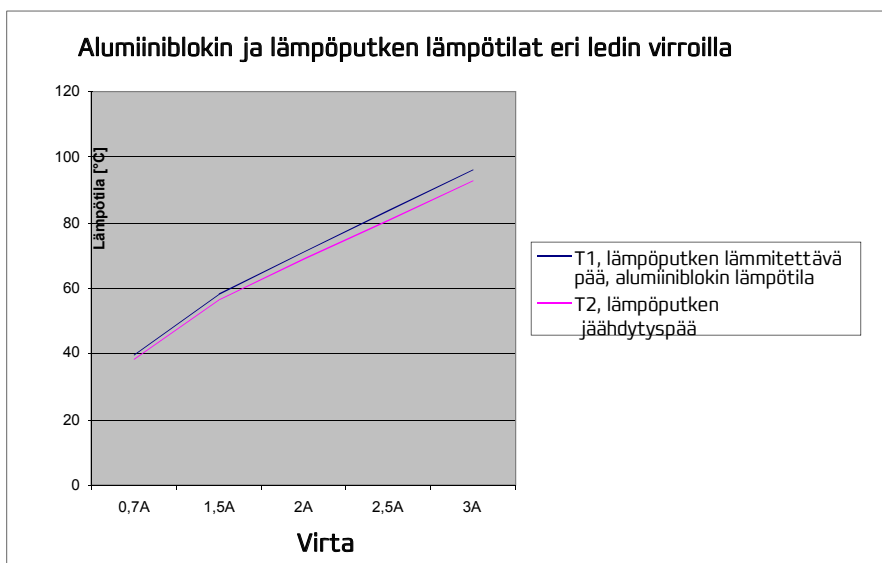
Kuva 11. Ledit juotettuna testipiirilevyille. Kahdessa vasemmanpuoleisessa levyssä juotteen leviämistä läpivienteihin on rajoitettu teippaamalla tai liimalla (normaali pastamäärä). Oikeanpuoleisin levyistä on juotettu normaalia suuremmalla pastamäärällä ja näin on saatu läpiviennit täysin täytettyä juotteella. Toinen oikealta on normaalilla pastamäärällä juotettu levy.

Kaikissa mittauksissa käytettiin samaa lämpöputkea. Ledin virta eri testikappaleissa oli 700 mA ja se syötettiin laboratoriovirtalähteestä. Lämpötila mitattiin (kuva 12) ledin lähelle alumiinikappaleeseen sijoitetusta lämpöputken päästä sekä lämpöputken toisesta päästä, joka sijaitti vapaassa ilmatilassa.

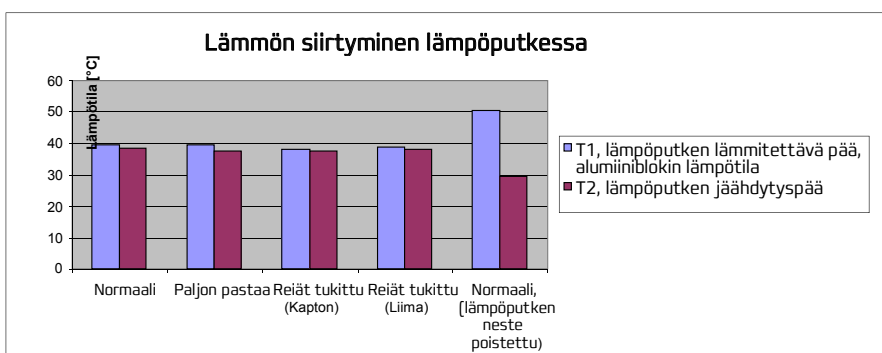


Kuva 12. Lämpötilan mittaus kahdella termoparilla; termopareista T_1 on kiinnitetty alumiiniblokkiin ja T_2 lämpöputken toiseen päähän.

Erilaisilla juotostavoilla ei havaittu olevan vaikutusta lämmönsiirtymiseen, koska lämmönsiirtyminen ledistä piirilevyn kautta alumiinikappaleeseen oli kaikissa tapauksissa tehokasta. Lämpöputken havaittiin olevan tehokas lämmönsiirtäjä. Mitattu lämpötila putken molemmissa päissä oli parin asteen tarkkuudella sama. Lämpöputken lämmönsiirtokapasiteetti oli hyvä myös käytettäessä suurempia ledin virtamääriä (kuva 13). Kun lämpöputken tehtiin reikä ja poistettiin lämmönsiirtoneste putken sisältä, kasvoi putken päiden välinen lämpötilaero 20°C:seen (kuva 14). Lämmönsiirtonesteen faasimuutokseen perustuvan lämpöputken todettiin olevan tehokas lämmönsiirtäjä. Lämpöputkea käytettäessä täytyy kuitenkin ratkaista se, miten lämpö siirretään edelleen pois putken toisesta päästä.



Kuva 13. Lämpöputki pystyy tehokkaasti siirtämään lämpöä. Lämpöputken haihdutuspuusssä ei kuitenkaan ole jäähdytyspiiliä. Siksi lämpötila nousee korkeaksi. Ledin 3 A:n virta vastasi 10 W:n tehoa. Käytetyn lämpöputken lämmönsiirtokyvyksi oli ilmoitettu 50 W.



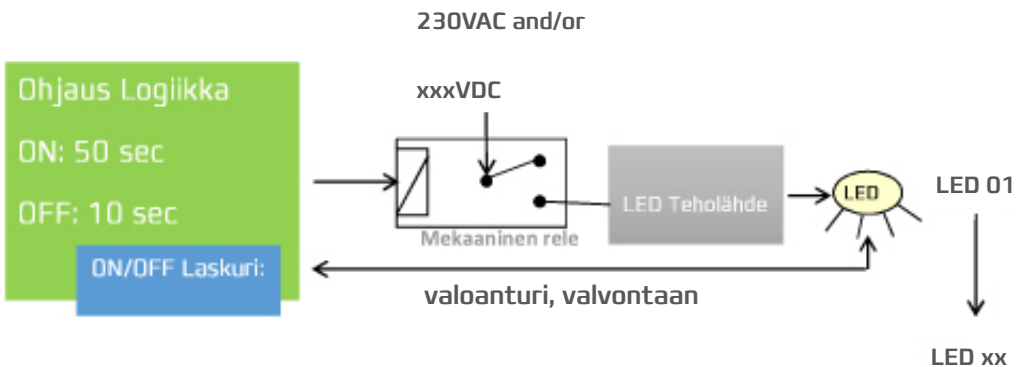
Kuva 14. Lämmön siirtyminen lämpöputkessa. Erilaiset liitosmenetelmät. Vertailukohtana viallinen lämpöputki eli kupariputki.

8 Led-lamppujen päälle-pois-testaus

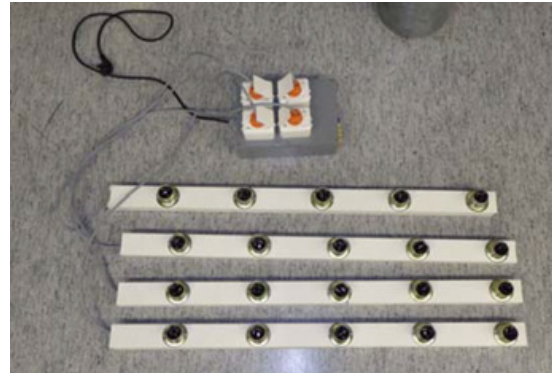
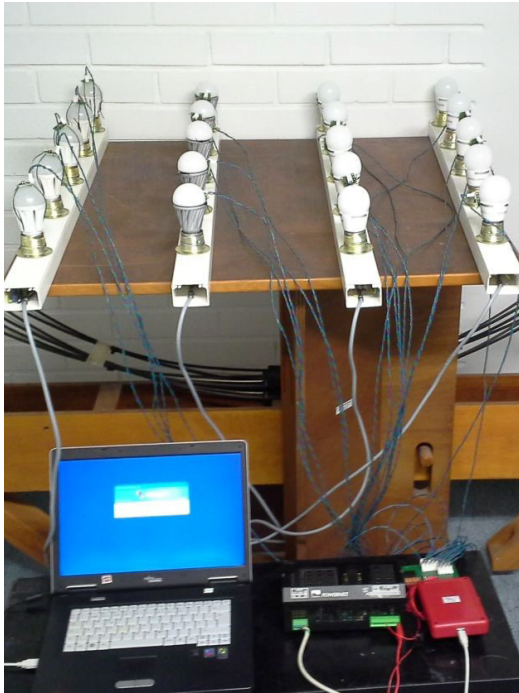
Elina Havia & Henri Montonen, Mikkelin ammattikorkeakoulu

Markkinoilla on monenlaisia E27-kantaisia led-lamppuja, jotka ovat suurelta osin syrjäyttämässä nykyisin yleisiä energiansäästö-loistepolttimoita sekä hehku-lamppuja. Led-lampun hyvä ominaisuus verrattuna energiansäästö-loistelamppuun on sen välitön syttyminen täyteen valovoimaansa. Led-lamput sisältävät elektroniikkaa, ja sen luotettavuutta päätettiin tutkia päälle-pois-testillä. Led-lamppujen elinikä on pitkä, mutta se saattaa lyhentyä huomattavasti ohjauselektroniikkaa rasittavien päälle-pois-sykylien lisääntyessä. Testin tarkoituksena oli arvioida led-lamppujen teholähteiden kestämiä kytkentäsykylien määrää. Oletuksen mukaan virtalähde vikaantuu toistuvista kytkennöistä aikaisemmin kuin led-siru.

Testattavaksi valikoitui neljä erilaista led-lamppua eri valmistajilta (Lamp 1, Lamp 2, Lamp 3, Lamp 4). Testijärjestelmä koostui tietokoneohjelmistosta, ohjauslogiikasta sovitinkortteineen, relelaatikosta, led-valokiskoista sekä valoantureista. Testijärjestelmän valosensoirit tallentavat tiedon, miten pitkään kukin led-lamppu sietää päälle-pois-kytkentöjä. Kytkentään käytetään elektronisen releen sijaan mekaanista relettä, joka vastaa paremmin normaalin valokytkimen toimintaa (kuvat 1 ja 2).



Kuva 1. Yksinkertaistettu testilaitteisto päälle-pois-testaukseen.



Kuva 2. Testijärjestely. ON-OFF-testerin 230VAC-ohjausyksikkö, 4 x 5 kpl E27-lamppukannat ja relelaatikko jossa 4 x 20 A:n releitä.

Led-lampuilla on taipumus kumentua käytön aikana. Led-lampun kanta saattaa kuumentua niin kuumaksi, ettei siihen voi koskea käsin. Jos päälläoloaika on kovin lyhyt, ei led-lamppu välttämättä ehdi kumentua normaalia käyttöä vastaavaan lämpötilaan. Tämän vuoksi poispäältäoloaika määriteltiin sellaiseksi, että lamppu ei ehdi liikaa jäähtyä. Päälle-pois-testissä riittää lyhytkin poispäältäoloaika. Led-polttimoita rasiitettiin syklillä, jossa ledit ovat päällä 50 s ja pois päältä 10 s. Tällöin lamppujen lämpötila saadaan pidettyä suhteellisen korkeana, mikä rasittaa elektroniikkaa sekä valodiodeja. Syklejä tulee päivässä 1 440 ja viikossa 10 080.

Taulukko 1. Led-lamppujen lampunkannan huippulämpötila testin aikana.

	Mitattu lampunkannan lämpötila lampun palaessa	
	Lamppu päällä yhtä-jaksoisesti	50 sec on, 10 sec off
Lamp 1	80 °C	76 °C
Lamp 2	82 °C	77 °C
Lamp 3	66 °C	62 °C
Lamp 4	64 °C	62 °C

8.1 LED-LAMPPUJEN PÄÄLLE-POIS-TESTAUKSEN TULOKSET

Kaikki led-lamput kestivät 200 000 sykliä, minkä jälkeen yksi Lamp 1 lakkasi toimimasta. Datalehdessä kyseisen lampun oli ilmoitettu sietävän miljoona sytytyskertaa. Kaikki muut polttimot toimivat vielä 450 000 syklin kohdalla.

LIITE A: TM-21:n mukainen raporttitaulukko (soveltuvin osin) 1(2)

$T_{a,1}$ [$^{\circ}C$]	55
$T_{a,1}$ [K]	328,15
α_1	-7,322E-05
B_1	0,2475
$T_{a,1}$ [$^{\circ}C$]	85
$T_{a,1}$ [K]	358,15
α_2	-5,515E-05
B_2	-0,3816
E_a/k_B	-1110
A	2,486E-06
B_0	9,352E-01
$T_{a,1}$ [$^{\circ}C$]	25
$T_{a,1}$ [K]	298,15
α_i	1,029E-04
Projected $L_{70}[9 kh]$	2815
Reported L_{70}	>500

Description of LED	LED A
Sample size	20
Number of failures	0
DUT drive current used in the test	150 mA
Test duration	18 kh
Test duration used for projection	7 kh-15 kh
Tested ambient temperature	55 $^{\circ}C$
α	-7,322E-05
B	0,24753385
Calculated $L_{70}[9 kh]$	3956,02862
Measured L_{70}	\approx 8000

Description of LED	LED A
Sample size	10
Number of failures	0
DUT drive current used in the test	150 mA
Test duration	18 kh
Test duration used for projection	7 kh-15 kh
Tested ambient temperature	85 $^{\circ}C$
α	-5,5154E-05
B	- 0,38155312
Calculated $L_{70}[9 kh]$	5252
Measured L_{70}	\approx 2000

LIITE A: TM-21:n mukainen raporttitaulukko (soveltuvin osin) 2(2)

$T_{a,1}$ [$^{\circ}C$]	55
$T_{a,1}$ [K]	328,15
α_1	-1,913E-05
B_1	0,0621
	85
$T_{a,1}$ [$^{\circ}C$]	358,15
$T_{a,1}$ [K]	-2,556E-05
B_2	0,0253
E_a/k_B	1135
A	6,086E-04
B_0	1,045E+00
$T_{a,1}$ [$^{\circ}C$]	25
$T_{a,1}$ [K]	298,15
α_i	1,351E-05
Projected $L_{70}[9 kh]$	29646
Reported $L_{70}[9 kh]$	50000

Description of LED	LED C
Sample size	20
Number of failures	0
DUT drive current used in the test	700 mA
Test duration	18 kh
Test duration used for projection	7 kh-15 kh
Tested ambient temperature	55 $^{\circ}C$
α	-1,913E-05
B	0,06213021
Calculated $L_{70}[9 kh]$	20930
Reported L_{70}	-

Description of LED	LED C
Sample size	10
Number of failures	0
DUT drive current used in the test	700 mA
Test duration	18 kh
Test duration used for projection	7 kh-15 kh
Tested ambient temperature	85 $^{\circ}C$
α	-2,55604E-05
B	0,025293012
Calculated $L_{70}[9 kh]$	15664
Reported L_{70}	-

LIITE B: Ledin lämpötilan määrittäminen NTC-vastuksen avulla 1(4)

Tässä liitteessä esitetään, miten ledin lämpötila määritetään termistorin resistanssin avulla. Mittauksissa käytettävä NTC-termistori (R_1) on tyyppiä Panasonic ERT-J1VG103GA. Valmistajan internetsivuilta löytyy kyseisen komponentin resistanssit lämpötilan suhteen taulukoituna (taulukko 1).

Lämpötila resistanssin suhteen saadaan sovittamalla kolme resistanssilämpötilaparia Steinhart-Hart-yhtälöön. Yhtälö on muotoa

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R) + C(\ln(R))^3, \quad 1$$

missä T on lämpötila kelvineissä, R on termistorin resistanssi lämpötilassa T . A , B ja C ovat kyseiselle komponentille ominaiset vakiot.

Tyypillisesti vakioiden A , B ja C määrittämiseen käytetään lämpötiloja $0\text{ }^\circ\text{C}$, $25\text{ }^\circ\text{C}$ ja $70\text{ }^\circ\text{C}$. Sijoittamalla yhtälöön 1 saadaan yhtälöpari

$$\begin{cases} \frac{1}{273,15} = A + B \cdot \ln(27640) + C \cdot (\ln(27640))^3 \\ \frac{1}{298,15} = A + B \cdot \ln(10000) + C \cdot (\ln(10000))^3 \\ \frac{1}{243,15} = A + B \cdot \ln(2233) + C \cdot (\ln(2233))^3 \end{cases}$$

josta ratkaisuksi saadaan

$$\begin{cases} A \approx 0,00080263 \\ B \approx 0,00026664 \\ C \approx 1,25394835 \times 10^{-7} \end{cases}$$

Näin ollen esim. lämpötilaa $T = 65\text{ }^\circ\text{C}$ vastaavalla resistanssin arvolla $R = 2595\ \Omega$ lämpötilan arvoksi kaavalla 1 saadaan

$$T = \frac{1}{338,15(A + B \cdot \ln(2595) + C \cdot (\ln(2595))^3)} \approx 338,11\text{ K} \approx 64,96\text{ }^\circ\text{C}$$

Laskettu arvo poikkeaa vain 0,06 % valmistajan ilmoittamasta arvosta.

Loput arvot on esitetty taulukossa 2.

Ledin lämpötila mitataan standardin TM-80 mukaan valmistajan nimeämästä paikasta. Nyt lämpötila on ledistä riippumatta mitattu samasta paikasta. Lämpökameramittausten perusteella kuitenkin voidaan havaita, että lämpötilaero standardin mukaisen ja todellisen mittauspisteen välillä on pieni. Lämpötilaero mahtuu mittausrvirheen sisälle.

1 Steinhar-Hart-yhtälö

Taulukko 1. Lämpötilat resistanssin suhteen. (<http://industrial.panasonic.com/www-data/pdf2/AUAoooo/AUAooooAE145.pdf>)

ERTJ1VG103GA R-T Characteristics (for reference)

$R_{25} = 10 \text{ kohm } \pm 2\%$

$B_{25/85} = 3435 \text{ K } \pm 1\%$

Resistance (kohm)			Resistance (kohm)			Resistance (kohm)					
T(deg.C)	R min.	R cen.	R max.	T(deg.C)	R min.	R cen.	R max.	T(deg.C)	R min.	R cen.	R max.
-40	195.1	205.2	215.7	25	9.800	10.00	10.20	90	1.210	1.261	1.313
-39	184.4	193.8	203.6	26	9.436	9.632	9.828	91	1.178	1.228	1.277
-38	174.3	183.1	192.3	27	9.087	9.279	9.472	92	1.144	1.192	1.242
-37	164.8	173.1	181.6	28	8.753	8.942	9.131	93	1.112	1.159	1.208
-36	155.9	163.6	171.6	29	8.434	8.619	8.804	94	1.081	1.127	1.175
-35	147.6	154.8	162.3	30	8.127	8.309	8.491	95	1.051	1.097	1.144
-34	139.7	146.5	153.5	31	7.834	8.012	8.190	96	1.022	1.067	1.113
-33	132.4	138.7	145.2	32	7.553	7.727	7.902	97	0.9943	1.038	1.083
-32	125.4	131.3	137.4	33	7.284	7.454	7.626	98	0.9672	1.010	1.054
-31	118.9	124.4	130.1	34	7.025	7.192	7.360	99	0.9409	0.9826	1.026
-30	112.7	117.9	123.3	35	6.777	6.941	7.106	100	0.9154	0.9563	0.9986
-29	107.0	111.8	116.8	36	6.540	6.700	6.861	101	0.8907	0.9307	0.9721
-28	101.5	106.0	110.8	37	6.311	6.468	6.627	102	0.8667	0.9059	0.9485
-27	96.36	100.6	105.0	38	6.092	6.246	6.401	103	0.8434	0.8818	0.9215
-26	91.51	95.51	99.65	39	5.882	6.033	6.185	104	0.8208	0.8584	0.8973
-25	86.94	90.69	94.57	40	5.680	5.828	5.976	105	0.7989	0.8357	0.8738
-24	82.63	86.15	89.79	41	5.486	5.631	5.776	106	0.7776	0.8136	0.8510
-23	78.58	81.86	85.27	42	5.300	5.441	5.584	107	0.7570	0.7922	0.8288
-22	74.70	77.81	81.01	43	5.121	5.259	5.399	108	0.7369	0.7715	0.8073
-21	71.07	73.99	76.99	44	4.949	5.084	5.221	109	0.7174	0.7513	0.7864
-20	67.63	70.37	73.20	45	4.783	4.916	5.050	110	0.6986	0.7317	0.7661
-19	64.39	66.96	69.61	46	4.624	4.754	4.885	111	0.6802	0.7127	0.7464
-18	61.32	63.74	66.23	47	4.471	4.598	4.727	112	0.6625	0.6943	0.7273
-17	58.41	60.69	63.03	48	4.324	4.448	4.574	113	0.6452	0.6764	0.7087
-16	55.66	57.80	60.00	49	4.182	4.304	4.427	114	0.6285	0.6590	0.6907
-15	53.06	55.07	57.14	50	4.046	4.165	4.285	115	0.6122	0.6421	0.6732
-14	50.59	52.49	54.43	51	3.914	4.031	4.149	116	0.5965	0.6258	0.6562
-13	48.25	50.04	51.87	52	3.788	3.902	4.018	117	0.5812	0.6099	0.6397
-12	46.04	47.72	49.44	53	3.668	3.778	3.891	118	0.5664	0.5945	0.6237
-11	43.94	45.52	47.14	54	3.549	3.658	3.769	119	0.5520	0.5795	0.6082
-10	41.95	43.44	44.96	55	3.436	3.543	3.652	120	0.5380	0.5650	0.5931
-9	40.06	41.46	42.90	56	3.328	3.432	3.538	121	0.5245	0.5509	0.5785
-8	38.27	39.59	40.94	57	3.223	3.325	3.429	122	0.5113	0.5372	0.5643
-7	36.57	37.81	39.09	58	3.122	3.222	3.324	123	0.4986	0.5240	0.5505
-6	34.96	36.13	37.33	59	3.025	3.123	3.222	124	0.4862	0.5111	0.5371
-5	33.42	34.53	35.66	60	2.931	3.027	3.124	125	0.4742	0.4986	0.5241
-4	31.96	33.00	34.07	61	2.840	2.934	3.030				
-3	30.57	31.56	32.56	62	2.753	2.845	2.939				
-2	29.26	30.19	31.13	63	2.669	2.759	2.850				
-1	28.00	28.88	29.77	64	2.588	2.676	2.765				
0	26.81	27.64	28.48	65	2.509	2.595	2.683				
1	25.68	26.46	27.25	66	2.434	2.518	2.604				
2	24.60	25.33	26.08	67	2.361	2.443	2.527				
3	23.57	24.26	24.97	68	2.290	2.371	2.453				
4	22.59	23.24	23.91	69	2.222	2.301	2.382				
5	21.65	22.27	22.90	70	2.156	2.233	2.312				
6	20.76	21.35	21.94	71	2.093	2.168	2.246				
7	19.92	20.47	21.03	72	2.031	2.105	2.181				
8	19.11	19.63	20.16	73	1.972	2.045	2.119				
9	18.34	18.83	19.33	74	1.915	1.986	2.059				
10	17.60	18.06	18.54	75	1.860	1.929	2.001				
11	16.90	17.34	17.78	76	1.806	1.874	1.944				
12	16.23	16.64	17.06	77	1.755	1.821	1.890				
13	15.59	15.98	16.38	78	1.705	1.770	1.837				
14	14.98	15.35	15.72	79	1.656	1.720	1.786				
15	14.39	14.74	15.10	80	1.610	1.672	1.736				
16	13.83	14.17	14.50	81	1.564	1.625	1.688				
17	13.30	13.62	13.93	82	1.520	1.580	1.641				
18	12.79	13.09	13.39	83	1.477	1.536	1.596				
19	12.31	12.59	12.87	84	1.436	1.493	1.552				
20	11.84	12.11	12.37	85	1.395	1.451	1.509				
21	11.40	11.65	11.90	86	1.356	1.411	1.468				
22	10.97	11.21	11.44	87	1.318	1.372	1.427				
23	10.56	10.79	11.01	88	1.281	1.334	1.388				
24	10.17	10.38	10.60	89	1.245	1.297	1.350				
25	9.800	10.00	10.20	90	1.210	1.261	1.313				

LIITE B: Ledin lämpötilan määrittäminen NTC-vastuksen avulla 3(4)

Taulukko 2. Kaavalla 1 lasketut lämpötilat. (Liite B)

T/C	T/C		T/C		T/C	T/C	
-40	-40,0688		18	18,00574		76	76,05377
-39	-39,0634		19	18,99971		77	77,06304
-38	-38,0574		20	19,99764		78	78,06755
-37	-37,0556		21	20,99771		79	79,08615
-36	-36,0418		22	21,99784		80	80,09751
-35	-35,0418		23	22,99566		81	81,12166
-34	-34,0383		24	24,01392		82	82,13563
-33	-33,0351		25	25		83	83,1607
-32	-32,0228		26	25,99708		84	84,19667
-31	-31,0194		27	26,99576		85	85,24326
-30	-30,015		28	27,99102		86	86,27398
-29	-29,014		29	28,98651		87	87,31288
-28	-28,0034		30	29,98337		88	88,35942
-27	-27,0047		31	30,97965		89	89,41301
-26	-26,0064		32	31,97671		90	90,47298
-25	-25,0041		33	32,97258		90	90,47298
-24	-24,0034		34	33,96888		91	91,53858
-23	-23,0014		35	34,96364		92	92,60897
-22	-21,9995		36	35,95882		93	93,68319
-21	-20,9989		37	36,95689		94	94,76022
-20	-19,9952		38	37,95163		95	95,80355
-19	-18,9948		39	38,94542		96	96,88145
-18	-17,9956		40	39,94116		97	97,95832
-17	-16,9951		41	40,93717		98	99,03268
-16	-15,993		42	41,93694		99	100,119
-15	-14,9927		43	42,93346		100	101,1962
-14	-13,9943		44	43,93026		101	102,2794
-13	-12,9933		45	44,9255		102	103,3632
-12	-11,9927		46	45,92346		103	104,4509
-11	-10,9915		47	46,92265		104	105,5416
-10	-9,99293		48	47,92141		105	106,6343
-9	-8,99055		49	48,91789		106	107,7327
-8	-7,99255		50	49,91739		107	108,831
-7	-6,99146		51	50,9185		108	109,9277
-6	-5,99611		52	51,91969		109	111,0325

-5	-4,9979		53	52,91922		110	112,1391
-4	-3,99279		54	53,92372		111	113,2463
-3	-2,99705		55	54,9232		112	114,3528
-2	-2,0004		56	55,9246		113	115,4636
-1	-0,99792		57	56,92647		114	116,5779
0	1,28E-06		58	57,92722		115	117,6944
1	0,998295		59	58,92508		116	118,8054
2	2,00315		60	59,92876		117	119,9232
3	3,003041		61	60,93733		118	121,0398
4	4,004307		62	61,93829		119	122,1614
5	5,004263		63	62,94105		120	123,2795
6	5,999843		64	63,94426		121	124,4004
7	6,999209		65	64,95919		122	125,5231
8	8,000158		66	65,95914		123	126,6381
9	9,000165		67	66,96829		124	127,761
10	10,00978		68	67,97198		125	128,8823
11	10,99954		69	68,98279			
12	12,00809		70	70			
13	13,00466		71	71,00705			
14	14,00104		72	72,01765			
15	15,01162		73	73,01386			
16	16,00036		74	74,02767			
17	16,99875		75	75,04145			

Liite C: RF-häiriömittaukset

Jussi Karttunen, Karelia-amk

JOHDANTO

E27-kantaiset ja kuluttajakäyttöön tarkoitettut led-lamput ovat yleistyneet muutaman vuoden aikana ja korvanneet vanhat hehkulamput sekä jopa osan pienloistelampuista. Polttimoiden hyötyinä pidetään pientä virrankulutusta suhteessa tuotettuun valotehoon sekä pienloistelampuista löytyvän elohopean puuttumista. Lisäksi led-lamppu syttyy välittömästi, toisin kuin pienloistelamppu.

Projektityön tarkoituksena oli mitata kuluttajakäyttöön tarkoitettujen led-lamppujen sähköverkkoon mahdollisesti muodostamia RF-häiriöitä (radiotaajuushäiriöitä). Tässä raportissa ei analysoida tuloksia, vaan tarkastellaan mittaustapaa. Työ suoritettiin kesän ja syksyn aikana Karelia-ammattikorkeakoulun tiloissa.

LED-LAMPUN TEKNIikka

Led eli Light-Emitting Diode on puolijohdekomponentti, joka muistuttaa normaalia pntyyppistä diodia sillä poikkeuksella, että led säteilee valoa, kun virta johdetaan anodilta katodille. Led tarvitsee myös tasajännitteen tuottaakseen valoa. Pienen merkkivaloksi tarkoitettun lampun virrantarve voi olla noin 20 mA, tehokkaaseen valaistukseen tarkoitettun lampun tarve taas muutamia ampeereita.

Sähköverkosta saatava jännite on vaihtojännitettä ja jännitetasoltaan liian suuri led-lampun puolijohteelle. Lampun jännitteenkesto vaihtelee koosta riippuen muutamasta voltista muutama kymmeneen voltteihin; sähköverkon jännite Suomessa on 230 VAC, eli tarpeeksi rikkoakseen lampun. Jännitteen tasasuuntaamiseen sekä tiputtamiseen sopivalle tasolle E27-kantaisissa polttimoissa käytetään hakkurivirtalähteitä. Hakkurivirtalähteen edut normaaliin lineaariseen virtalähteeseen ovat pieni fyysinen koko, matala hukkalämpö sekä korkea hyötysuhde. Hakkurivirtalähde toimii pätkimällä tasasuunnattua verkkovirtaa hyvin nopealla tahdilla, yleensä useita kilohertsejä. Tämä keinotekoinen ja korkeataajuuksinen vaihtovirta muunnetaan muuntajalla sopivalle tasolle ja lopulta tasasuunnataan laitteen käyttöjännitteeksi. Haittapuolena hakkurin toimintaperiaatteessa on korkeataajuusisesta värähtelystä syntyvät RF-häiriöt. Juuri näitä häiriöitä projektityössä pyrittiin mittaamaan.

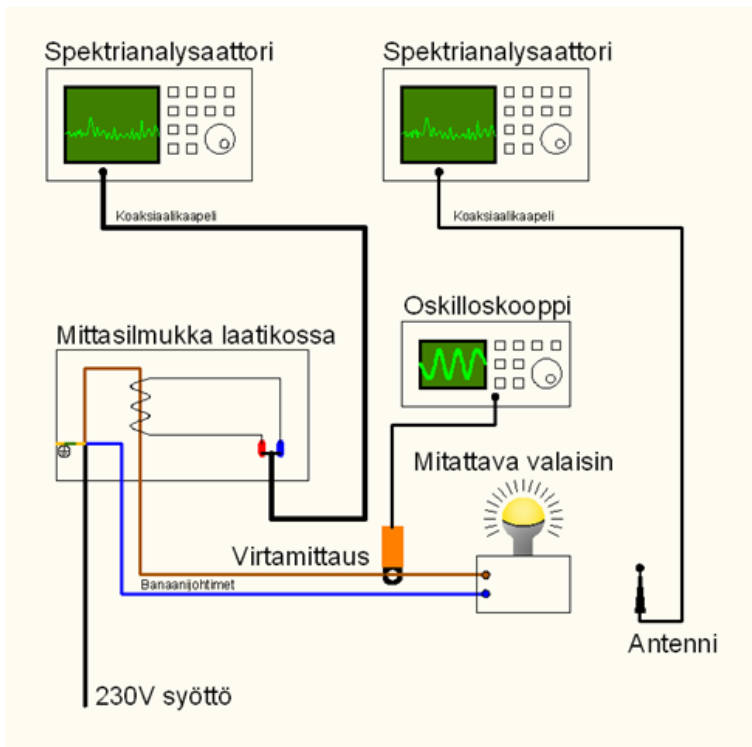
MITTAUSYMPÄRISTÖ

Mittaukset suoritettiin Karelia-ammattikorkeakoulun automaatiolaboratoriossa. Tila sisältää paljon elektronisia laitteita sekä häiriöitä niin ilmassa kuin sähköverkossakin. Nämä häiriöt on otettu huomioon tarkistamalla referenssitaso mittauspiiriin liitetyllä hehkulampulla. Hehkulamppu on täysin resistiivinen kuorma, eikä se aiheuta häiriöitä sähköverkkoon.

Mittausympäristön laitteet:

- spektrianalyysaattori, Agilent E4404B 9kHz - 6.7GHz
- spektrianalyysaattori, HP ESA L15000A 9kHz - 1.5GHz
- oskilloskooppi, Agilent 54621A 60MHz
- funktiogeneraattori, Tektronix CFG253 3MHz
- yleismittari, HP 34401A
- yleismittari, Agilent U1241B
- virtapihti, Fluke i30s
- turvabanaanilla varustettu E27-lampunkanta
- turvabanaanijohtimia
- koaksiaalikaapelia
- referenssiantenni.

Kuvassa 1 on esitetty mittausympäristön kytkentä. Mitattavan polttimon toisen virtajohtimen ympärille on pyöritetty muutamia kierroksia banaani johdinta, joka on kytketty spektrianalyysaattoriin. Näin mittaus tapa on turvallinen ja galvaanisesti erotettu sähköverkosta. Spektrianalyysaattorin kytkeminen suoraan verkkojännitteeseen on hengenvaarallista, ja se voi rikkoa kalliin laitteen. Mittausilmukka oli sijoitettu maadoitettuun peltilaatikkoon, millä pyrittiin vähentämään laatikon ulkopuolisia RF-häiriöitä (eli ns. Faradayn häkki).



Kuva 1. Mittauskytkentä.

Mitattavan polttimon virtajohtimen ympärille on myös sijoitettu Fluken virtapihti, jonka avulla tarkasteltiin polttimoiden virtakäyrää oskilloskoopin ruudulta. Hehkulampun vir-

takäyrä on täysin sinimuotoista, mutta hakkurivirtalähteen muodostamat verkkohäiriöt sekä induktiivinen/reaktiivinen kuorma sähköverkkoon päin näkyvät oskilloskoopin ruudulla erilaisena kuin hehkulampun virtakäyrä.

Lisäksi referenssimittaukseen käytettiin pientä GSM-taajuuden antennia kytkettynä toiseen spektrianalysaattoriin. Banaanijohdinta valaisimelta mittaustilatikkoon oli noin metri. Analysaattorin asetuksina käytimme seuraavia asetuksia:

- Mittausalue 9 kHz – 400 MHz
- Pystyasteikko logaritminen, 5 dB
- Sweep 1.5 sec
- Res BW 3.0 MHz, VBW 1 MHz
- Ref -33.0 dBm, Atten 0 dB.

MITTAUSTEKNIIKAN TOIMINNAN TUTKIMINEN

Ennen mittauksia haluttiin varmistaa, että mittaustekniikka (silmukka virtajohtimen ympärillä) voisi tuottaa tuloksia. Tutkimiseen käytettiin funktiogeneraattoria, jolla tuotettiin eritasoisia 1 MHz:n siniaaltosignaaleita. Funktiogeneraattori oli kytketty valaisimen tilalle ja 230 V:n syöttöjohto oli irrotettu verkosta. Kokeilulla saatiin selville, että pienin funktiogeneraattorin tuottama signaalitaso (noin 15 mVp-p) näkyi muutoksena funktiogeneraattorin ruudulla sekä noin 10 dB:n tasomuutoksena. Noin 100 mVp-p siniaaltosignaali näkyi referenssitason verrattuna noin 34 dB:n tasomuutoksena.

MITATTAVAT VALAISIMET

Jokaisesta mitattavasta valaisimesta oli neljän kappaleen otanta, paitsi referenssivalaisimia oli vain yksi kappale lajiaan.

Referenssivalaisimet:

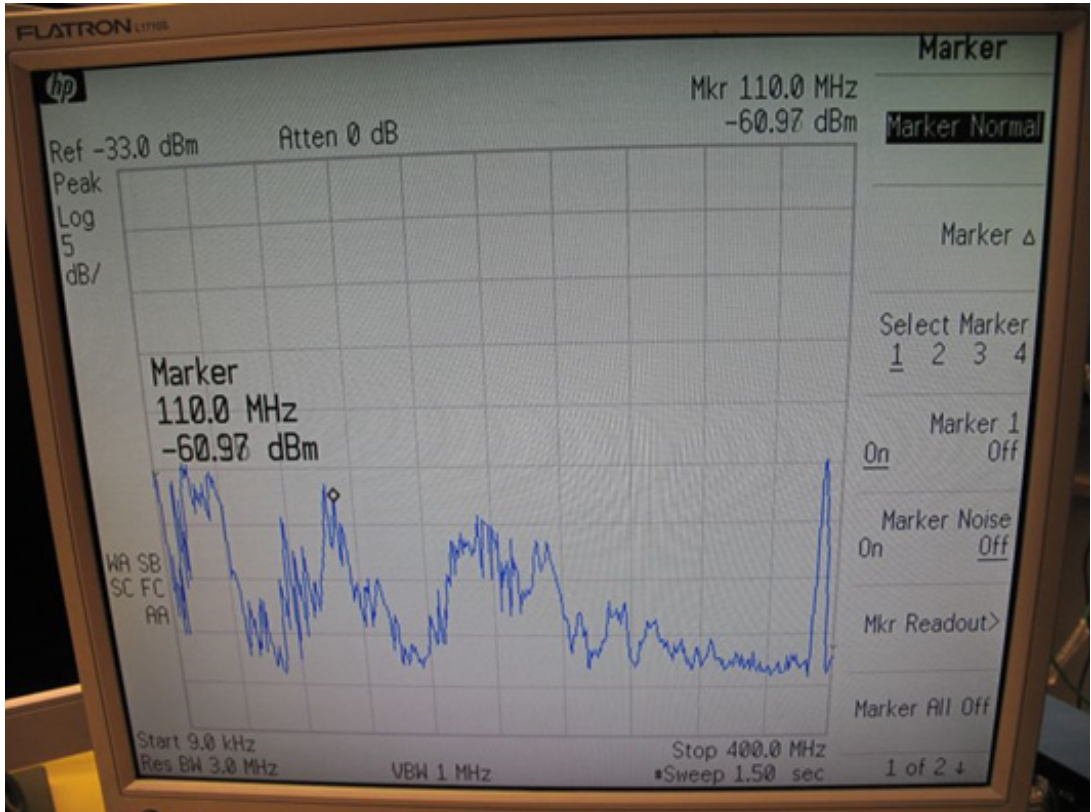
1. Pelkkä kanta ilman valaisinta
2. E27-kantainen halogeeni: 42 W
3. Loistelamppu 1: 11 W
4. Loistelamppu 2: 15 W

Mitatut valaisimet:

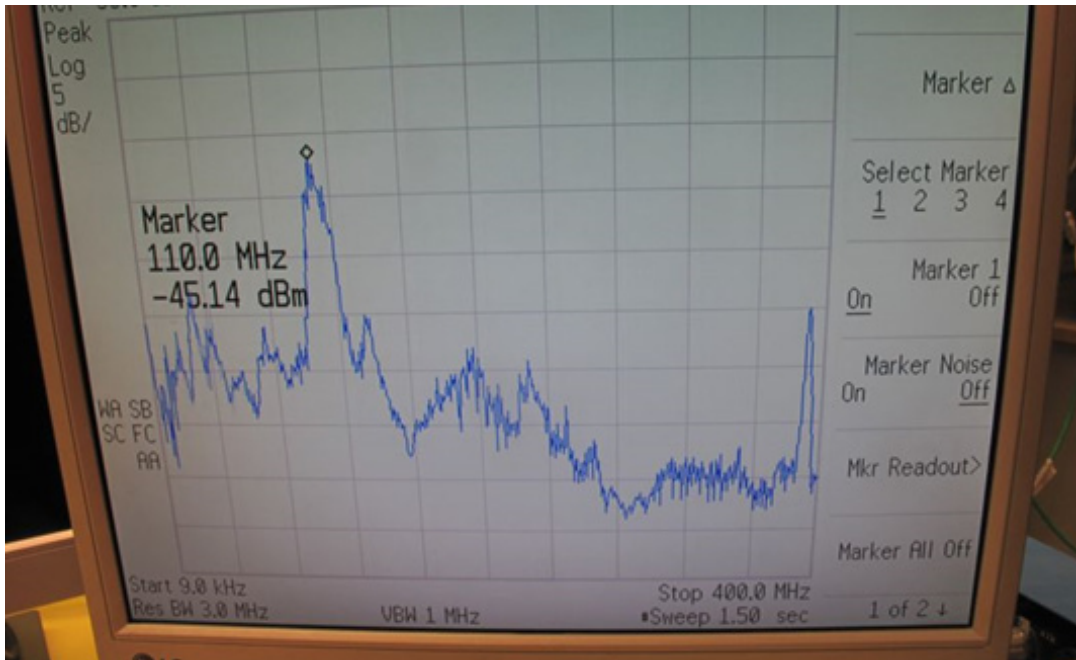
1. Lamp 1
2. Lamp 5
3. Lamp 3
4. Lamp 2
5. Lamp 4
6. Lamp 6

HUOMIOITA MITTAUKSISTA

Jokainen mitattu valaisin muodosti jonkinlaista häiriösäteilyä sähköjohtimeen. Käytetyllä mittausmenetelmällä 110 MHz:n kohdalla aiheutui noin 5–15 desibelin suuruisia taustakohinasta erottuvia radiohäiriöitä (kuvat 2 ja 3). Tällä taajuusalueella tapahtuvat häiriöt vaimenevat hyvin lyhyellä matkalla. Lisäksi jokaisesta testattavasta lampusta mitattiin virta ajan funktiona. Kuvassa 4 on loistelampun ja kuvassa 5 led-lampun virran muoto, joista nähdään, että ledin virrankulutuksessa on enemmän häiriöitä aiheuttavia piikkejä. Valaisimista mitattiin oskilloskoopilla ja virtapihdillä virtakäyrät, mutta jännitekäyrää ei otettu mittauksiin mukaan. Jännitekäyrän ja virtakäyrän vaihe-erolla olisi saattanut olla merkitystä tulosten tarkastelussa.



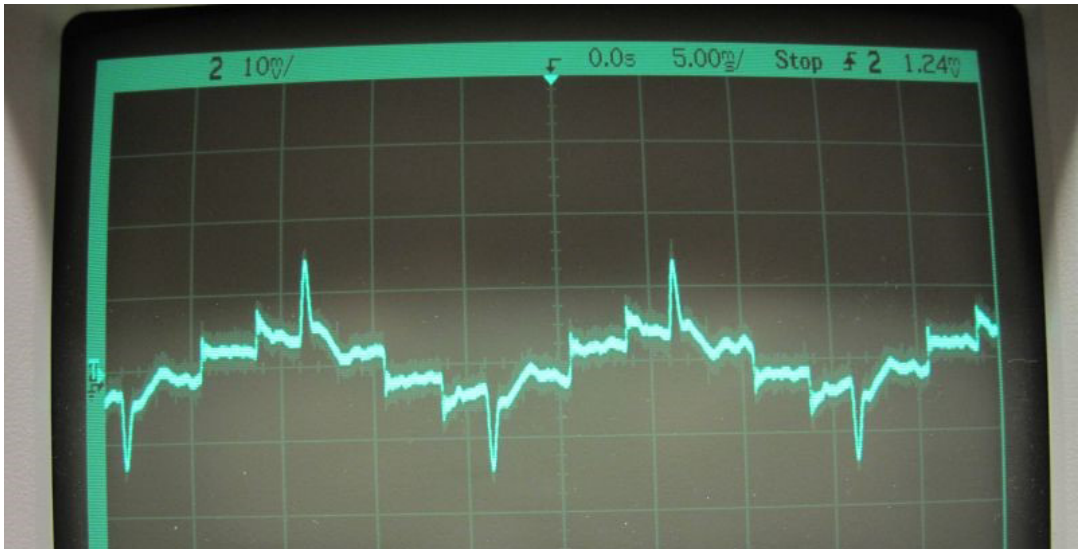
Kuva 2. Pelkän kannan aiheuttama häiriö.



Kuva 3. Led-lampun (Lamp 1) aiheuttama häiriö 110 MHz:n kohdalla.



Kuva 4. Loistelamppu 2:n virta ajan funktiona.



Kuva 5. *Led-lampun (Lamp 3) virta ajan funktiona.*

Tämä julkaisu on Ledtrix – Led-teknologian osaamispankki -hankkeen loppuraportti. Hanke toteutettiin vuosina 2010–2014. Hanketta rahoittivat Inno-vaatorahoituskeskus Tekesin (Euroopan aluekehitysrahasto EAKR) lisäksi tutkimusosapuolet sekä yritykset. Hanke toteutettiin kolmena rinnakkais-hankkeena, joissa tutkimusosapuolina olivat Karelia-ammattikorkeakoulun Liiketalouden ja tekniikan keskus, Itä-Suomen yliopiston fysiikan ja matema- tiikan laitos sekä Mikkelin ammattikorkeakoulu (30.3.2013 asti Elektroniikan 3K-tehdas). Yrityksistä yhteistyökumppaneina mukana olivat Realplast Oy, Savled/Diranet Oy ja Teknoware Oy.

Raportissa esitellään aluksi hankkeen taustaa ja sen jälkeen hankkeen aikana tehtyjä tutkimuksia, kuten ledien kiihdytetyn elinikätestauksen testiympäris- tön suunnittelua, ledien lämmönhallintaa, pinnoitteiden olosuhdetestausta ja häiriömittauksia.

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULUN JULKAISUJA C:17

ISBN 978-952-275-128-7 | ISSN 2323-6914



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto



ITÄ-SUOMEN YLIOPISTO



MAMK
University of Applied Sciences

