

# Ledien pitkäaikaismittaukset

*Aatos Lilja*

Pro gradu -tutkielma  
Syyskuu 2012  
Fysiikan ja matematiikan laitos  
Itä-Suomen yliopisto

**Aatos Lilja**

*Ledien pitkäaikaismittaukset, 39 sivua*

Itä-Suomen yliopisto

Fysiikan koulutusohjelma

Fyysikkokoulutus

Työn ohjaajat

Pertti Silfsten

Prof. Pasi Vahimaa

---

## **Tiivistelmä**

*Tässä opinnäytetyössä perehdytään ledien pitkäaikaiseen eliniän mittaukseen Illuminating Engineering Society'n mittastandardien LM-79 ja LM-80 pohjalta. Lisäksi tutkitaan menetelmiä ledin eliniän ennustamiseen IES TM-21-11 standardin mukaisesti.*

*Opinnäytetyön kokeellisessa osassa mitattiin yllämainittujen standardien mukaisesti joukko ledejä. Tutkittuja ledejä oli yhteensä 250 kappaletta viittä eri mallia. Ledeille suoritettiin standardien mukaiset eliniän mittaukset. Pro-gradu tutkielman kirjoittamiseen mennessä oli mittauksia ehditty suorittaa 4000 tuntia. Alustavat tulokset analysoidaan ja raportoidaan tutkielmassa. Havaitaan merkittävä hajoamisaaste kahdella ledimallilla sekä voimakkaasti ledimallista riippuva valovirran heikkeneminen. Osan ledien valovirta on heikentynyt alle 70% jo nyt, osan vielä säilyttäessä 90% alkuperäisestä valovirtansa arvosta.*

## Esipuhe

Joensuussa 30. elokuuta 2012

Haluan kiittää Itä-suomen yliopiston henkilökuntaa sekä opiskelutovereitani innostavasta työympäristöstä ja avusta opiskelujeni aikana. Erityisesti haluan kiittää opinnäytetyöni tekoa ohjannutta Pertti Silfstenia. Lisäksi haluan kiittää opinnäytetyöni mahdollistaneita Savonlinnan 3K-tehtaan henkilökuntaa, Pohjois-karjalan ammattikorkeakoulun väkeä sekä Infotonics-värilaboratorion henkilöstöä. Lopuksi haluan kiittää ystäviäni, vanhempiani ja sisaruksiani.

*Aatos Lilja*

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Ledien perusteet</b>	<b>3</b>
2.1	Ledien toiminta . . . . .	3
2.1.1	P-n-diodi . . . . .	3
2.1.2	Ledit . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Ledien mittauksen mittastandardit</b>	<b>6</b>
3.1	IES LM-79 ja LM-80 mittastandardit . . . . .	6
3.1.1	Ulkoiset olosuhteet . . . . .	6
3.1.2	Virta- ja lämpöasetukset . . . . .	7
3.1.3	Mittajärjestelyt . . . . .	7
3.1.4	Tulosten raportointi . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Ledien eliniän ennustaminen</b>	<b>9</b>
4.1	IES TM-21-11 raportin mukainen valovirran ennustaminen . . . . .	9
4.1.1	Näytekkoko . . . . .	10
4.1.2	Mittaväli . . . . .	10
4.1.3	Valovirran ennustaminen . . . . .	10
4.1.4	Tulosten esittäminen . . . . .	11
4.2	Mittastandardista poikkeava lämpötila . . . . .	11
4.2.1	Lämpötilan valinta . . . . .	12
4.2.2	Arrheniuksen yhtälö . . . . .	12

4.2.3	Arrheniuksen yhtälön käyttö . . . . .	13
4.3	Pienimmän neliösumman sovitus . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Fotometria ja värikoordinaatitot</b>	<b>15</b>
5.1	Fotometriset suureet . . . . .	15
5.1.1	Valovirta . . . . .	15
5.1.2	Valovoima . . . . .	16
5.1.3	Valaistusvoimakkuus . . . . .	16
5.1.4	Luminanssi . . . . .	16
5.2	Ledien väri . . . . .	17
5.2.1	Fluoresenssiin pohjautuvat valkoiset ledit . . . . .	17
5.2.2	Värikoordinaatitot . . . . .	18
<b>6</b>	<b>Ledien pitkäaikainen mittaus</b>	<b>22</b>
6.1	Mitatut ledit . . . . .	22
6.2	Mittalaitteisto . . . . .	23
6.2.1	BTS256-LED Tester . . . . .	23
6.2.2	Virtalähteet . . . . .	25
6.2.3	Mittausolosuhteet . . . . .	26
6.3	Mittaukset . . . . .	26
6.3.1	Ledien poltto . . . . .	26
6.3.2	Ledien Mittaukset . . . . .	27
6.3.3	Mittadata . . . . .	27
6.4	Ledien emittoiman valon värin muuttuminen elinikämittausten aikana	31
<b>7</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>36</b>
	<b>Viitteet</b>	<b>38</b>

Yleisvalaistuksessa käydään parhaillaan läpi mullistusta, kun perinteisten valaisuratkaisujen kuten hehkulamppujen ja muiden energiasyöppöjen lamppujen myynti kielletään EU-direktiivein. Vuoteen 2013 mennessä kielletään kaikkien hehkulamppujen myynti ja vuonna 2016 vielä edelleen kaikki energiatehokkuusluokkaan C kuuluvat valaisimet. Näin pyritään parantamaan valaistuksen energiatehokkuutta korvaamalla huonomman hyötysuhteen omaavat valaisimet energiansäästölamppuilla, halogeenilampuilla ja ledivalaisimilla. Energiatehottomista lamppuista luopumisella pyritään säästämään energiaa ja pienentämään hiilidioksidipäästöjä. [1, 2]

Ledilamput ovat eräs lamppumalli, jolla pyritään korvaamaan vanhat hehkulamput ja muut energiatehottomat mallit. Ledien kehitys alkoi 1950-luvulla ja on edennyt harppauksin aina nykypäiviin saakka [3]. Nykyään kaupallisia ledilamppuja on tarjolla runsaasti monien eri valmistajien tarjoamina [4, 5]. Jotta valaisukäyttöön tarkoitetut ledit ovat kaupallisesti varteenotettava vaihtoehto, tulee niiden eliniän olla riittävä sekä niiden värintuoton tasainen läpi niiden eliniän.

Fluoresenssiin pohjautuvat ledit ovatkin nykyään monelta osin toimivia vaihtoehtoja valaisuun [6], mutta niille ei ole luotu kattavaa testausstandardia. Ledivalaisimia voidaan joutua käyttämään haastavissa olosuhteissa kuten korkeissa lämpötiloissa. Ledeille on ominaista, että ne eivät hajoa katastrofaalisesti korkean lämpötilan seurauksena, vaan niiden valontuotto heikkenee asteittain. Ledivalaisimien eliniän selvittämiseksi onkin tärkeää suorittaa niille useita tuhansia tunteja kestäviä mittauksia [7]. Näin voidaan ennustaa ja kartoittaa niiden valontuoton heikkeneminen sekä muutokset ledin värissä pitkäaikaisen käytön seurauksena. Ledien elinikää ja kestävyyttä on mitattu aiemmin ilman yleisesti käytettyä mittastandardia [8–10].

Ilman mittastandardia saadut tulokset eivät ole helposti vertailukelpoisia, mikä aiheuttaa ongelmia eri leditutkimusten vertailuun. Tässä opinnäytetyössä perehdytään erääseen kehitettyyn mittastandardiin [11,12] ja sen käyttöön valkoisten ledien pitkäaikaismittauksessa.

Tässä pro gradu-tutkielmassa tutkitaan menetelmiä ja metodeja ledien pitkäaikaismittaukseen. Luvussa 2 käydään läpi ledien rakenne ja niiden toiminnan perusteet. Luvuissa 3–4 esitetään mittastandardi ledien pitkäaikaismittaukselle ja ledien eliniän ennustamiselle. Luvussa 5 esitetään fotometrian ja värikoordinaatistojen perusteet. Luvussa 6 käydään läpi tehdyt elinikämittaukset sekä mittajärjestely.

LEDit (Light-Emitting Diode) ovat puolijohde diodeja. Ledit säteilevät sähkömagneettista säteilyä, kun niiden läpi johdetaan sähkövirtaa. Eri puolijohdemateriaaleja käyttämällä voidaan säädellä sähkömagneettisen säteilyn taajuutta eli myös valon väriä. Valon väriä voidaan myös muokata pinnoitemateriaaleilla.

## 2.1 Ledien toiminta

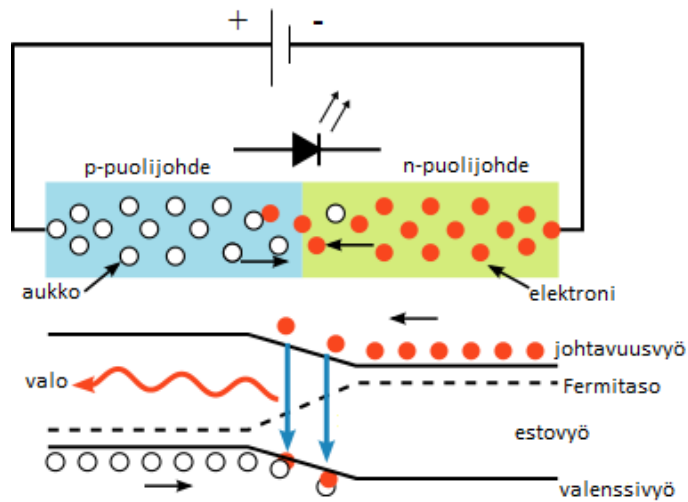
### 2.1.1 P-n-diodi

P-n-diodi on kahdesta puolijohdemateriaalista koostuva elektroninen komponentti. P- ja n-tyypin puolijohdeet vuorovaikuttavat rajapinnan yli keskenään. Ilman ulkoista jännitettä rajapinnan yli sille syntyy ns. sisäinen jännite. Tämä aiheutuu elektronien siirtymisestä n-puolijohdeeltä p-puolijohdeelle. Siirtyvät elektronit muodostavat tasapainotilan, kun syntyvän varausjakautuksen aiheuttama sähkökenttä on tarpeeksi suuri vastustamaan elektronien siirtymistä. Tasapainotilassa syntynyt varausjakautuma muodostaa nyt estovyöhykkeen, joka estää elektronien siirtymisen.

Kun p-puolijohde yhdistetään positiiviseen napaan ja n-puolijohde negatiiviseen, sanotaan p-n-diodin olevan päästöjännitteessä. Tällöin p-puolijohdeella sijaitsevat aukot ja n-puolijohdeella sijaitsevat elektronit työntyvät lähemmäksi p-n-rajapintaa. Tämä aiheuttaa estovyöhykkeen potentiaalisen pienentymistä. Kun ulkoinen jännite on riittävä, pystyvät elektronit (ja täten siis myös aukot) jälleen siirtymään rajapinnan yli.

Estojännitteessä p-puolijohde kytketään negatiiviseen napaan ja n-puolijohde positiiviseen. Täten p-puolijohdeella sijaitsevat aukot ja n-puolijohdeella sijaitsevat elektronit vetäytyvät ra-





**Kuva 2.1:** Ledin toiminta päästöjännitteessä.

japinnalta kasvattaen sen potentiaalia. Näin rajapinta estää elektronien ja aukkojen siirtymisen sen yli estojännitteessä.

### 2.1.2 Ledit

Ledit ovat puolijohdekomponentteja, jotka säteilevät valoa. Ne muodostuvat useimmiten p- ja n-rajapinnasta. Tällöin puhutaankin p-n-diodista.

Ledien kyky säteillä valoa syntyy p- ja n-puolijohdeiden välisestä potentiaalierosta. Kun estovyöhyke päästöjännitteessä pienenee riittävän pieneksi, voivat elektronit siirtyä sen yli aukkoihin p-puolijohdeella. Elektronit siirtyvät samalla kuitenkin pienempään energiatilaan. Ledi säteilee elektronin ylimääräisen energian sähkömagneettisena säteilynä. Jos ledin puolijohdemateriaalit ovat valittu oikein, vastaa sähkömagneettisen säteilyn taajuus näkyvää valoa ja haluttua väriä. Ledien puolijohdemateriaaleja voidaan myös seostaa niiden päästökaistan energiatilojen muuttamiseksi. Seostaminen tarkoittaa epäpuhtauksien lisäämistä joko p- tai n-puolijohdeeseen.

Ledien väri ei muodostu pelkästään p-n-diodin puolijohdeiden ominaisuuksista. Ledien säteilemää valoa muokataan usein fluoresoivan aineen avulla. Fluoresenssi-ilmiössä materiaali absorboi sähkömagneettista säteilyä ja emittoi sitä pidemmällä aallonpituudella. Näin voidaan muodostaa esim. ultraviolettisäteilyä säteilevistä ledeistä sinistä valoa säteileviä. Toinen tapa monesta ledistä muodostuvat RGB-systemit, joissa eri värejä emittoivien ledien sähkömagneettinen säteily yhdistyy

superpositioperiaatteen mukaisesti muodostaen halutun spektrin. Molempia menetelmiä voidaan myös käyttää valkoisen valon tuottamiseen ledeillä.

---

## Ledien mittauksen mittastandardit

---

Ledien elinikämittauksessa on useita haasteita. Ledien pitkän eliniän vuoksi täytyy ledejä pitää päällä tuhansia tunteja mittausten suorittamiseksi. Ongelmia aiheuttavat myös tasaisten mittaolosuhteiden ylläpitäminen kuukausien mittarupeaman ajan. Seuraavassa luvussa käydään läpi mittastandardien IES (Illuminating Engineering Society) LM-80 [12] ja IES LM-79-08 [13] perusteet pitkäaikaisia optisia mittauksia varten.

### 3.1 IES LM-79 ja LM-80 mittastandardit

Ledien eliniän mittausta on suoritettu monella eri tavalla. Eroavat tekniikat aiheuttavat kuitenkin ongelmia mittadatan yhteensopivuudessa. Eräs käytetty standardi on IES LM-80. Kyseinen standardi on luotu yhdistämään eri laboratorioiden ledien eliniänmittaustekniikat. LM-80 keskittyy ledien valovirran ja värintoiston muutosten mittaamiseen ja ennustamiseen. LM-80 mittastandardi määrittää mittaolosuhteet, mitta-ajan sekä virherajat ledien pitkäaikaiselle mittaukselle.

IES LM-79 mittastandardi kuvaa ledien mittaamista ja siinä huomioonotettavia asioita laajemmin.

#### 3.1.1 Ulkoiset olosuhteet

Ulkoiset olosuhteet kuten mittatilan lämpötila, ilmavirtaukset ja ilmankosteus vaikuttavat ledien sähköisiin sekä optisiin ominaisuuksiin. LM-80 mittastandardi määrittää eri olosuhteet virherajoineen mitattavien ledien mittaamiseen sekä polttamiseen.

Mitattavat ledit säilytetään kolmessa eri ryhmässä eri lämpötiloissa pitkäkestöisten mittausten ajan. Käytetyt lämpötilat ovat 55°C, 85°C ja vapaastivalintainen lämpötila. Mittatilan lämpötilan tulee vastata lämpötilaa ledillä. Lämpötila ledillä mitataan valmistajan määrittämästä kohdasta ledillä. Ilmavirroilla voi olla suuri vaikutus ledien lämpötilaan ja siten myös sen optisiin ominaisuuksiin. Ulkoinen ilmanvirtaus ei saa vaikuttaa mitattavan ledin itsensä synnyttämään konvektiiviseen virtaukseen [14]. Ledien sijainti mittatilassa voi vaikuttaa niiden lämpötilaan ja optisiin ominaisuuksiin, jos mittatilassa vallitsee epätasainen lämpöjakauma. Myös mahdolliset ilmavirrat mittatilassa voivat aiheuttaa epätarkkuutta mitattuihin tuloksiin. Itse mittauksen aikana mittatilan lämpötila lasketaan lämpötilaan 25°C. Virherajat mittauksen aikaiselle lämpötilalle ovat  $\pm 1^\circ\text{C}$ . LM-80 mittastandardin mukaan suhteellinen ilmankosteus  $RH$  tulee säilyttää alle 65% koko mittauksen ajan. Suhteellinen ilmankosteus määritetään kaavalla

$$RH = \frac{p_{H_2O}}{p^*_{H_2O}} \times 100\%, \quad (3.1)$$

missä  $p_{H_2O}$  on veden osapaine kaasuseoksessa ja  $p^*_{H_2O}$  on vesihöyryllä kyllästetyn kaasuseoksen osapaine [15]. Suhteellinen ilmankosteus kuvaa mitatun ja maksimaalisen ilmankosteuden suhdetta.

### 3.1.2 Virta- ja lämpöasetukset

IES LM-80 standardi määrittää ledien ohjaamiseen käytettyä virtaa muutamalla eri tavalla. Virta saa muuttua  $\pm 3\%$  keskimääräisestä arvosta ledien pitkäaikaisen valaisun aikana ja  $\pm 0,5\%$  itse mittauksen aikana. Tarkoituksena on säilyttää mahdollisimman tasainen virran taso, mikä johtaa tasaisiin valovirran tuloksiin.

Ledien lämpötiloja seurataan yksitellen läpi koko mittauksen elinkaaren. Lämpötilan seurannan tulee tapahtua termoelementillä valmistajan määrittelemästä kohdasta lediyksiköllä.

### 3.1.3 Mittajärjestelyt

Ledien polton kestoa tulee seurata  $\pm 0,5\%$  virhemarginaalin tarkkuudella. Erityistä tarkkuutta tulee noudattaa itse mittausten aikana. Ledien elinajan ajastus tulee keskeyttää ledien ollessa pois päältä. Ledien päälläoloaika mittauksien aikana tulee myös huomioida niiden eliniässä.

Ledien fotometriset mittaukset suoritetaan käyttäen samaa virtaa kuin elinikävalaistuksessa. Erityistä huomiota kannattaa kiinnittää ledien esilämmittämiseen mikäli ledit ovat olleet pois päältä ennen fotometrisiä mittauksia. Ledejä tulee pitää päällä ennen mittausta riittävän kauan, jotta ne saavuttavat lämpötasapainon. Tämä aika voi olla jopa 2 tuntia suurille valonlähteille. Ledit tulee mitata valmistajan suositamassa orientaatioissa mikäli tämä tunnetaan. Ledin orientaatio ja sijainti voi vaikuttaa niiden lämpötilaan ja täten myös niiden optisiin ominaisuuksiin. Ledeistä mitataan valovirta sekä väriarvot. Suositeltava käytäntö on mitata ledin spektraalinen säteilyteho, josta kyseiset valovirran sekä värin arvot voidaan johtaa.

Ledejä pidetään päällä vähintään 6000 tuntia aiemmin mainituissa lämpötiloissa. Suositeltu mittauksen kesto on kuitenkin 10000 tuntia. Mittaukset suoritetaan vähintään 1000 tunnin välein. Tiheämmät mittaukset parantavat tulosten tarkkuutta, mutta voivat lisätä työmäärä runsaasti varsinkin, jos mitattavana on suuri määrä ledejä. Samoin ledien toiminta tarkistetaan vähintään 1000 tunnin välein mikäli ledeillä ei ole reaaliaikaista seurantaa. Vioittuneet ledit tutkitaan ja varmistetaan, että vika ei johdu laitteistosta, vaan on ledin sisäisen vian seuraus. Mahdollisesti rikkoutuneet ledit merkitään muistiin.

#### **3.1.4 Tulosten raportointi**

IES LM-80 standardin mukaisessa ledien elinikämittausten raportoinnissa tulee kuvailla mitattavat ledit ja niiden lukumäärä. Mittajärjestely laitteistoinen sekä ulkoisine olosuhteineen tulee esittää. Ledien ohjausvirrat mainitaan raportissa. Valovirrasta esitetään kullekin ledille alkuarvo, keskiarvo sekä keskihajonta. Raporttiin merkitään myös mahdolliset muutokset ledien värissä. Raportoinnista tulee käydä ilmi mittausten välinen aikaväli.

---

## Ledien eliniän ennustaminen

---

Ledit palavat parhaimmillaan useita kymmeniä tuhansia tunteja. Näin pitkät mittaukset ledien eliniän selvittämiseksi kestäisivät vuosia. Täten menetelmä, jossa ledin ensimmäisten tuhansien tuntien mittadatasta voidaan ennustaa niiden todellinen elinikä, säästää huomattavia määriä aikaa ja rahaa. Käyttämällä ennustetta todellisten mittausten sijaan voidaan aikaa säästää jopa kolmin- tai nelinkertaisia määriä. Koska ledien mittauksessa puhutaan kuukausista ellei jopa vuosista, vastaavat nämä merkittäviä säästöjä niin työtunneissa kuin laitteistojen ja tilojen käytössä.

IES LM-80 mittastandardin mukaisesti mitattujen ledien tuloksia voidaan käyttää ledien eliniän ennustamiseen. Eräs standardisoitu metodi, joka on kehitetty nimenomaan IES LM-80 standardin mukaisesti mitatuille ledeille, on IES TM-21-11 [11]. Kyseisellä metodilla voidaan ennustaa ledien valovirran heikkenemistä läpi niiden eliniän. Ledien elinikä määritetään arvolla  $L_p$ , missä  $p$  on prosenttiarvo ledin valovirran arvosta verrattuna alkuarvoon. Esimerkiksi  $L_{70}$  vastaisi aikaa, kun ledin valovirta on 70% alkuarvosta. Ledien elinikä esitetään tuhansien tuntien mukaan. Luotettavien ennusteiden saamiseksi mittadataa tarvitaan vähintään 6000 tunnin verran.

### 4.1 IES TM-21-11 raportin mukainen valovirran ennustaminen

Luotettavien ennusteiden ledien eliniästä tekemiseksi TM-21-11 metodin avulla täytyy mittauksessa sekä datan käsittelyssä seurata tarkkoja ohjeita.

### 4.1.1 Näytekoko

IES TM-21-11 standardin mukaisesti suositellaan näytekokoksi vähintään 20 yksikköä. Pienempiä näytekokoja voidaan käyttää, mutta ne lisäävät ennusteiden epävarmuutta sekä lyhentävät ennusteen kattavuutta. Jos mitattavien ledien lukumäärä on vähemmän kuin 20 yksikköä, tulee se mainita raportoinnissa. Kun mitattavana on vähemmän kuin 20 näytettä voidaan eliniän ennuste tehdä vain 5,5 kertaa mitatun ajan päähän, yli 20 mitatun näytteen kertoimen 6 sijaan. TM-21 metodi ei ole luotettava 10 yksikköä pienemmälle näytekoolle.

### 4.1.2 Mittaväli

Ledien mittauksen mittavälinä voidaan käyttää IES LM-80 mittastandardin 1000 tuntia tai tiheämpää tahtia. Ledien eliniän ennustamiseksi tarvitaan vähintään 6000 tuntia mittadataa. Mittadata yli IES LM-80 standardin suosittaman 6000 tunnin mittauksen parantaa ennusteen tarkkuutta ja kattavuutta.

### 4.1.3 Valovirran ennustaminen

IES TM-21-11 metodin avulla pyritään ennustamaan ledin valovirta sovittamalla mitattuihin valovirran arvoihin muodostettu käyräsovitus. Käyräsovitukselta voidaan sitten selvittää hetki jolloin ledien keskimääräinen valovirta alittaa tietyn prosentuaalisen arvon tai kuinka suuri se on tietyllä ajan hetkellä.

Ensimmäiseksi ledien ensimmäiset mitatut arvot normalisoidaan arvoon 1 (100%) kullekin yksittäiselle ledille. Tämän jälkeen kunkin mittasarjan ledien jokaisen mittapisteen valovirran arvoista lasketaan keskiarvo. Käyräsovitusta varten tarvitaan mittadataa vähintään 6000 tuntia. Kun mittadataa on 6000-10000 tuntia käytetään aina mittadataa viimeisimmältä 5000 tunnilta. Mittauksen ensimmäisen 1000 tunnin mittadataa ei käytetä koskaan. Jos mittausaika on yli 10000 tuntia, käytetään viimeisintä 50% mittadatasta. Kun mitta-aikaa merkitään  $D$  ja  $D/2$  ei osu mittapisteseen, käytetään edellistä edeltävää mittapistettä.

Valitusta mittadatasta muodostetaan pienimmän neliösumman käyräsovitus yhtälöön

$$\phi(t) = B \exp(-at), \quad (4.1)$$

missä  $t$  on aika tunteina,  $\phi(t)$  on valovirran normalisoitu keskiarvo ajan hetkellä  $t$ ,  $B$  on ennustettu vakio PNS-sovituksesta ja  $\alpha$  on PNS-sovituksen kulmakerroin.

PNS-sovituksen arvojen perusteella voidaan selvittää valovirran aika, jolloin se säilyy tietyn prosentuaalisen rajan yläpuolella

$$L_p = \frac{\ln(100 * \frac{B}{p})}{\alpha}, \quad (4.2)$$

missä  $p$  on valovirran arvo prosentteina alkuperäisestä arvosta.

#### 4.1.4 Tulosten esittäminen

Kaavan (4.1) avulla ennustetut eliniät esitetään muodossa  $L_p(Dk)$ , missä  $p$  on ledin valovirta prosentteina alkuperäisestä ja  $D$  on mittauksen kesto tunteina jaettuna 1000 ja pyöristettynä lähimpään kokonaislukuun. Jos ennustettu elinikä on suurempi kuin 6 kertaa mitta-aika, ei tarkkaa ennustetta voida esittää. Tällöin ennustettu elinikä esitetään käyteen  $>$ -symbolia. Elinikä voidaan esittää esimerkiksi muodossa

$$L_{70}(6k) > 36000 \text{ tuntia} \quad (\text{kun } T_s = 55^\circ C, I_F = 350mA), \quad (4.3)$$

missä esitetään myös  $T_s$  eli säilytyslämpötila sekä ohjausvirran arvo  $I_F$ .

Jos ennustettu elinikä on lyhyempi kuin 6 kertaa mitta-aika, voidaan ennustukseen luottaa ja ilmoittaa se tarkemmin. Tällöin merkitään esimerkiksi

$$L_{70}(4k) = 4400 \text{ tuntia} \quad (\text{kun } T_s = 55^\circ C, I_F = 350mA). \quad (4.4)$$

Mikäli ennustuksen arvo on negatiivinen käytetään ledin elinikänä viimeisintä mitta-arvoa. Esimerkkien (4.3)-(4.4) merkintätapaa ja -käytäntöä käytetään myös pienemmillä näytemäärille. Tällöin käytetään ainoastaan kerrointa 5,5 eliniän ennustuksen rajana.

## 4.2 Mittastandardista poikkeava lämpötila

Arrheniuksen yhtälön avulla voidaan muodostaa ennuste mitattujen ledien eliniälle eri lämpötiloissa interpoloimalla kahden tunnetun lämpötilan arvojen välillä.



### 4.2.1 Lämpötilan valinta

Kun halutaan ledin eliniän ennustus lämpötilassa, joka ei vastaa LM-80 metodin mukaisesti mitattuja lämpötiloja 55°C, 85°C tai kolmatta valmistajan suosittamaa arvoa, muodostetaan eliniän ennuste Arrheniuksen yhtälön avulla. Tällöin valitaan lähin matalampi  $T_{s,1}$  sekä lähin korkeampi lämpötila  $T_{s,2}$ , joiden interpolaationa saadaan tarkemmin todellisuutta vastaava ennuste. Lämpötilat  $T_{s,1}$  ja  $T_{s,2}$  muutetaan kelvineiksi kaavalla [16]

$$T_s[K] = T_s[^\circ C] + 273,15. \quad (4.5)$$

### 4.2.2 Arrheniuksen yhtälö

Elektroniikassa voidaan käyttää ns. Arrheniuksen yhtälöä komponenttien lämpötilan aiheuttamien vikojen esiintymisnopeuden arvioimiseksi. Reaktion heikkenemisvakio  $\alpha_i$  (ja PNS-sovituksen kulmakerroin) määritetään kaavalla

$$\alpha_i = A \exp\left(\frac{-E_a}{k_B T_{s,i}}\right), \quad (4.6)$$

missä  $A$  reaktion taajuustekijä,  $E_a$  reaktion aktivoitumisenergia,  $T_{s,i}$  lämpötila kelvineissä ja  $k_B$  Boltzmannin vakio. Heikkenemisvakion  $\alpha_i$  määrittämiseksi metodin suosittelemista lämpötiloista poikkeavassa lämpötilassa  $T_{s,i}$  määritetään aluksi  $\alpha_1$  sekä  $\alpha_2$  lämpötiloille  $T_{s,1}$  ja  $T_{s,2}$  käyräsovituksesta (4.1). Suhde  $E_a/k_B$  määritetään kaavalla

$$\frac{E_a}{k_B} = \frac{\ln \alpha_1 - \ln \alpha_2}{\frac{1}{T_{s,2}} - \frac{1}{T_{s,1}}}. \quad (4.7)$$

Käyttämällä kaavaan (4.7) avulla laskettua suhdetta  $E_a/k_B$  ja sijoittamalla lämpötila  $T_{s,1}$  saadaan reaktion taajuustekijä  $A$  kaavalla

$$A = \alpha_1 \exp\left(\frac{E_a}{k_B T_{s,1}}\right). \quad (4.8)$$

Vakio  $B_0$  PNS-sovitusta varten saadaan

$$B_0 = \sqrt{B_1 B_2}, \quad (4.9)$$

missä  $B_1$  on matalamman lämpötilan vakio ja  $B_2$  korkeamman.

Nyt sijoittamalla lasketut arvot kaavaan (4.6) saadaan sen ja kaavan (4.9) avulla ennustettua ledin elinikä  $L_p$  metodin suosittamista lämpötiloista poikkeavassa lämpötilassa  $T_{s,i}$  kaavalla

$$L_p = \frac{\ln\left(100 \times \frac{B_0}{p}\right)}{\alpha_i}. \quad (4.10)$$

### 4.2.3 Arrheniuksen yhtälön käyttö

Arrheniuksen yhtälöä voidaan käyttää vain tapauksissa, kun molemmat heikkene-  
misvakiot  $\alpha_1$  tai  $\alpha_2$  ovat positiivisia. Jos ainoastaan toinen arvoista on positiivinen,  
käytetään tällöin vastaavan lämpötilan ennustetta kaavan (4.2) mukaisesti. Molem-  
pien arvojen ollessa negatiivisia (eli PNS-sovituksen ollessa positiivinen ja ledin valo-  
virran siis kasvaessa) merkitään eliniän ennuste kuusi kertaa mitta-ajan mittaiseksi  
ja kaikki arvot ennustetun eliniän jälkeen oletetaan yhtä suuriksi tai pienemmiksi.

Arrheniuksen yhtälöä ei voida käyttää eliniän ennustamiseen lämpötiloissa, jotka  
ovat korkeampia kuin korkein mitattu lämpötila. Jos halutaan ennuste ledin eliniälle  
alinta mitattua lämpötilaa matalammassa lämpötilassa, käytetään kyseisen lämpö-  
tilan arvoja.

## 4.3 Pienimmän neliösumman sovitus

Pienimmän neliösumman sovitus on yleinen menetelmä käyränsovituksessa isoon  
joukkoon datapisteitä. PNS-sovituksen avulla voidaan joukkoon mittatuloksia so-  
vittaa malli, jonka parametreilla on selkeä fysikaalinen merkitys. Täten sen avulla  
voidaan selvittää lainalaisuuksia mitta-datasta. Ledien valovirran eliniän selvittämi-  
seksi käytetään PNS-sovitusta mittadataan yllä esitetyn mallin mukaisesti. Johtuen  
valovirran heikkenemisen ei-lineaarista luonteesta ei PNS-sovituksen arvoja voida  
johtaa kuin tietyllä aikavälillä. [17]

Pienimmän neliösumman lineaarinen sovitus on muotoa

$$y = mx + b, \quad (4.11)$$

missä  $m$  on kulmakerroin:

$$m = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (4.12)$$

ja  $b$  on leikkauspiste

$$b = \frac{\sum y - m \sum x}{n}. \quad (4.13)$$

Korvaamalla

$$x = t \quad (4.14)$$

ja

$$y = \ln \phi \quad (4.15)$$

saadaan kaavojen (4.12)–(4.13) avulla johdettua kaavan (4.2) arvot

$$B = \exp(b) \quad (4.16)$$

ja

$$\alpha = -b. \quad (4.17)$$

---

## Fotometria ja värikoordinaatistot

---

Valaisimien toiminnan kuvaamiseksi on useita suureita, jotka on syytä tuntea. Tässä luvussa tutustutaan sekä fotometriin suureisiin, että värikoordinaatistoihin.

### 5.1 Fotometriset suureet

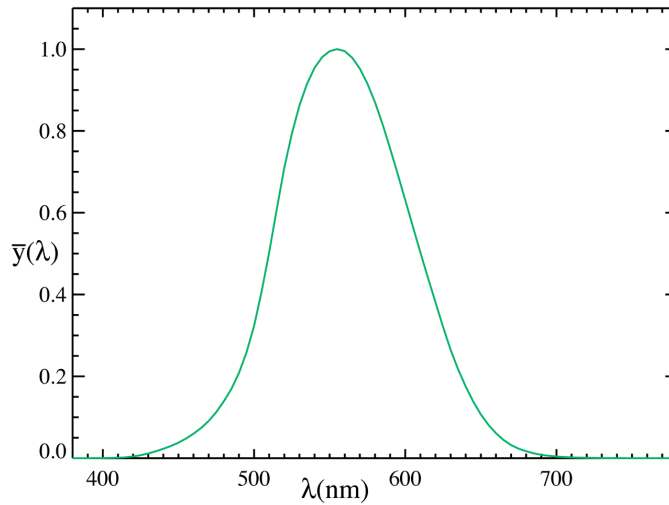
Radiometriset suureet kuvaavat sähkömagneettisen säteilyn voimakkuutta ja muita ominaisuuksia. Kun tutkitaan radiometriä suureita ihmissilmälle näkyvän valon tapauksessa, muodostetaan radiometrisistä suureista usein fotometriä. Fotometriset suureet ovat radiometriä suureita, jotka on painotettu ihmissilmän herkkyydellä kirkkaassa valaistuksessa aallonpituuden suhteen. Päivänäön olosuhteissa ihmisen silmä on herkimmillään aallonpituudella 555 nm. Kuvassa 5.1 on esitettyä ihmisen päivänäön herkkyyssä. [18]

#### 5.1.1 Valovirta

Valovirta  $\Phi_v$  on säteilytehosta  $\Phi = \frac{dQ}{dt}$ , missä Q on lähteen säteilyenergia, johdettu fotometrinen suure, joka kuvaa valoistimuksen intensiteettiä ihmissilmälle. Olkoon  $V(\lambda)$  ihmissilmän herkkyyssä. Tällöin

$$\Phi_v = k \int_{380}^{780} \frac{d\Phi}{d\lambda} V(\lambda) d\lambda, \quad (5.1)$$

missä  $k=683$  lm/W. Valovirran yksikkö on lumen (lm).



**Kuva 5.1:** Ihmisen päivänäön herkkyyskäyrä.

### 5.1.2 Valovoima

Valovoima  $I_v$  on pistemäisen lähteen tiettyyn avaruuskulmaan säteilemä teho. Se muodostetaan valovirrasta seuraavasti

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\omega}, \quad (5.2)$$

missä  $d\omega$  on avaruuskulma. Valovoiman yksikkö on kandela (cd).

### 5.1.3 Valaistusvoimakkuus

Valaistusvoimakkuus  $E_v$  kuvaa pinnalle tulevan valon valovirtaa. Valaistusvoimakkuus saadaan kaavasta

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{ds_o}, \quad (5.3)$$

missä  $ds_o$  on valaistu pinta-ala. Valaistusvoimakkuuden yksikkö on  $lm/m^2$  eli luks (lx).

### 5.1.4 Luminanssi

Luminanssi eli valotiheys  $L_v$  kuvaa pintaelementille saapuvaa, siitä lähtevää tai sen läpäissyttä tehoa annetussa suunnassa ja määritettyyn kulmaan. Se määritellään kaavalla

$$L_v = \frac{d\Phi_v}{ds_0 d\omega}. \quad (5.4)$$

Luminanssin yksikkö on  $lm/m^2 sr = cd/m^2$ .

## 5.2 Ledien väri

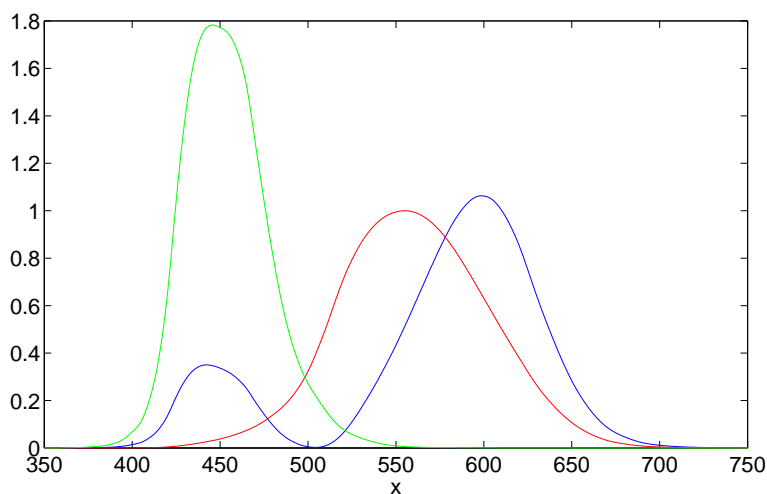
Ledit emittoivat vain kapean aallonpituuskaistan. Näkyvän valon alueella tämä tarkoittaa, että ledi ei voi itsessään emittoida valkoista valoa. Tämän ongelman ratkaisuksi käytetään pääasiassa kahta menetelmää. Valkoinen valo muodostetaan joko käyttäen kolmea eri väristä lediä, joiden intensiteetin välistä suhdetta muuttamalla voidaan luoda valkoista valoa [19]. Tällaista lediä kutsutaan RGB-lediksi. Toinen yleisemmin käytetty menetelmä on päällystää ledi fluoresoivalla aineella. Tässä opinäytetyössä käytetyt ledit perustuvat jälkimmäiseen menetelmään, joten tarkastelu keskitetään niihin.

### 5.2.1 Fluoresenssiin pohjautuvat valkoiset ledit

Fluoresenssi on ilmiö, jossa fluoresoivan aineen molekyylit absorboivat fotonin viritäten sen ulkokuoren elektronin korkeammalle energiatilalle. Kun elektronin viritystila purkautuu, voi molekyyli emittoida joko samanenergisestä tai matalampienergisestä fotonin. Jos emittoitunut fotoni on matalampienerginen, ylimääräinen energia muuttuu lämmöksi. Kun fluoresenssi-ilmiö tapahtuu UV-valolle, on molekyylin emittoima matalaenergisempi fotoni usein näkyvän valon aallonpituuden luokkaa.

Fluoresenssi-ilmiötä käytetään hyväksi ledien valmistuksessa. Fluoresenssiin pohjautuvat valkoiset ledit emittoivat usein joko matalaenergistä UV-valoa tai sinistä valoa. Kun tämä valo virittää fluoresoivan aineen elektronit, tapahtuu ns. Stokesin siirtymä, missä osa korkeaenergisemmästä sinisestä tai UV-valosta muuttuu matalaenergisemmäksi. Nyt jäljelle jäänyt sininen valo ja Stokesin siirtymän synnyttämä uusi piikki spektrissä synnyttävät spektrin, joka säteilee valkoisena valona. Stokesin siirtymä aiheuttaa energiahäviötä ledissä, mikä heikentää ledin tehokkuutta. [20]

Fluoresenssin sijaan valkoista valoa säteileviä ledejä voidaan valmistaa myös kolmen tai useamman ledin erivärisen ledin avulla. Tällaisia ledivalaisimia kutsutaan RGB-ledeiksi. Niiden toiminta perustuu superpositioon eli erilaisten spektrien yhteisvaikutuksen muodostamaan spektriin [21].



**Kuva 5.2:** Väriinsovitusfunktiot.

### 5.2.2 Värikoordinaatistot

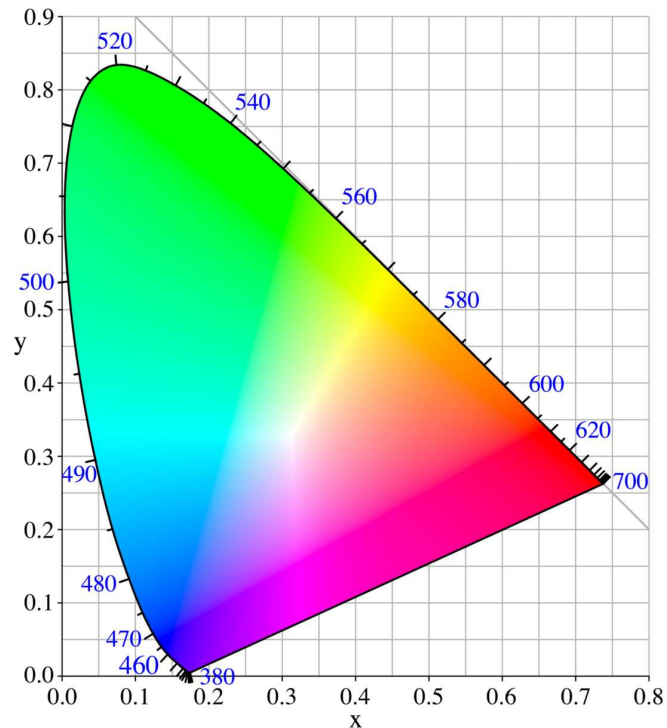
Tristimulusarvot ovat se pohja, jolta muut värikoordinaatistot muodostetaan. Ne ovat kolme arvoa  $X$ ,  $Y$  ja  $Z$ , joiden väliset suhteet kuvaavat väriä ja suuruus intensiteettiä. Tristimulusarvot muodostetaan integroimalla lähteen säteilemän kokonaisenergian  $S(\lambda)$  ja ns. väriinsovitusfunktion ( $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  ja  $\bar{z}$ ), joka kuvaa ihmisen näköjärjestelmän vaikutusta värin havaitsemiseen, välisen tulon yli. Kun tulos vielä kerrotaan vakiolla  $k$ , jonka arvo on 683, saadaan  $Y$ :lle absoluuttinen tulos ihmissilmän havaitsemalle kirkkauden intensiteetille yksiköissä  $\text{cd}/\text{m}^2$ . Ilman vakiota intensiteetin arvot ovat vain suhteellisia. Toinen yleinen käytäntö on normittaa tristimulusarvot siten, että  $Y$  saa arvon 100. Tristimulusarvot muodostetaan seuraavasti

$$X = k \int S(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \quad (5.5)$$

$$Y = k \int S(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \quad (5.6)$$

$$Z = k \int S(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda. \quad (5.7)$$

Tristimulusarvoista voidaan nähdä, jos kaksi väriä vastaavat toisiaan, mutta niistä ei voi päätellä värieroa kahden eri tristimulusarvot omaavan värin välillä [22]. Tätä varten onkin kehitetty muita värikoordinaatistoja.



**Kuva 5.3:** xy-värikoordinaatisto.

$xyY$  värikoordinaatit määritetään tristimulusarvoista. Niiden etuna näihin on selkeämpi esitys eri väreille.  $Y$  arvo pidetään tristimulusarvoista, koska se kuvaa valon intensiteettiä ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ).  $x$  ja  $y$  arvot määrittävät värin yksinkertaisessa koordinaatistossa siten, että valkoisen valon koordinaatit ovat  $(0,33; 0,33)$ .  $xyY$  koordinaatit lasketaan seuraavasti tristimulusarvoista

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (5.8)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (5.9)$$

$xy$ -värikoordinaatisto ei kuitenkaan muodosta havainnollisesti yhtenäistä värikoordinaatistoa. Ero värissä ei ole suoraan selkeä koordinaattien välisestä etäisyydestä. Tämä on selkeästi havaittavissa kuvasta 5.3. Tämä on erityisesti havaittavissa esim. vihreän suhteettoman suuresta alueesta koordinaatistosta.

Korreloitu värilämpötila (CCT) kuvaa miten väri vastaa tietyn lämpöisen Planc-



kin mustan kappaleen säteilemää väriä. Musta kappale on ideaalinen kappale, joka absorboi kaiken siihen kohdistuvan säteilyn heijastamatta sitä lainkaan takaisin. Musta kappale on kuitenkin termisessä tasapainossa emittoimalla ylimääräisen energian säteilyinä. Juuri tästä kappaleen säteilemästä energiasta muodostetaan korreloitu värilämpötila. Korreloitu värilämpötila määritetään empiirisellä kaavalla

$$T = -437n^3 + 3691n^2 - 6861n + 5524,31, \quad (5.10)$$

missä  $n = \frac{x-0,3320}{y-0,1858}$ . Korreloidun värilämpötilan arvot muuttuvat punaisesta ja keltaisesta valkoisiksi noin 5000K paikkeilla. Korkeammat arvot noin 8000K kohdalla alkavat saada sinisen sävyjä. Perinteisen hehkulampun värilämpötila on noin 2700K, kun taas LED-lamput voivat saavuttaa arvoja laajalla kaistalla [23].

CIELAB on vielä xyY väriavaruutta selkeämpi malli värin mallintamiseen. Sen arvot lasketaan seuraavasti

$$L^* = 116 \left[ f \left( \frac{Y}{Y_n} \right) - \frac{16}{116} \right] \quad (5.11)$$

$$a^* = 500 \left[ f \left( \frac{X}{X_n} \right) - f \left( \frac{Y}{Y_n} \right) \right] \quad (5.12)$$

$$b^* = 200 \left[ f \left( \frac{Y}{Y_n} \right) - f \left( \frac{Z}{Z_n} \right) \right] \quad (5.13)$$

missä  $f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3}$ , kun  $\frac{Y}{Y_n} > 0.008856$ , ja  $f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = 7.787\left(\frac{Y}{Y_n}\right) + 16/116$  muulloin. Funktio  $f$  on määritelty samoin myös muille muuttujille. Arvot  $X_n$ ,  $Y_n$  ja  $Z_n$  kuvaavat valitun standardin tristimulusarvoja, joihin mitattavaa väriä ja kirkkautta verrataan. CIELAB perustuu vastaväriteoriaan, joten väriä kuvaavat arvot  $a^*$  ja  $b^*$ , kuvaavat useita eri värejä.  $a^* < 0$  kuvaa vihertävää väriä, kun taas  $a^* > 0$  kuvaa punertavaa.  $b^* < 0$  kuvaa vastaavasti sinertävää väriä, kun  $b^* > 0$  kuvaa kellertävää.  $L$  kuvaa valon intensiteettiä, joka muodostaa koordinaatiston korkeuden. Valon värisävy voidaan myös määrittää  $a^*$  ja  $b^*$  välisenä kulmana. Valon kroma puolestaan määritetään kohtisuorana etäisyytenä  $L$ -akselista.

CIELAB-arvot voidaan muokata edelleen määrittämään värieroa.  $\Delta E_{ab}^*$  kuvaa kokonaiseroa, johon sisältyy myös intensiteetistä johtuvat erot, kun taas  $\Delta H_{ab}^*$  sisältää vain väriominaisuuksista johtuvat erot.  $\Delta E_{ab}^*$  ja  $\Delta H_{ab}^*$  ovat eukliidisia etäisyyksiä kahden eri värin välillä.  $\Delta E_{ab}^*$  voi muuttua myös  $L$ -akselilla, koska se sisältää myös

intensiteetti-informaatiota.  $\Delta H_{ab}^*$  puolestaan on etäisyys kahden eri värikoordinaattien välillä (ja sijaitsee siis näin pelkästään tasossa).

Väriero on sitä huomattavampi, mitä suurempia  $\Delta E_{ab}^*$ :n tai  $\Delta H_{ab}^*$ :n arvot ovat. Teoriassa ykköstä suuremmat arvot ovat silminhavaittavia eroja. On kuitenkin huomattava, että vaiheittainen värin muuttuminen on vaikeampaa erottaa. Lisäksi kunkin ihmisen värinäköjärjestelmä näkee värit hieman erilaisina, joten selkeämpi ero toiselle havaitsijalle saattaa olla vähemmän selkeä jollekulle toiselle havaitsijalle.

Yhtälöt  $\Delta E_{ab}^*$ :lle ja  $\Delta H_{ab}^*$ :lle ovat seuraavanlaiset

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L^* - L_s^*)^2 + (a^* - a_s^*)^2 + (b^* - b_s^*)^2} \quad (5.14)$$

$$\Delta H_{ab}^* = \sqrt{(\Delta E_{ab}^*)^2 - (L^* - L_s^*)^2 - (\Delta C_{ab}^*)^2} \quad (5.15)$$

$$\Delta C_{ab}^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} - \sqrt{a_s^{*2} + b_s^{*2}}, \quad (5.16)$$

missä alaviite  $s$  viittaa referenssipisteen arvoon. Tässä raportissa esitettyjä tuloksia verrattiin keskenään ennen ja jälkeen rasituskokeita mitattuihin arvoihin, joten referenssipisteenä on aina kirkkaampi näistä tuloksista. [24]

---

## Ledien pitkäaikainen mittaus

---

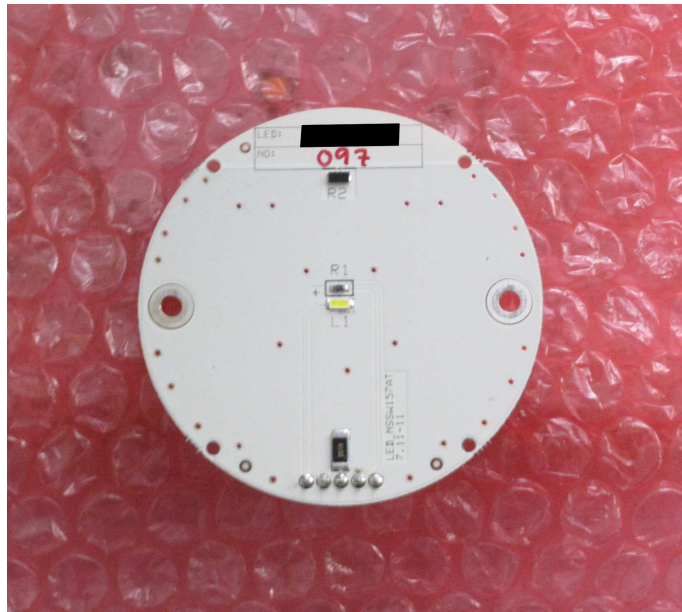
Ledien elinikää sekä polton aiheuttamia muutoksia tutkittiin mittaamalla erimerkkisten ledien fotometriset suureet tuhansien tuntien välein. Tässä luvussa käydään läpi ledien pitkäaikainen mittaus ja saadut tulokset.

### 6.1 Mitatut ledit

Ledien eliniän mittaukseen valittiin viisi eri ledimallia neljältä eri valmistajalta. Kutakin merkkiä valittiin 40 kappaletta, jotta varmistettiin riittävä tarkkuus ledien eliniän ennustamiseksi. Kustakin ryhmästä laitettiin 20 lediä  $55^{\circ}\text{C}$ , 10 lediä  $85^{\circ}\text{C}$  ja 10 lediä  $95^{\circ}\text{C}$  lämpötilaan. Lämpötilat eivät ole ledeiltä mitattuja lämpötiloja vaan mittatilojen lämpötiloja. Mitattavia ledejä on yhteensä 200 kappaletta. Ledien suuri määrä takaa myös, että vaikka mittauksen aikana muutamia ledejä hajoaisikin riittää nittä kuitenkin myös viimeisiin mittauksiin. Eri valmistajien ledejä merkitään kirjaimilla A, B, C, D ja E.

Ledit kiinnitetään sarjaan siten, että 10 lediä sijoitetaan aina yhdelle ”lankulle”. Kullekin lankulle syötetään tasavirtaa virtalähteeltä. Lankut kiinnitetään mittatilojen seinille.

Ledien ohjausvirta on 700 mA paitsi ryhmän D ledejä ohjataan vain 150 mA virralla. Ledit muodostuvat itse LED-yksiköstä sekä virtapiirilevyyn valmistetusta elektroniikasta. LED-yksiköt sisältävät myös yksinkertaisen linssin, johon sisältyy myös fluoresoiva aine, joka muodostaa ledien valkoisen värin. Kuvassa 6.1 on esitetty yksi mitattavista ledeistä. Ledien kirkkaudet ovat luonnollisesti riippuvia niiden mallista. Ryhmän D ledit ovat luonnollisesti himmeimpiä johtuen pienemmästä virrasta.



**Kuva 6.1:** Mitattu lediyksikkö.

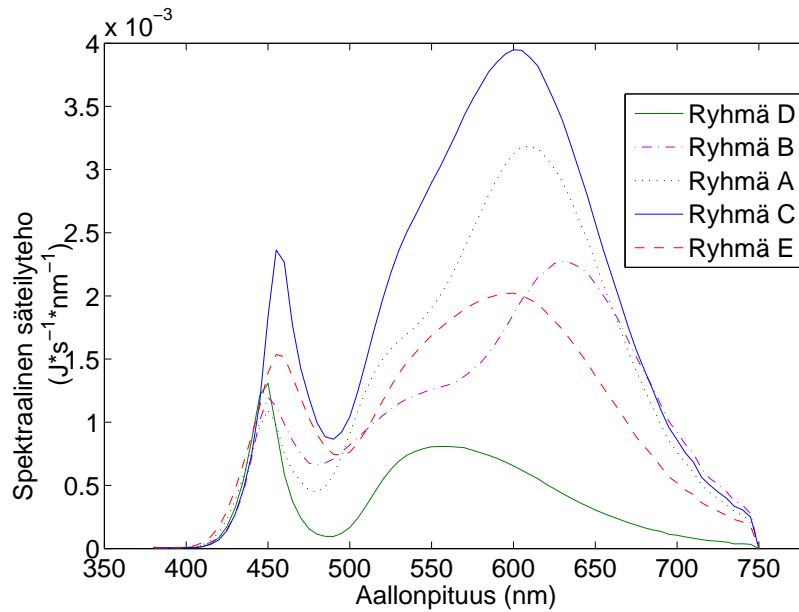
Ledien spektrit ovat esitettyinä kuvassa 6.2. Kuvasta 6.2 havaitaan, että ledien spektrit muodostuvat niiden emittoimasta sinisen valon piikistä sekä fluoresoivasta aineesta johtuvasta laajemmasta käyrästä. Fluoresenssi ilmiönä selvitettiin edellisessä kappaleessa.

## 6.2 Mittalaitteisto

Ledien elinikää selvitettäessä tulee niitä IES LM-80 mittastandardin mukaan polttaa kolmessa eri lämpötilassa. Ledien ohjaamiseen käytetyn virran tulee täyttää tietyt kriteerit kuten myös muiden mittaolosuhteiden. Tämän vuoksi ledien mittaamiseen käytetty mittalaitteisto tulee valita huolella. Seuraavassa käydään läpi ledien mittaamiseen käytetty mittalaitteisto.

### 6.2.1 BTS256-LED Tester

BTS256-LED Tester on helppokäyttöinen, pieni ja kannettava mittaväline ledien valontuoton mittaamiseen. Olennainen osa BTS256 Testerin toimintaa on pieni integroiva pallo, joka on kuitenkin riittävä pienien valonlähteiden kuten yksittäisten ledien luotettavaan mittaamiseen. Integroiva pallo heijastaa sisään johdetun valon



**Kuva 6.2:** Ledien spektrit.

monta kertaa diffuusisti heijastavilta pinnoilta. Näin pallon sisäpinnalle, ja sillä sijaitseville detektoreille, saadaan täysin tasainen valaistus. Pallon sisäpinnalta mitataan detektoreilla säteilyteho kutakin aallonpituusarvoa kohden ( $W/nm$ ). LED Tester muuntaa säteilytehon valovirraksi (lm) korjaamalla säteilytehon arvot ihmisen silmän herkkyyttä vastaavalla  $V(\lambda)$ -arvolla.

BTS256-LED Testeriin kuuluu myös vaihdettava komponentti valaistusvoimakkuuden mittaamiseksi. Normaalisti valovirtaa mitatessa käytetään kaiken valon kokoavaa kartiomaista päätä, mutta LED Testerillä on kuitenkin myös mahdollista mitata valaistusvoimakkuutta käyttämällä diffusoivaa komponenttia valon kokoamiseen. Kuten valovirrankin tapauksessa laite mittaa ensin radiometrisen suureen, tässä tapauksessa säteilyn tehosiheyden kutakin aallonpituutta kohden ( $W/m^2*nm$ ). Korjaamalla tämä arvo jälleen ihmisen silmän herkkyyttä vastaavalla  $V(\lambda)$ -arvolla saadaan valaistusvoimakkuuden arvo (lux).

BTS256:n optiset sensorit koostuvat valovirran mittaamiseen käytettävistä integroivasta mittalaitteesta sekä spektraalista informaatiota mittaavista komponenteista. Laitteella voidaan mitata valon spektri 5 nm välein. Spektraalinen data voidaan muokata myöhemmin esim. eri värikoordinaattiarvoiksi.



**Kuva 6.3:** BTS256-LED Tester varustettuna valovirran mittaamiseen tarkoitulla kartiolla.

Kun mitataan suurempia valonlähteitä, ei BTS256-LED Testerin integroiva pallo ole välttämättä riittävä. Mittalaite voidaan kuitenkin liittää Gigahertz-Optikin suurempiin integroiviin palloihin. Tällöin LED Tester toimii käytännössä pelkkänä mittalaitteena suuremman integroivan pallon hoitaessa valon diffuusin sekoittumisen. BTS256:ssa on sisäinen valonlähde valon absorption aiheuttamien virheiden korjaamiseen. BTS256-LED Tester on kalibroitu todettavasti ja jäljitettävästi, joten sen mittatulokset ovat luotettavia.

### 6.2.2 Virtalähteet

Ledeille syötetään virtaa normaaleista virtalähteistä niiden pitkäaikaisen polton aikana. Mittauksia varten ledilankuille käytetään kuitenkin tarkempia virtalähteitä,

jotka noudattaa IES LM-80 mittastandardin tarkkuusvaatimuksia. Tarkempia virtalähteitä ei voida käyttää pitkäaikaisen polton aikana niiden rajallisen määrän vuoksi.

### **6.2.3 Mittausolosuhteet**

IES LM-80 mittastandardin mukaan ledit tulee säilyttää kolmessa eri lämpötilassa. Eri olosuhteet on valmistettu kolmeen eri tilaan. 55° ja 85° ympäristöt on valmistettu eristettyihin huoneisiin, joiden lämpötilaa ja ilmankosteutta voidaan kontrolloida mittastandardin mukaisten vaatimusten mukaisesti. 95° ympäristö on taas muodostettu erityiseen lämpökaappiin, jonka olosuhteita voidaan kontrolloida hyvin tarkasti. Ledien lämpötilaa seurataan reaaliaikaisesti läpi polton.

## **6.3 Mittaukset**

Ledien eliniän mittaukset aloitettiin vuoden 2012 alussa. Valittujen 200 ledin spektrit mitattiin alkustandardiksi ennen kuin niiden poltto aloitettiin. Jatkossa ne mitattiin aina 1000 tunnin eli noin 42 päivän välein. Pitkä aikaväli mittausten välillä aiheuttaa monia haasteita kuten mahdolliset katastrofaaliset hajoamiset, ajan tarkan mittaamisen ja ylösmerkitsemisen sekä mittaolosuhteiden kontrolloinnin. Mittauksia on takana tämän opinnäytetyön kirjoituksen aikaan takana 4000 tuntia.

### **6.3.1 Ledien poltto**

Ledejä poltetaan jatkuvasti tasaisella virralla elinikämittauksen ajan niille valituissa mittaolosuhteissa. Kutakin ledilankkua ohjataan omalla virtalähteellä. Virtalähteinä käytetään vähemmän tarkkoja laitteita tarkkojen virtalähteiden pienen lukumäärän vuoksi. Ledien sekä mittatilan lämpötilaa ja muita olosuhteita tarkkaillaan reaaliaikaisesti. Lämpötiladata tallennetaan myös muistiin, joten siitä voidaan havaita mahdollisten katastrofaalisten hajoamisten ajankohta.

Eryistä huomiota kiinnitettiin ledien polton keston. Aina kun ledit ovat päällä ajastetaan niiden poltto, jotta mittadata olisi mahdollisimman tarkkaa. Yllättävät muutokset ledien poltonajassa kuten sähkökatkokset huomioidaan ja korvataan. Ledien mittavälin määrittämiseksi muodostettiin yksinkertainen MATLAB-ohjelma.

### 6.3.2 Ledien Mittaukset

Ledit mitataan siis aina 1000 tunnin välein. Fotometriset mittaukset suoritetaan LED Tester mittalaitteella. Mittalaitteen rakenteen vuoksi se sopii erinomaisesti tähän tarkoitukseen. Mittalaitteen mittapään kartiomainen pää asetetaan ledin päälle siten, että se ympäröi ledin kokonaan. Näin saadaan mitattua ledin kokonaisvalovirta siten, että vain minimaalinen määrä valoa pääsee karkaamaan mittalaitteen integroivasta pallosta. Mittauksen aikana kiinnitetään erityistä huomiota ledien linsseihin. Mittapäällä voi irroittaa helposti ledin linssin paikoiltaan.

Ledien virtalähteet vaihdetaan mittauksen ajaksi tarkempaan, standardin rajat täyttävään, virtalähteeseen. Ennen kunkin ledilankun mittausta hehkutetaan ledejä uudella virtalähteellä kunnes ne ovat saavuttaneet termisen tasapainon ja niiden valontuotto on tasainen. Käytännössä tämä on tapahtunut noin viidessä minuutissa käytetyissä mittatiloissa.

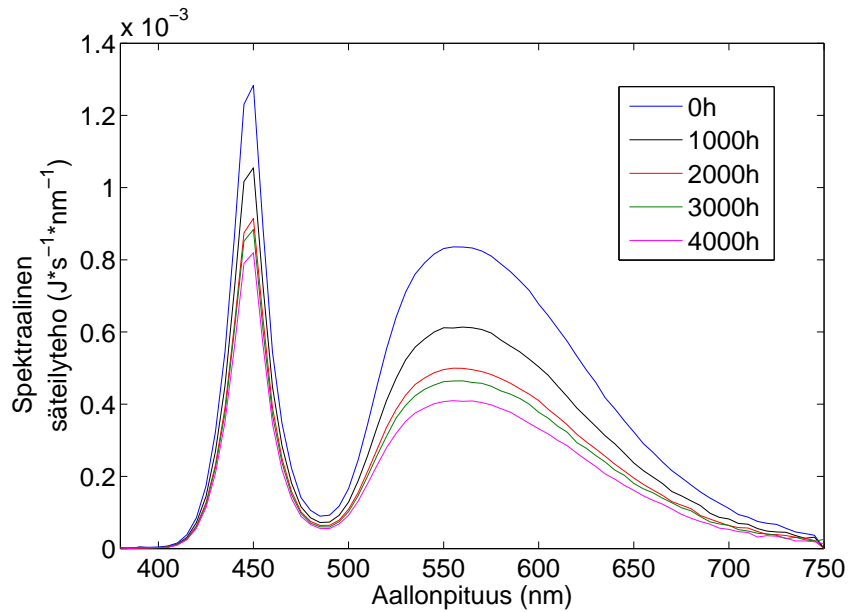
Ledeiltä mitataan spektri mittalaitteella ja tallennetaan tietokoneelle. LED Tester muodostaa lisäksi valmiiksi tiedoston spektrin lisäksi valonlähteen valovirrasta, värikoordinaateista ja muista fotometrisistä suureista. Lisäksi mittausten aikana tarkistetaan mahdollisesti sammuneet tai muuten hajonneet ledit.

### 6.3.3 Mittadata

Ledit mitattiin IES LM-80 standardin mukaisesti jaoteltuina eri ryhmiin. Ledit mitattiin siis 1000 tunnin välein. Ledien valovirran keskiarvot kullekin lediryhmälle ovat esitettynä kuvissa 6.5–6.8. Kuvaajissa on esitettynä ledien valovirta ajan funktiona. Tuloksista on poistettu katastrofaalisesti hajonneiden ledien valovirran arvot.

Eri ledimerkkien välillä on heti havaittavissa selviä eroja. Ledien B ja D valovirta on laskenut 70% tai pienemmäksi alkuperäisestä valovirran arvosta 85°C ja 95°C lämpötiloissa poltetuille ledeille. Lämpötilassa 95°C poltetut ledit ovat jopa himmenneet alle 50% alkuperäisestä kirkkaudesta. Himmenemistä voidaan pitää merkittävänä havaintona, kun otetaan huomioon, että ledejä on poltettu vasta alle puolet suunnitellusta ajasta. Muutos A ja C ledien valovirrassa on minimaalinen verrattuna edellisiin. Näiden ledien valovirta on heikentynyt 4000 tunnin kohdalla vain noin 10% alkuperäisestä. Lisäksi havaitaan, että korkeampien lämpötilojen vaikutus on suhteellisesti pienempi A ja C ledeillä. Mielenkiintoinen havainto A ja C ledeistä on lisäksi se, että ne ovat teholtaan voimakkaammin heikentyneitä B ja

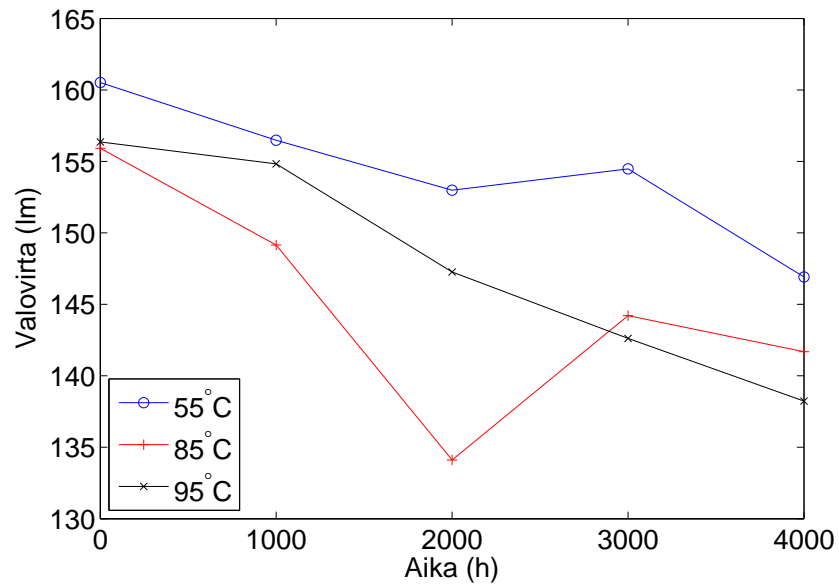




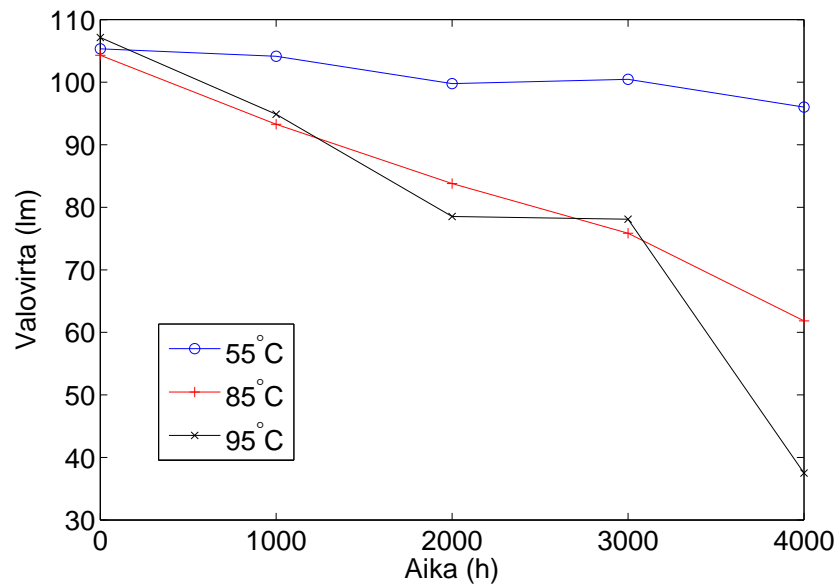
**Kuva 6.4:** Yksittäisen ledimallin D ledin spektri eri ajan hetkillä.

D ledejä kirkkaampia. Ryhmän C ledeillä havaitaan ensimmäisten tuhansien tuntien aikana valovirran selkeää kasvua. Kyseinen ilmiö ei ole tuntematon ja sen aiheuttaman häiriön eliniän ennustamiseen vuoksi suositetaankin mittastandardissa pidempiä mitta-aikoja 6000h minimin sijaan [11].

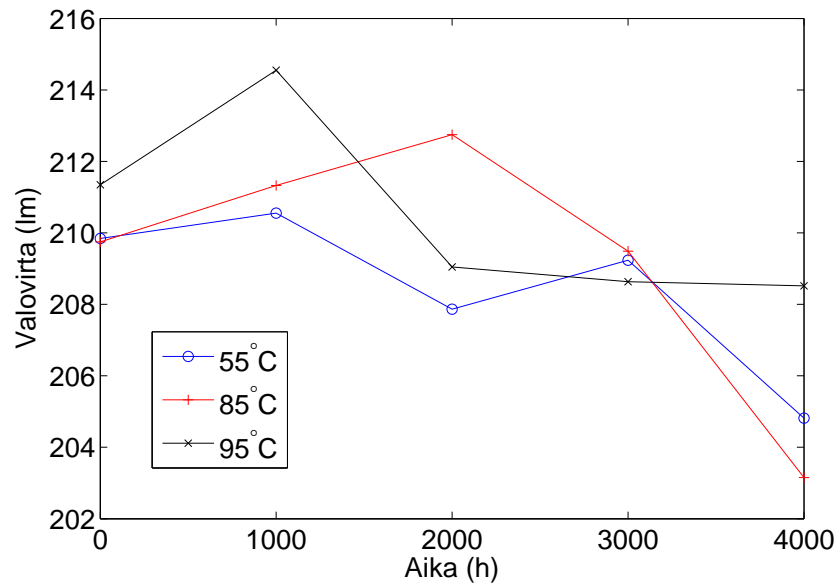
Elinikämittausten aikana on jo esiintynyt useita katastrofaalisia hajoamisia. Viidennen tutkitun ledimallin ledit ovat hajonneet siinä määrin, että niiden käsittely jätetään tämän opinnäytetyön ulkopuolelle. Näiden lisäksi myös mallin B ledit ovat hajonneet suurissa määrin. Ryhmän B ledien hajoaminen ei kuitenkaan johdu elektronisesta viasta tai itse ledin hajoamisesta vaan ledin linssin irtoamisesta. Linssien irtoamista on esiintynyt lämpötiloissa 85°C ja 95 °C. Matalammassa lämpötilassa on irronnut neljän ledin linssit, kun 95°C lämpötilassa niitä on irronnut kuusi 4000 tuhanteen tuntiin mennessä. Ledien valovirta romahtaa linssin irrotessa, sillä ledin fluoresoiva aine sijaitsee linssillä. Suurin osa ledin emittoimasta sähkömagneettisesta säteilystä on UV-valoa, mikä muuttuu ihmissilmälle näkyviksi aallonpituuksiksi Stokesin siirtymässä [18]. Täten ledin valovirta heikkenee linssin irrotessa, vaikka sen emittoiman sähkömagneettinen energia itseasiassa kasvaa.



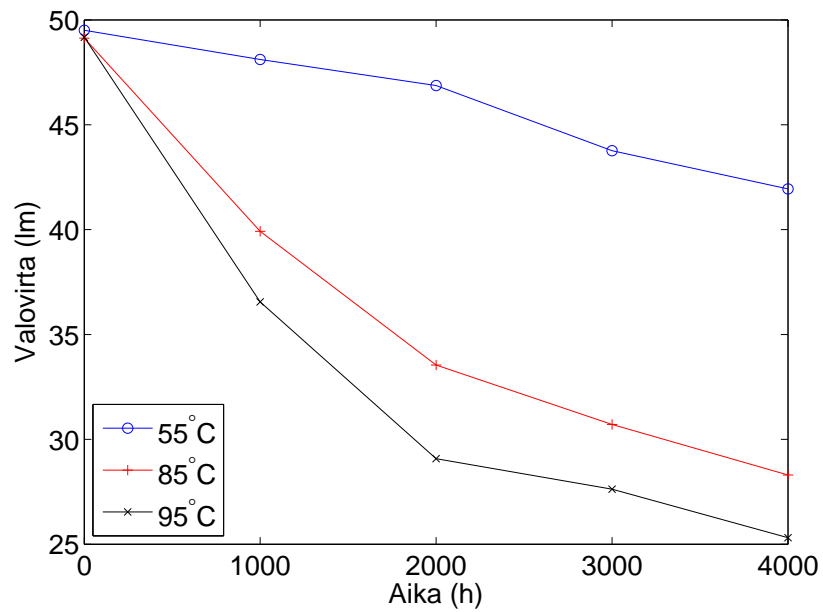
**Kuva 6.5:** Mallin A ledien valovirran keskiarvo ajan funktiona.



**Kuva 6.6:** Mallin B ledien valovirran keskiarvo ajan funktiona.



**Kuva 6.7:** Mallin C ledien valovirran keskiarvo ajan funktiona.

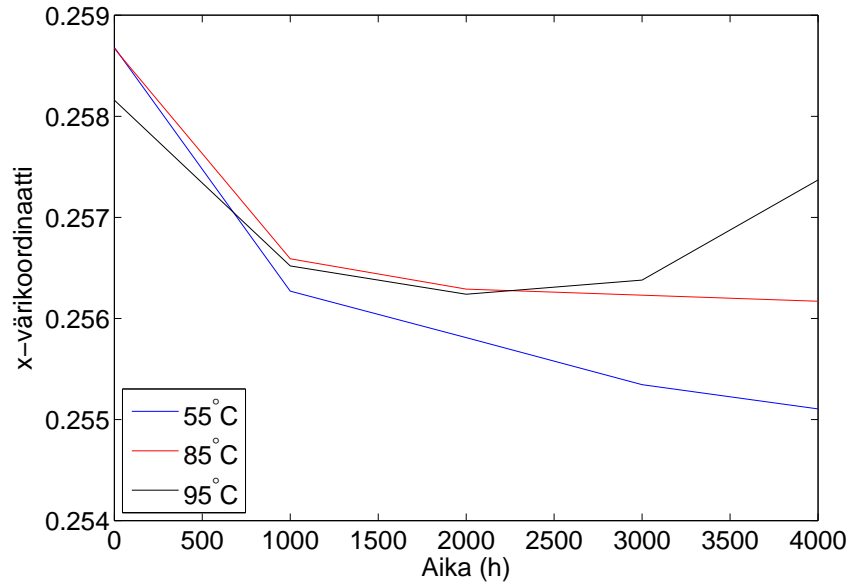


**Kuva 6.8:** Mallin D ledien valovirran keskiarvo ajan funktiona.

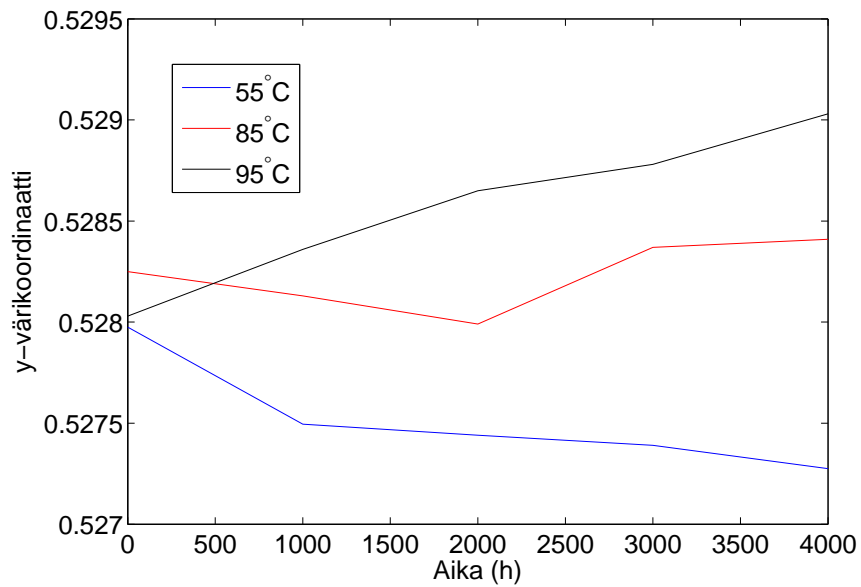
## 6.4 Ledien emittoiman valon värin muuttuminen elinikämittausten aikana

Ledien eliniän lisäksi tutkittiin niiden emittoiman värin muutosta rasituksen ja polton aikana. Värikoordinaattien arvot saadaan LED Testerillä suoritetuista mittauksista. LED Tester mittaa ledin spektrin ja laskee siitä sisäisesti ledin säteilemän valovirran sekä erinäiset väriarvot.

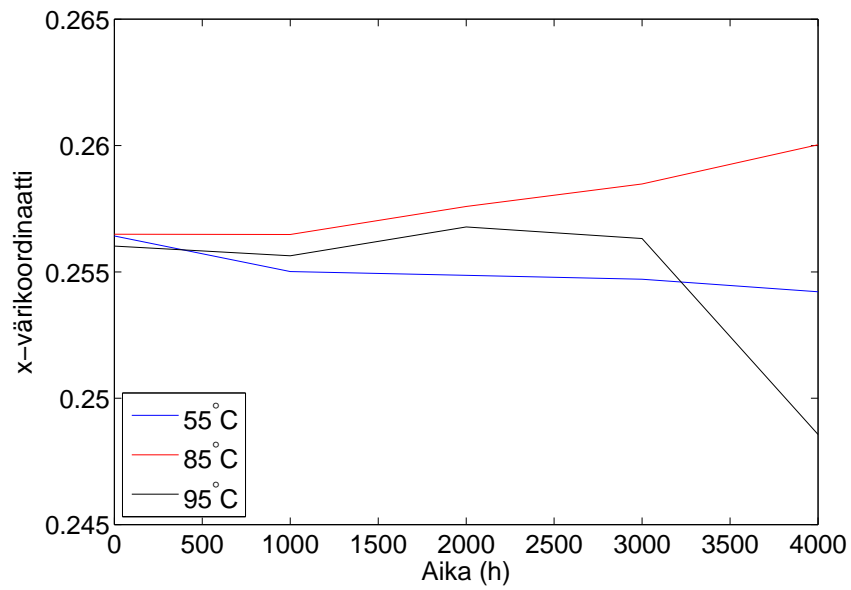
Mitattavien ledien värintoistoa tutkittiin niiden eliniän mittaamisen lisäksi. Kuvissa 6.9–6.16 on esitettyä ledien x- ja y-värikoordinaattiarvot ajan funktiona. Tuloksista havaitaan, että värinmuutos on minimaalista kaikilla ryhmillä lukuunottamatta ryhmän B 95°C poltettuja ledejä. Näiden ledien värissä on tapahtunut merkittävä muutos sinertävämpään väriin. Muutos voi johtua ledien fluoresoivan kerroksen heikkenemisestä ja irtoamisesta, vaikka pahiten vaurioituneiden yksikköjen arvot on poistettu tuloksista.



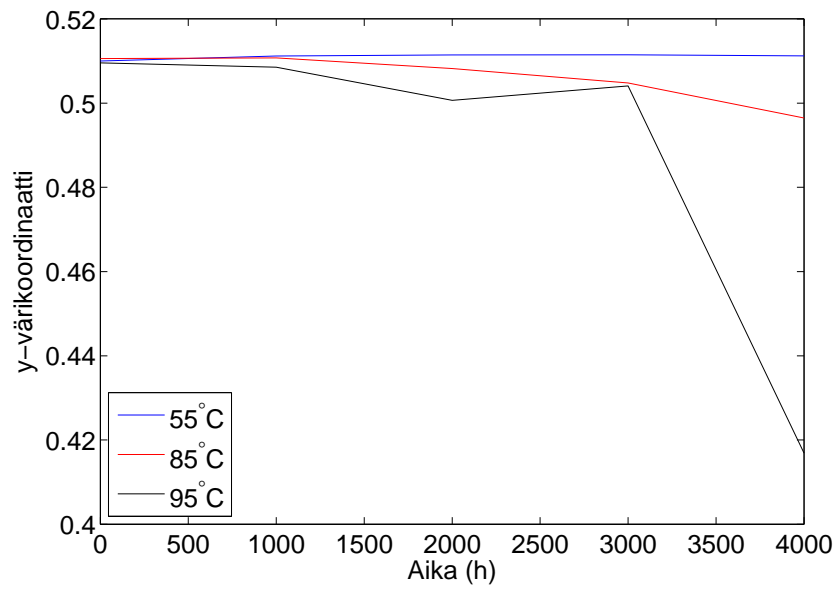
**Kuva 6.9:** Ryhmän A ledien keskiarvoitetut x-värikoordinaattien arvot.



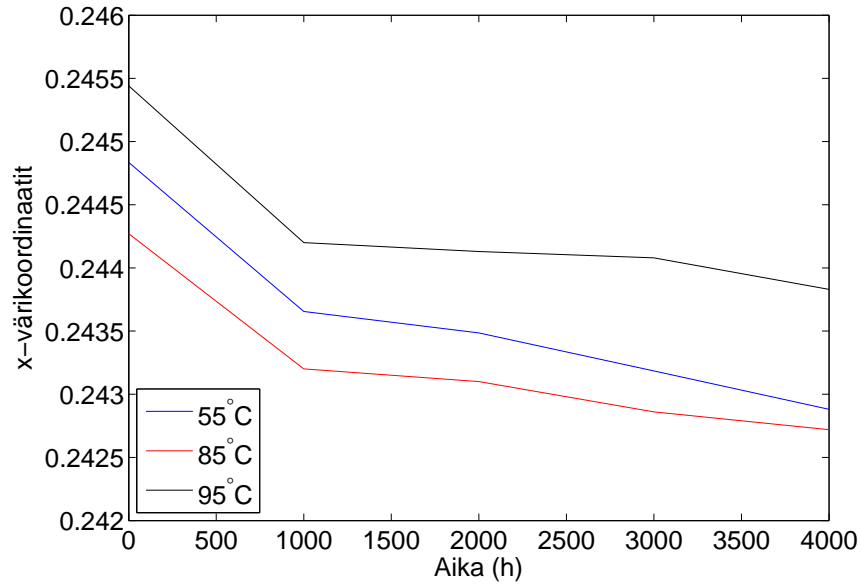
**Kuva 6.10:** Ryhmän A ledien keskiarvoitetut y-värikoordinaattien arvot.



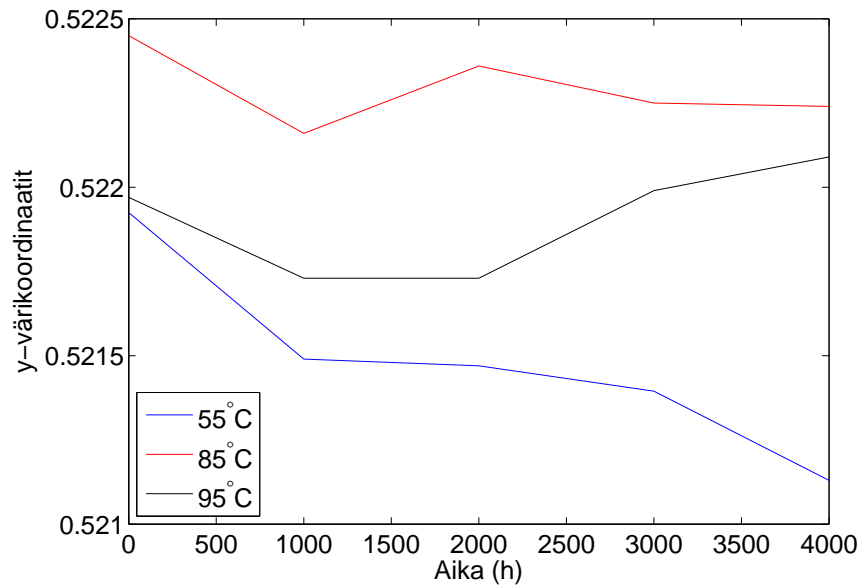
**Kuva 6.11:** Ryhmän B ledien keskiarvoitetut x-värikoordinaattien arvot.



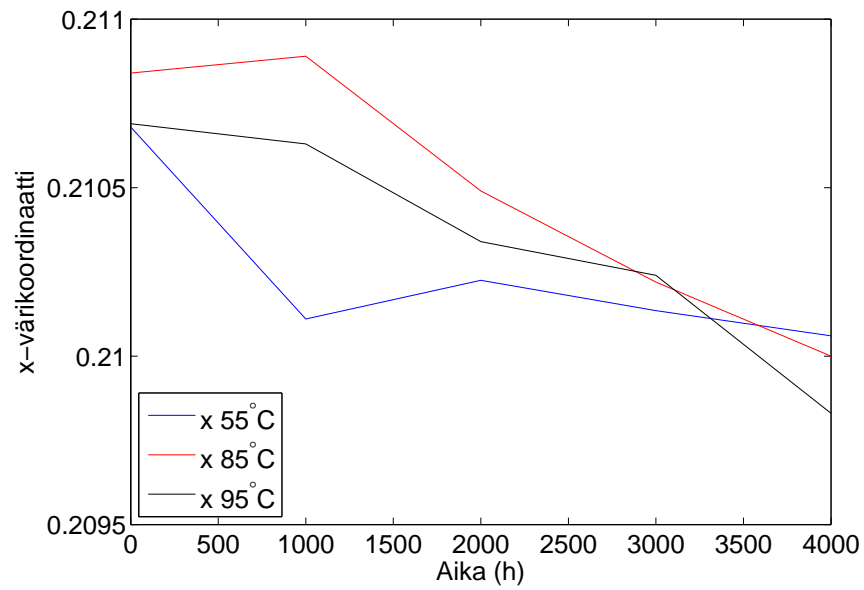
**Kuva 6.12:** Ryhmän B ledien keskiarvoitetut y-värikoordinaattien arvot.



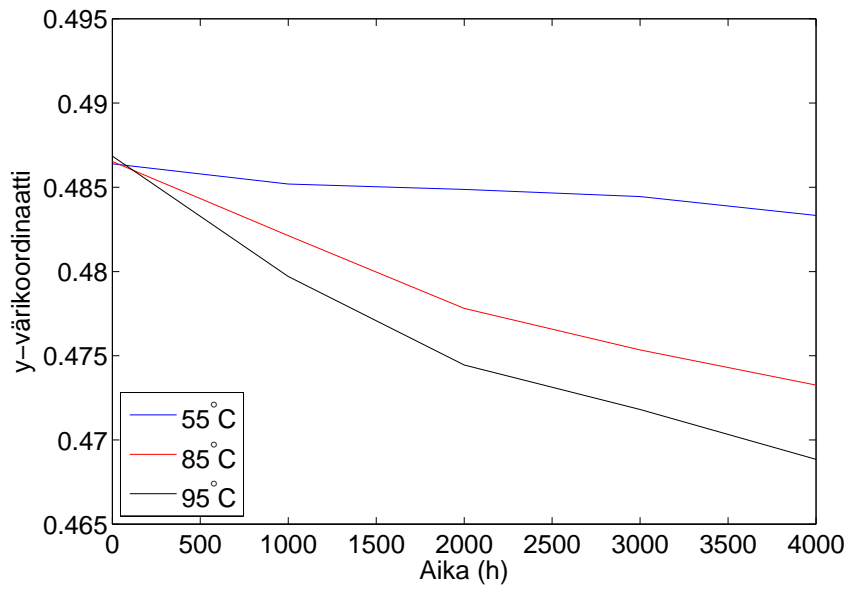
**Kuva 6.13:** Ryhmän C ledien keskiarvoitetut x-värikoordinaattien arvot.



**Kuva 6.14:** Ryhmän C ledien keskiarvoitetut y-värikoordinaattien arvot.



**Kuva 6.15:** Ryhmän D ledien keskiarvoitetut x-värikoordinaattien arvot.



**Kuva 6.16:** Ryhmän D ledien keskiarvoitetut y-värikoordinaattien arvot.



Tässä opinnäytetyössä käsiteltiin ledien pitkäaikaismittausta standardisoitujen mittausmetodien avulla. Tutkitut menetelmät olivat Illuminating Engineering Society (IES) LM-79 ja LM-80 mittastandardit. Opinnäytetyössä tutustutaan näihin standardisoi-  
tuihin mittamenetelmiin ledeille perinpohjaisesti. Standardien avulla voidaan suorittaa uniformeja ja vertailukelpoisia mittauksia eri laboratorioiden välillä. Standardit määrittävät mitta-ajan, mittavälit, mittaolosuhteet sekä käytettävät mittalaitteistot.

Lisäksi tutustuttiin IESin kokoamaan standardiin ledien eliniän ennustamiseksi. TM-21-11 standardi menetelmällä voidaan ennustaa ledien elinikä jopa kuusi kertaa mitta-ajan ajalle käyttämällä hyväksi pienimmän neliö summan avulla laskettua viivasovitusta.

Opinnäytetyössä esitettiin myös mainittujen mittastandardien mukaisesti suoritettuja kiihdytetyn eliniän mittauksia viidelle eri ledimerkille. Ledejä on mitattu 4000 tuntia suunnitellusta 10000 tunnista opinnäytetyön kirjoittamisen kohdalla. Raportissa esitetään kuinka kolmen ledisarjan ledit ovat heikentyneet huomattavasti korkeammassa lämpötiloissa. Sarjojen B ja D ledien valovirta on laskenut alle 70% 85°C ja 95°C lämpötiloissa, minkä katsotaan usein olevan raja ledin eliniälle. Korkeammassa 95°C lämpötilassa ovat valovirran arvot laskeneet jopa 50% alkuperäisestä kyseisille ledeille. Ledisarjojen A ja C valovirta on heikentynyt maltillisemmin samoissa mittaolosuhteissa. Ledien eliniän lisäksi tutkittiin ledien värin-  
toiston säilyvyyttä. Värin-  
toiston havaittiin säilyneen hyvin eliniän mittauksen aikana lukuunottamatta sarjan B ledejä korkeimmassa mittalämpötilassa. Ledien katastrofaaliset hajoamiset olivat yleisiä ledisarjoille B sekä E korkeissa lämpötiloissa. Syinä

hajoamisiin olivat joko elektroninen häiriö tai ledin linssin irtoaminen korkeassa lämpötilassa. Sarjan E ledeistä menetettiin kaikki korkeimmassa lämpötilassa testatut yksiköt mittauksen aikana.

Standardisoidut mittausmenetelmät ledien eliniän selvittämiseksi ovat merkittävä osa luotettavien ja vertailukelpoisten mittatulosten saamiseksi. Ilman yhtenevää standardia eri tutkimusten tulosten vertaileminen on haastavaa. Jos kukin mittaryhmä asettaa standardinsa itse, voivat määreet kuten mittalämpötila, mitta-aika tai mittalaitteiden tarkkuus vaihdella suurestikin eri mittausten välillä. Noudattamalla yleisesti hyväksyttyä mittastandardia voi tutkimusryhmä myös helposti välttää huonojen mittakäytäntöjen esiintymisen. Ledien kaupallinen käyttö tulee vain kasvamaan tulevaisuudessa, joten yhtenevät mittaus ja raportointi käytännöt helpottavat tuotteiden tasapuolista vertailua sekä tutkimusta.

- [1] Kymenlaakson Sähkö-seuran www-sivut, [http://www.sahkoseura.fi/eu\\_direktiivi.pdf](http://www.sahkoseura.fi/eu_direktiivi.pdf) (voimassa 31.7.2012).
- [2] Osramin www-sivut, [http://www.osram.fi/osram\\_fi/News/PDFs/Hehkulampujen\\_kielto\\_kirje\\_10\\_12\\_08.pdf](http://www.osram.fi/osram_fi/News/PDFs/Hehkulampujen_kielto_kirje_10_12_08.pdf) (voimassa 1.8.2012).
- [3] A. A. Bergh and P. J. Dean, "Light-Emitting Diodes," *Proceedings of the IEEE* **60**, 156–223 (1972).
- [4] Osramin www-sivut, [http://www.osram.com/osram\\_com/trends-and-knowledge/led-home/index.jsp?mkturl=led](http://www.osram.com/osram_com/trends-and-knowledge/led-home/index.jsp?mkturl=led) (voimassa 1.8.2012).
- [5] Airamin www-sivut, <http://www.airam.fi/led-lamput.html> (voimassa 1.8.2012).
- [6] P. Schlotter, J. Baur, C. Hielscher, M. Kunzer, H. Obloh, R. Schmidt, and J. Schneider, "Fabrication and characterization of GaN/InGaN/AlGaIn double heterostructure LEDs and their application in luminescence conversion LEDs," *Materials Science and Engineering* **59**, 390–394 (1999).
- [7] "Cree XLamp Long-Term Lumen Maintenance," *Cree Technical Article* (2010).
- [8] L. Trevisanello, M. Meneghini, G. Mura, M. Vanzi, M. Pavesi, G. Meneghesso, and E. Zanoni, "Accelerated Life Test of High Brightness Light Emitting Diodes," *Device and Material Reliability* **8**, 304–311 (2008).
- [9] T. Yanagisawa, "Estimation of the degradation of InGaIn/AlGaIn blue light-emitting diodes," *Microelectronics Reliability* **37**, 1239–1241 (1997).
- [10] T. Shirakawa, "Effect of defects on the degradation of ZnSe-based white LEDs," *Materials Science and Engineering* **91-92**, 470–475 (2002).

- [11] Illuminating Engineering Society, “IES TM-21-11: Projecting Long Term Lumen Maintenance of LED Light Sources,” *Illuminating Engineering Society* (2011).
- [12] Illuminating Engineering Society, “IES LM-80-08: Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources,” *Illuminating Engineering Society* (2008).
- [13] Illuminating Engineering Society, “IES LM-79-08: Electrical and Photometrical Measurements of Solid-State Lighting Products,” *Illuminating Engineering Society* (2008).
- [14] Y. Cengel and M. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach* (McGraw-Hill Education, 2010).
- [15] Ilmatieteenlaitoksen www-sivut, <http://www.ilmatieteenlaitos.fi/lampo-tila-ja-kosteus> (voimassa 31.7.2012).
- [16] WWW-sivu Bureau International des Poids et Mesures, [http://www1.bipm.org/en/si/si\\_brochure/chapter2/2-1/2-1-1/kelvin.html](http://www1.bipm.org/en/si/si_brochure/chapter2/2-1/2-1-1/kelvin.html) (voimassa 28.8.2012).
- [17] Encyclopedia of Mathematics, [http://www.encyclopediaofmath.org/index.php?title=Least\\_squares,\\_method\\_of&oldid=11849](http://www.encyclopediaofmath.org/index.php?title=Least_squares,_method_of&oldid=11849) (voimassa 7.8.2012).
- [18] E. Hecht, *Optics* (Addison Wesley, 2002).
- [19] Z. Liu, M. Helander, Z. Wang, and Z. Lu, “Efficient single layer RGB phosphorescent organic light-emitting diodes,” *Organic Electronics* **10**, 1146–1151 (2009).
- [20] M. Krames, O. Shchekin, R. Mueller-Mach, G. Mueller, L. Zhou, G. Harbers, and M. Craford, “Status and Future of High-Power Light-Emitting Diodes for Solid-State Lighting,” *Journal of Display Technology* **3**, 160–175 (2007).
- [21] F. Pedrotti and L. Pedrotti, *Introduction to Optics* (Pearson Addison Wesley, 2007).
- [22] M. Mahy, L. V. Eycken, and A. Oosterlinck, “Evaluation of uniform color spaces developed after the adoption of CIELAB and CIELUV,” *Color Research and Application* **19**, 105–121 (1994).
- [23] Lamputieto WWW-sivut, <http://www.lamputieto.fi/faktaa-energiansaastolampuista/varisavyt/> (voimassa 14.8.2012).
- [24] R. Berns, *Billmeyer and Saltzman’s Principles of Color Technology* (John Wiley Sons, Inc., 2000).