



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

MacAdam SDCM -arvon selvittäminen Winledin valaisimille.

Niko Kyösti

Opinnäytetyö
Maaliskuu 2016
Talotekniikan koulutusohjelma
Sähköisen talotekniikan suuntautuminen



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Talotekniikan koulutusohjelma
Sähköisen talotekniikan suuntautuminen

KYÖSTI, NIKO:

MacAdam SDCM -arvon selvittäminen Winledin valaisimille.

Opinnäytetyö 46 sivua, joista liitteitä 1 sivua
Maaliskuu 2016

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, kuinka LED-valaisimille voidaan määrittää MacAdam SDCM -arvo sekä toimia oppaana arvon selvittämiseksi. Opinnäytetyö tehtiin Winled Oy:n toimeksiannosta, koska yrityksellä oli tarve selvittää omien valaisintuotteiden MacAdam SDCM -arvo. Työssä perehdyttiin valonlähteiden värielämytilan ominaisuuksiin ja siihen vaikuttaviin olennaisimpiin seikkoihin. Tässä opinnäytetyössä mitattiin ja laskettiin tarvittavat arvot yhdelle Winled Oy:n valaisimelle.

MacAdam SDCM -arvo kertoo valonlähteen värielämytilan tasalaatuisuuden. Etenkin LED-valonlähteillä värielämytilan värierot voivat vaihdella hyvinkin merkittävästi LEDien valmistusmenetelmien vuoksi. Vaativissa kohteissa ja arkkitehtuurivalaistuksessa voi olla tärkeää, että valaisimet ovat ominaisuuksiltaan samanlaisia. Värielämytila, joka valaisimelle ilmoitetaan, on suurin piirteinen värielämytila. Värielämytila saa vaihdella ANSI C78.377 -standardissa määriteltujen rajojen sisällä. Vaihtelu, joka ANSI C78.377 -standardissa sallitaan, on noin MacAdam 7 SDCM -arvon mukainen. Arvon pitäisi olla alle MacAdam 3 SDCM, jotta väriero ei huomaa. Tästä syystä valaisinvalmistajat ilmoittavat valaisimilleen MacAdam SDCM -arvon.

MacAdam SDCM -arvon määrittämistä varten valaisimesta pitää mitata valaisimen suhteellinen spektritehojakauma. Mittausdatasta saadaan laskemalla selvitettyä tarvittavat arvot, jotka sijoitetaan CIE-väridiagrammiin. Väridiagrammiin piirretään MacAdamin elliptisiä valaisimen absoluuttisen värielämytilapisteen ympärille, kunnes mitatut pisteet ovat ellipsin sisällä. Tämä kertoo valaisimen MacAdam SDCM -arvon.

Tässä työssä mitattiin 11 Winled Oy Spectri 8W 4000 K -valaisinta. Mittausten jälkeen tulokset käsiteltiin, ja lopputulokseksi saatiin Spectri-valaisimelle alle MacAdam 5 SDCM. Valaisimen MacAdam SDCM -arvo on sisävalaisimille riittävän alhainen, joskin valaisimissa voidaan vielä huomata värielämytilan eroja.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Building Services Engineering
Electrical Building Services

Niko Kyösti
Defining MacAdams SDCM value for Winled Oy Ltd luminaires

Bachelor's thesis 46 pages, appendices 1 pages
March 2016

The objective of this thesis was to study how MacAdam SDCM value is defined for LED luminaires. The work was commissioned by Winled Oy Ltd. They wanted to define MacAdam SDCM values for their luminaire products. For the determination of MacAdam SDCM value it is important to understand some basics about LEDs, color temperature, color forming and human visual system. These subjects were dealt with sufficient extent so it is possible to use this thesis as a guide for the determination of MacAdam SDCM.

MacAdam SDCM value defines how uniform the color temperature of a luminaire is. Especially with solid-state light products as LEDs are, color temperature uniformity is somewhat a problem. Due to manufacturing techniques there are significant quality issues in different batch of LED-chips. In demanding environments and architecture lighting it might be of great importance to have uniform and high-quality lighting. For this reason luminaire manufacturers inform the MacAdam SDCM value.

Color temperature scale is defined in ANSI C78.377-norm. There is certain amount of fluctuation that is allowed in luminaires color temperature and for this reason it is possible to have color temperature aberration. In MacAdam SDCM scale MacAdam 7 SDCM fluctuation is allowed when good value would be between 3 - 5. Under MacAdam 3 SDCM it is not possible for human to sense color temperature difference in light source at all.

For defining the MacAdam SDCM value, the measurements of luminaire relative spectral power is needed. Measured values are then transformed mathematically to fit in the CIE chromaticity diagram. Calculated xy-chromaticity values are then placed on the chromaticity diagram. Last, the MacAdam ellipses are plotted around absolute color temperature point. Number of the ellipses needed to fit all the xy-values inside of ellipse are defining result in MacAdam SDCM.

For this thesis eleven luminaires were measured. Luminaires were Winled Ltd. Spectri 8w 4000 K luminaires. After all luminaires were measured and the data was calculated it was found that this luminaire is under MacAdam 5 SDCM. This is fine value for indoor luminaires but for the most of humans it is still possible to see color temperature aberrations.

Key words: LED, MacAdam, SDCM, color, chromacity, Correlated Colour Temperature, CCT

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	VALO JA VALON VÄRI, VÄRILÄMPÖTILA JA NÄKEMINEN	8
2.1	Näkyvä valo ja näkyvän valon spektri	8
2.2	Näköaistimus	10
2.3	Valon väri ja värin muodostus	11
2.4	CIE	13
2.4.1	RGB-värinsovitusfunktio ja CIE XYZ-värinsovitusfunktio	14
2.4.2	CIE-väridiagrammi	16
2.5	Värilämpötila	18
2.5.1	Musta kappale	18
2.5.2	Värilämpötilan määritelmä valonlähteille.....	19
2.6	MacAdams SDCM.....	21
3	LED ja LEDin valmistus	24
3.1	LEDin historiaa	24
3.2	LEDin valmistus	24
4	VALAISIMIEN SPEKTRIN MITTAAMINEN	27
4.1	Mittausmenetelmät.....	27
4.1.1	Mittalaitteet	28
4.1.2	Mitattava valaisin	29
4.1.3	Apuvälineet	30
4.2	Mittausten suorittaminen	30
5	MACADAM SDCM -ARVON MÄÄRITYS MITTAUSTULOKSISTA	32
5.1	Mitattujen valaisimien mittaustulokset	32
5.2	Mittaustulosten käsittely ja laskutoimitukset.....	36
6	YHTEENVETO	41
	LÄHTEET.....	44
	LIITTEET	46
	Liite 1. Winled Oy Spectri 8w valaisintietoarkki	

ERITYISSANASTO

CCT	Correlated Color Temperature, ekvivalentti värilämpötila
LED	Light Emitting Diode, hohtodiodi
SDCM	Standard Deviation Color Matching, värinsovituksen keskihajonta
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage, kansainvälinen valaistuskomissio.
ANSI	American National Standard Institute
RGB	Red, Green, Blue, kuvaa värinmuodostuksen trikromaattisuutta
Kelvin	lämpötila/värilämpötila, K
Black body	musta kappale, Planckin musta säteilijä
Tristimulus	kolmoisstimulus-arvot, XYZ
Spectral locus	spektriura
Spektritehojakauma	spektrin intensiteetti aallonpituuden funktiona
Purppurasuora	Väridiagrammissa viiva, joka yhdistää aallonpituuden ääriarvot
Kromaattisuus	värilaatu, joka on riippumaton luminanssista
Lumen	valovoima, lm
nm	nanometri

1 JOHDANTO

Moni luulee, että valaisimen värilämpötila kertoo tarkasti valonlähteen värin, mutta etenkin LED-valonlähteiden kohdalla tämä ei pidä paikkaansa. Valonlähteille, joiden värilämpötila ei ole valonlähteen todellinen lämpötila, määritellään ekvivalentti värilämpötila ANSI C78.377 standardin mukaisesti CCT (Correlated Colour Temperature) -arvona. CCT antaa värilämpötilalle mahdollisuuden olla tietyn toleranssin sisällä, joka on niin suuri, että eron huomaa helposti eri valonlähteiden välillä. LED-valonlähteiden värierot johtuvat niiden valmistusmenetelmistä ja fyysisistä ominaisuuksista.

Valaisimien värilämpötilan yhteneväisyys on monissa paikoissa tärkeä ominaisuus. Arkkitehtuuriset kohteet, museot ja julkiset tilat, joissa valaisimia on paljon, värilämpötilan erot huomaa helposti ja kohteen visuaalinen arvo laskee. Sinänsä tavallinen kuluttaja ei välttämättä ole tällaisesta asiasta niin kiinnostunut, mutta jatkuvasti myös kuluttajien ymmärrys, ja sitä kautta vaatimukset ja laadun arvostus valaistuksen saralla kasvaa. [2]

LED-valonlähteiden tullessa markkinoille värilämpötilan tasaisuuden määrittämiseen täytyi kehittää jokin keino, jolla eri valaisimien värilämpötilan yhteneväisyyttä voidaan verrata. Tämä johtuu siitä että, LED-valonlähteiden värilämpötilan tasaisuudessa on suuria eroja. Valaisinvalmistajat ratkaisivat ongelman ottamalla käyttöön MacAdams SDCM -arvon, joka kertoo valmistajasta tai valmistuserästä huolimatta valonlähteen värilämpötilan tasalaatuisuuden. Valonlähteestä täytyy mitata spektritehojakauma, jotta sille voidaan laskennallisesti määrittää MacAdams SDCM -arvo. Spektritehojakautaman avulla valonlähteelle lasketaan XYZ-tristimulus-arvot, josta nämä edelleen muunnetaan CIE xy-koordinaattijärjestelmään. Muunnoksen jälkeen xy-arvot sijoitetaan CIE-väridiagrammiin, josta nähdään valonlähteen lopullinen MacAdam SDCM -arvo. [1] Sisävalaistuksessa hyvänä arvona voidaan pitää MacAdam 3 - 5 SDCM -arvoa ja ulkotiloissa MacAdam 7 SDCM -arvoa. MacAdam SDCM -arvon asteikko on välillä 1 - 10.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on edistää tietoutta LED-valaisimien värilämpötilan laadusta ja toimia oppaana MacAdams SDCM -arvon määrittämiselle. Tavoitteena on myös tuottaa Winled Oy:n valaisimille MacAdams SDCM -arvot, joita voidaan käyttää valaisimien markkinoinnissa. Työssä käsitellään tarvittavat teoreettiset käsitteet ja fysikaaliset ilmiöt, jotta ymmärretään kuinka MacAdams SDCM -arvo muodostuu. Teorian lisäksi tässä työssä kerrotaan oppaan omaisesti, kuinka tarvittavat mittaukset tehdään ja saadut

tulokset käsitellään lopputuloksen saamiseksi. Esimerkkivalaisimena MacAdam-arvon määrittämiselle tässä opinnäytetyössä käytetään Winled Oy Ltd:n Spectri 8W 4000 K - valaisinta.

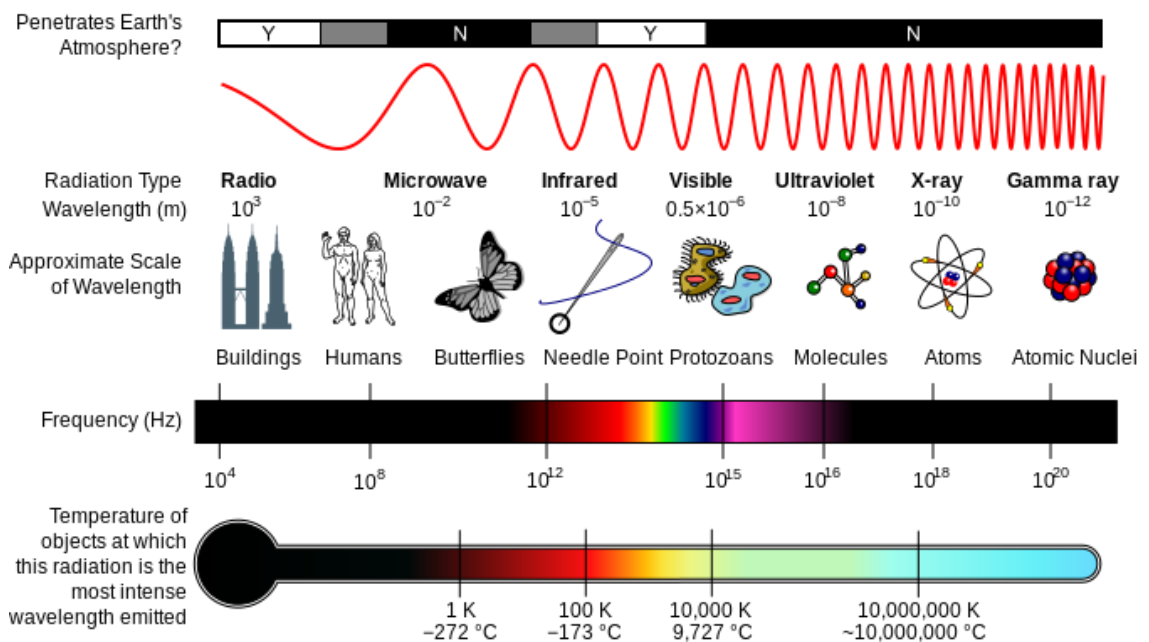
2 VALO JA VALON VÄRI, VÄRILÄMPÖTILA JA NÄKEMINEN

Tässä luvussa selvitetään keskeisimmät käsitteet ja fysikaaliset ilmiöt, jotka ovat olennaisia MacAdams SDCM -arvon ymmärtämisen ja määrittämisen kannalta. Tässä luvussa kerrotaan valosta, valon värin muodostuksesta, värilämpötilasta sekä LEDien valmistusmenetelmistä. Lisäksi avataan keskeisiä termejä ja käydään läpi valonlähteiden värien käsittelyssä tarvittavia laskenta ja analysointityökaluja.

2.1 Näkyvä valo ja näkyvän valon spektri

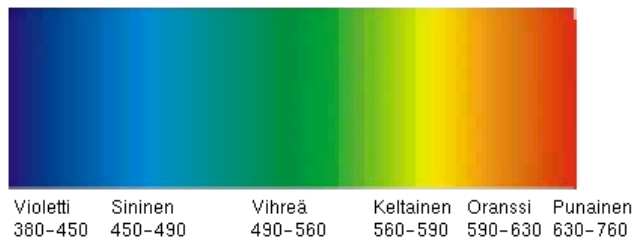
Valo on sähkömagneettista säteilyä aallonpituusalueella, jonka ihmisen silmä havaitsee. Näkyvä valo sijaitsee sähkömagneettisella spektrillä infrapuna-alueen ja ultraviolettialueen välissä. Kuvassa 1 on esitetty sähkömagneettinen spektri ja sen ominaisuuksia. Maapallolla pääasiallinen valonlähde on aurinko. Ihminen kuitenkin tarvitsee valoa myös ilta- ja yöaikaan, joten tätä varten on kehitetty keinotekoisia valonlähteitä.

Valon keskeisimmät ominaisuudet ovat: intensiteetti, valon etenemisen suunta, spektrin taajuus/aallonpituus ja polarisaatio. Valon nopeutta ei myöskään tule unohtaa, jonka nopeus tyhjiössä on 299 792,458 metriä sekunnissa. Valonnopeus on yksi keskeisimmistä luonnonvakioista. [11]



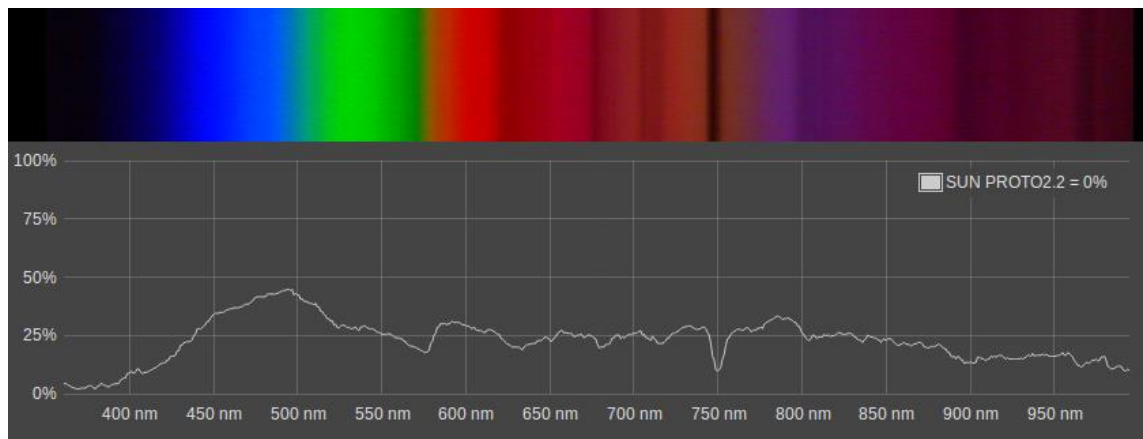
Kuva 1. Sähkömagneettinen säteily. [11]

Näkyvän valon spektri on osa sähkömagneettista spektriä, jonka ihmissilmä voi havaita. Tätä sähkömagneettista säteilyä aallonpituusalueella 380 - 780nm voidaan kutsua myös valoksi. Yksittäisen aallonpituuden väriä kutsutaan puhtaaksi spektriväriksi, joka on siis yksittäinen väri, joka säteilee tietyllä aallonpituudella. Näkyvän valon aallonpituusalueella ei kuitenkaan ole kaikki mahdolliset värit, joita ihminen voi havaita. Esimerkiksi pinkki on sekoitus eri aallonpituuksien värejä. Valkoinen päivänvalo on puolestaan sekoitus kaikkia spektrivärejä. [1] Luonnossa näkyvän valon spektrijakauman voi havaita esimerkiksi sateenkaudessa. Valkoinen valo hajoaa vesipisaran toimiessa ”prisman”, jolloin näkyvä valo hajoaa niiksi väreiksi, joista se koostuu. [23] Kuvassa 2 on spektrivärit eri aallonpituuksilla näkyvän valon aallonpituusalueella esitettynä.



Kuva 2. Spektrivärit ja niiden eri aallonpituusalueet. [7]

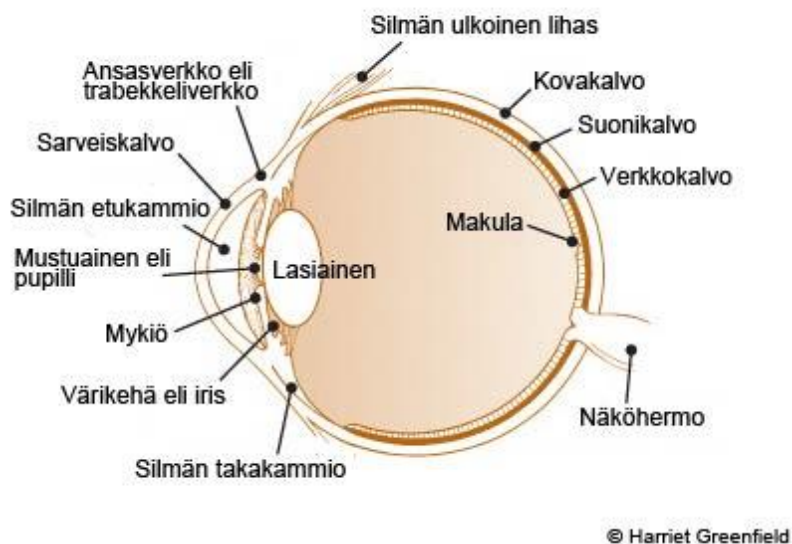
Erilaiset valonlähteet tuottavat erilaisen tehojakauman koko sähkömagneettisen spektrijakauman alueelle. Tämä spektrinen tehojakauma esitetään usein kahdella eri tavalla; yksiulotteisena kromaattisena esityksenä tai kaksiulotteisena kaaviona. Yksiulotteisessa esitystavassa eri aallonpituuksien suhteellinen teho on esitetty värillisinä viivoina, joiden kirkkaus kertoo aallonpituuden tehon voimakkuuden. Kaksiulotteinen kaavio on histogrammi, jossa spektrinen tehojakauma on esitetty aallonpituuden funktiona. Usein spektrijakauman esitykseen lisätään värit, jotta olisi helpompi hahmottaa yksittäisen pisteen sijainti spektrijakaumassa. Kuvassa 3 on esitetty auringonvalon spektrinen tehojakauma yksiulotteisena kromaattisena esityksenä sekä kaksiulotteisena kaaviona. Kaksiulotteinen esitystapa kertoo kullakin aallonpituudella säteilyenergian määrän pystyakselilla toisin kuin yksiulotteisessa, jossa kirkkaus kertoo tehon voimakkuuden. Vaikka spektrijakauma on kätevä tapa tarkastella valonlähteen spektritehon jakautumista, ei siitä kuitenkaan voi päätellä valonlähteen todellista kromaattista- eli värivaikutelmaa. [1]



Kuva 3. Auringonvalon spektrinen tehojakauma kromaattisena esityksenä (yllä) sekä histogrammina (alla). [22]

2.2 Näköaistimus

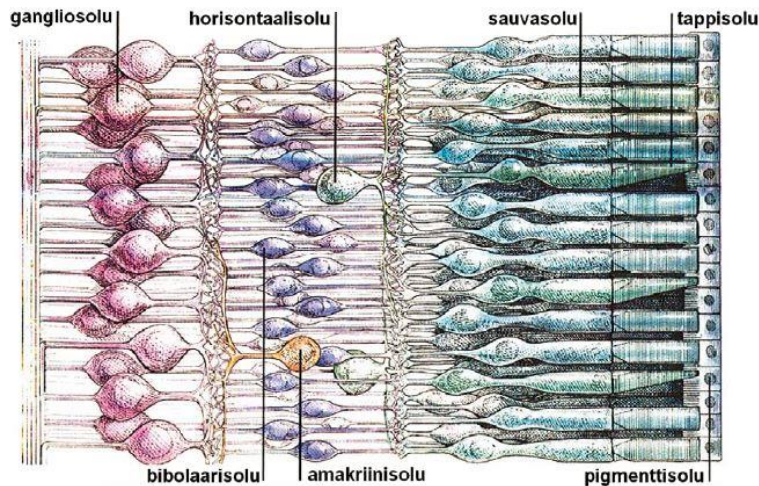
Silmä yhdessä näköhermojen ja aivojen kanssa muodostavat näköelimen. Näkökenttään osuvat valonsäteet taivutuvat silmän optisten osien kautta silmän takaosassa sijaitsevaan verkkokalvoon. Valo, värit ja värierot muuttuvat verkkokalvolla hermoviesteiksi, jotka siirtyvät näköhermoja pitkin aivojen näkökeskukseen, jossa näköaistimus muodostuu. [3]



Kuva 4. Ihmisen silmän eri osat. [17]

Ihmisen silmä koostuu monista eri osista, jotka nähdään kuvassa 4. Verkkokalvo on osa, jossa sijaitsevat näkemisen ja värinäön kannalta oleelliset solut. Verkkokalvon solurakenne on kolmikerroksinen. Pohjimmaisessa kerroksessa sijaitsevat näkemisen fotoreseptorit, joita ovat sauva- ja tappisolut. Nämä solut ottavat vastaan muiden solukerrosten

läpi tulevan valoinformaation ja muuttavat sen hermoviesteiksi. Keskikerroksessa on horisontaali-, amakriini- ja bipolaarisolut. Näiden tehtävä on käsitellä sauva- ja tappisoluilt saapuvaa informaatiota ja siirtää informaatio pintakerroksen gangliosoluille. Verkkokalvon pinnalla sijaitsevat gangliosolut ja niiden hermosäikeet muodostavat silmän näköhermon ja hermoradan. Hermorataa pitkin valoinformaatio, joka saapuu sauva- ja tappisoluilt, siirretään aivojen näkökeskukseen. [16] Kuvassa 5 on esitetty periaatekuva verkkokalvon solurakenteesta.



Kuva 5. Verkkokalvon solurakenne. [16]

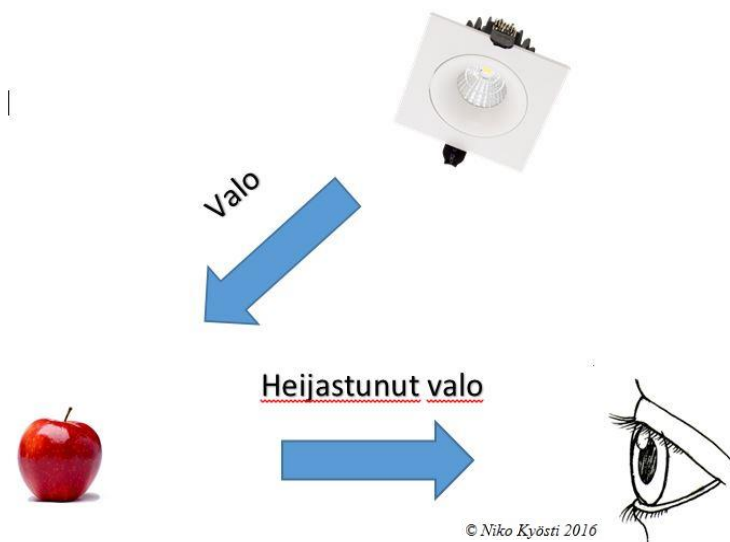
Verkkokalvon pohjimmaisella kerroksella on neljää erilaista näkemisen fotoreseptoria. Nämä neljä erilaista solutyyppiä havaitsevat valon ja synnyttävät näkö- ja väriaistimuksen. Yksi solutyyppi on sauvasolu, joka on tarkoitettu havaitsemaan hämärässä. Kolme muuta solua ovat tappisoluja, joiden tehtävä on havaita tarkasti. Nämä kolme solutyyppiä ovat L-tyyppi, M-tyyppi ja S-tyyppi. L-tyypin solut havaitsevat pitkäaaltoisen punaisen värit, M-tyypin solut havaitsevat keskipitkäaaltoisen vihreän värit ja S-tyyppi havaitsee lyhytaaltoisen sinisen värit. Nämä kolme erilaista väriä havaitsevaa solutyyppiä toimivat yhdessä luoden ihmiselle värinäön. Ihmisen värinäköä voidaan verrata laitteiden, kuten television tai muiden näyttöjen värikuvan muodostukseen, joissa värit muodostetaan kolmen värityypin mukaisesti ns. RGB-värit (Red, Green, Blue). Tätä ominaisuutta kutsutaan trikromaattisuudeksi. [1]

2.3 Valon väri ja värin muodostus

Väri ei ole luontainen optisen säteilyn tai esineiden ominaisuus vaan se on havainnollinen ilmiö, joka on osa ihmisen visuaalista kokemusta. Todellisuudessa optinen säteily tai

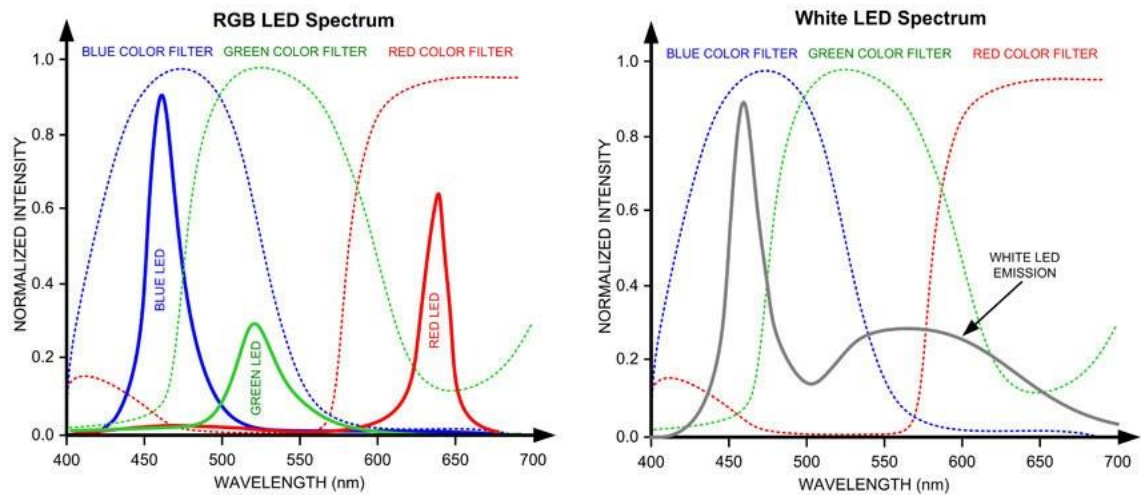
esine ei ole väriltään sellainen, joksi se koetaan. Säteilyenergian muutos ihmisen värinäön havainnoksi on todella monimutkainen prosessi, jota ei vielä edes ymmärretä täysin. Siitä mitä jo tiedetään, on johdettu monenlaisia työkaluja suunnittelijoiden ja muiden alan ammattilaisten avuksi. Näitä ovat esimerkiksi mittarit valonlähteen värin määrittämiseksi, värieron mittarit, valaistujen objektien renderöintityökalut sekä mittatietoja, joilla voidaan arvioida kuinka ihmisen visuaalinen järjestelmä havaitsee värin jopa haastavissa ympäristöissä. [1]

Väri, jonka ihminen havaitsee, on yhteenliittymä optisesta spektristä, jonka valonlähde muodostaa ja jota erilaiset objektit muokkaavat. Lopuksi kaikki tämä prosessoidaan ihmisen visuaalisissa järjestelmissä, eli silmän hermoissa ja aivoissa. Objekteja voi olla joko suoraan valonlähde tai jokin pinta, josta väri heijastuu, välittyy, hajoaa tai säteilee. Yksinkertaisesti sanottuna väri on siis aaltomuotoista sähkömagneettista säteilyä. Eri värit säteilevät eri aallonpituuksilla esimerkiksi punainen väri säteilee 625 - 740 nanometrin aallonpituusalueella ja sininen 450 - 490 nanometrin alueella. [1]. Kuvassa 6 on esitetty periaatekuva siitä miten valo- ja värihavainto muodostuu.



Kuva 6. Periaatekuva heijastuneesta valosta, jota ”esine on muokannut”.

Valo on edellytys sille, että on mahdollista nähdä. Valo yhdessä erilaisten materiaalien ja pintojen kanssa luo näköympäristömme. Huono valaistus siis vaikeuttaa näkemistä. Tämä seikka on hyvä ymmärtää, kun suunnitellaan valaistusta. [3]



Kuva 7. RGB LED-yksiköillä luotu valkoinen valo ja valkoisen LED-valonlähteen spektri. [24]

Valonlähteiden värit muodostetaan asettamalla valonlähteen spektri säteilemään halutuilla aallonpituuksilla. Värien säteilystä muodostuu optinen spektri, jonka silmä havaitsee. Esimerkiksi LED-valonlähteistä voidaan tehdä käytännössä minkä värisiä tahansa. Erilaisia materiaaleja käyttämällä tai tietynlaisilla aineilla käsittelemällä voidaan LEDin väriä muuttaa halutun laiseksi. Muun muassa valkoinen valo muodostetaan asettamalla sinisen LED-yksikön päälle tietynlaista fosforia. Tällä tavalla LED saadaan säteilemään sellaisella spektrillä, joka ihmisen silmässä vaikuttaa valkoiselta valolta. Toinen vaihtoehto on käyttää kolmea erillistä RGB LED-yksikköä, joilla eri värit voidaan muodostaa yhdistelemällä punaisia-, vihreitä- ja sinisiä valonlähteitä. [1] Kuvassa 7 on esitetty valkoisen LED-valonlähteen spektri ja RGB LED-yksiköillä muodostettu valkoinen valo. LED-valaisimen värinmuodostuksesta kerrotaan lisää luvussa kolme.

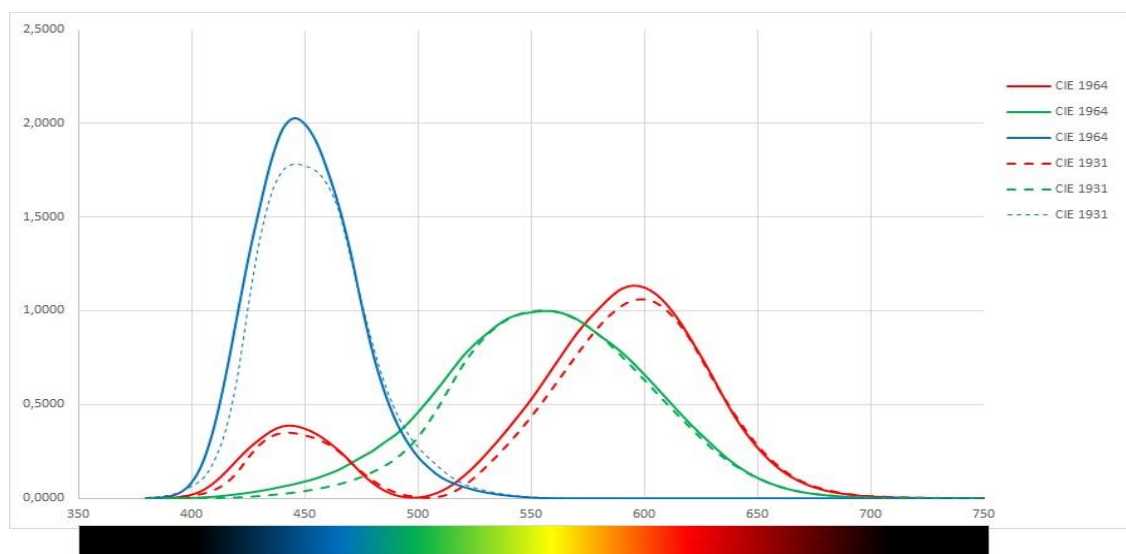
2.4 CIE

CIE eli Commission Internationale de l'Eclairage on vuonna 1913 perustettu kansainvälinen valaistuskomissio, joka on voittoa tavoittelematon tieteellinen ja tekninen organisaatio, jonka tarkoitus on tutkia ja kehittää valoon, valon väriin ja valaistukseen liittyviä standardeja sekä tehdä tieteellisiä julkaisuja. Tunnetuimpia standardeja ovat väriavaruusmallit ja värieromittarit. [4]

2.4.1 RGB-värinsovitusfunktio ja CIE XYZ-värinsovitusfunktio

Monimutkaiset näköärsykkeet voidaan redusoida kolmeen visuaaliseen signaaliin: punaiseen (R), vihreään (G) ja siniseen (B). Tätä kutsutaan trikromaattisuudeksi. Sen sijaan, että kolmea eri visuaalista signaalia käsiteltäisiin samanaikaisesti, ovat nämä signaalit kvantifoitu värinsovitusfunktioiksi Color Matching Function, (CMF). Värinsovitusfunktio tarkoittaa tristimulus-arvoja, jotka vastaavat mitattua spektrijakaumaa aallonpituuden funktiona. Värinsovitusfunktion tarkoitus on vastata ihmisen silmän värinäköherkkyyttä.

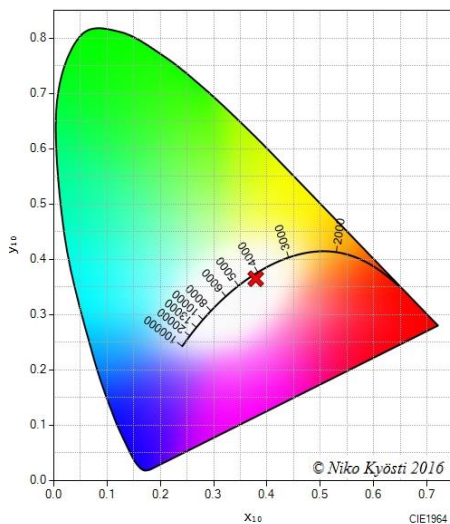
CIE XYZ-värinsovitusfunktio on vuonna 1931 CIE:n kehittämä matemaattinen väriavaruusmalli. Tämä väriavaruusmalli on yksi käytetyimmistä malleista, jonka pohjalte monet muut väriavaruusmallit pohjautuvat. RGB-värinsovitusfunktiossa on yksi käytännön ongelma, värinsovitusfunktioilla voi olla positiivisia ja negatiivisia arvoja. Tämä hankaloittaa etenkin mittauksia ja tulosten laskentaa. Mittalaitteiden pitäisi kyetä toistamaan negatiivisia optisen säteilyn arvoja tietyillä aallonpituuksilla. Tämä ongelma ratkaistiin CIE XYZ-värinsovitusfunktioilla. Funktiot perustuvat ei-fysikaalisiin perusväriin, joiden tunnuksset ovat XYZ. Nämä perusvärit on johdettu fysikaalisista perusväreistä RGB (Red, Green, Blue) lineaarisella muunnoksella. Nämä eivät kuitenkaan suoraan vastaa RGB-arvoja. XYZ-väriavaruus kattaa kaikki värihavainnot, joita keskimääräisesti ihminen pystyy havaitsemaan. CIE:n tutkimusten perusteella on määritetty värinsovitusfunktiot, joiden avulla spektri voidaan muuttaa suoraan XYZ-väriavaruusmallin mukaiseksi. [1] Kuviossa 1 on esitetty graafisesti värinsovitusfunktiot.



Kuvio 1. CIE 1964 10 asteen värinsovitusfunktio ja CIE 1931 2 asteen värinsovitusfunktio. [1]

2.4.2 CIE-väridiagrammi

Väridiagrammi on kaksiulotteinen esitysmuoto kolmiulotteisesta XYZ-väriavaruudesta. Kaksiulotteiset väridiagrammit eivät ota huomioon valonlähteen luminanssia eli kirkkautta vaan antaa ainoastaan tarkan arvon värille. Väridiagrammeja on useita erilaisia. Vanhin vieläkin käytössä oleva on CIE 1931 ja sitä ovat seuranneet CIE 1960, 1964 ja 1976. Luku kertoo vuoden, jolloin väridiagrammi on otettu käyttöön. Käytännössä jokainen väridiagrammi on käyttökelpoinen värien määrittämiseen, mutta uudempien väridiagrammien värien yhteneväisyyttä on parannettu vuosi vuodelta. LED-valonlähteiden värien määrittämiseen soveltuu kaikista parhaiten CIE 1964 väridiagrammi (Kuvio 2). [2]



Kuvio 2. CIE 1964 väridiagrammi, jossa piirrettynä mustan kappaleen säteilykäyrä.

Värikoordinaatit x , y ja z ovat XYZ-tristimulus arvoista lasketut koordinaattipisteet. Värikoordinaatit lasketaan seuraavilla kaavoilla:

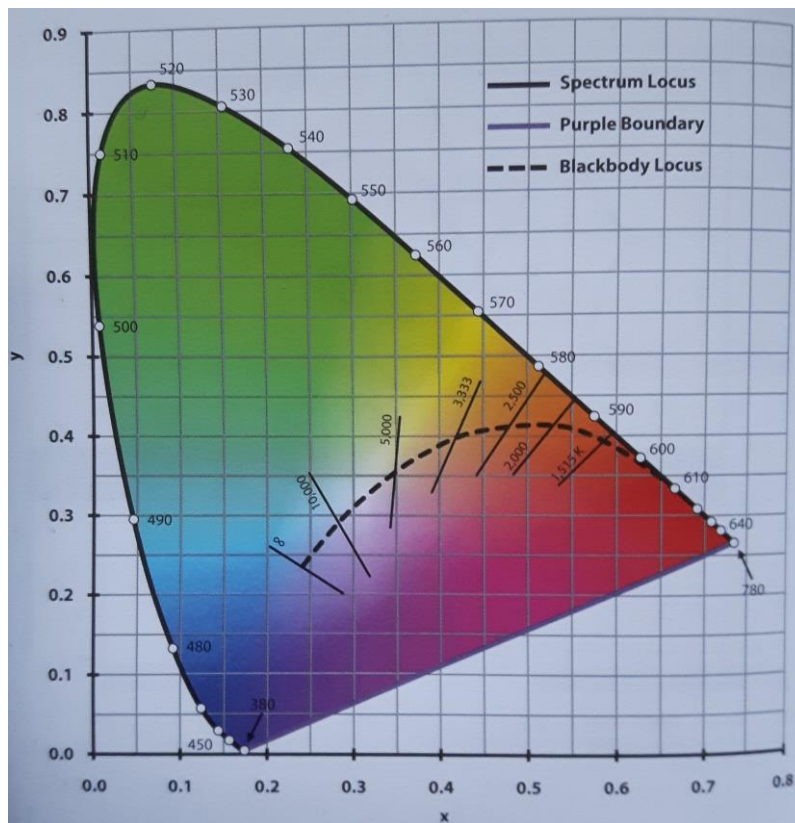
$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (1)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (2)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (3)$$

Värikoordinaatit x , y ja z ovat yksiköttömiä lukuja, joidenka arvot ovat välillä 0 - 1.0. XYZ-tristimulus arvot ovat myös yksiköttömiä ja niiden arvot ovat välillä 0 - ∞ . Huomionarvoista on se että $x + y + z = 1$, joten kaksi ensimmäistä määrittävät kolmannen arvon, joten kromaattisuuden määrittää x ja y .

Väridiagrammia luullaan usein kaksiulotteiseksi väridiagrammiksi, mitä se ei todellisuudessa ole. Värit on lisätty diagrammiin vain tulkinnan helpottamiseksi visuaalisesti. Koska värikoordinaatit ovat normalisoituja tristimulus-arvoja, ei valonlähteen säteilytehokkuus vaikuta värikoordinaatteihin vaikka värissä havaitaan muutos. Väridiagrammi ei kerro värin kirkkautta/valoisuutta, se kertoo ainoastaan värisävyn ja kylläisyyden. [1]



Kuva 8. CIE 1931 väridiagrammi, jossa on esitetty purppurasuora, spektriura sekä mustan kappaleen säteilykäyrä. [1]

Hevosenkengän muotoista käyrää väridiagrammissa kutsutaan spektriuraksi (Spectral Locus) ja se käsittää monokromaattisen optisen säteilyn värikoordinaatit aallonpituusalueella 360nm - 830nm. Viiva, joka yhdistää aallonpituuden ääriarvot on ns. purppurasuora. Se sisältää kaikista kyllästyneimmät violetin värin sävyt, jotka on mahdollista saavuttaa. Kuvassa 8 on esitetty CIE 1931 -väridiagrammi, johon on merkitty spektriura ja purppurasuora. Purppurasuora syntyy siitä syystä, että se yhdistää aallonpituuksien ääripäät,

jotka ovat syvän sinisen ja punaisen värisiä. Näiden yhdistelmästä syntyy violetin sävyt viivalle, koska vihreää väriä ei ole tällä viivalla lainkaan. Spektriuran ja purppurasuoran sisältä löytyvät kaikki värit, joita väridiagrammi voi sisältää. Kylläiset värit ovat lähempänä ulkoreunoja ja mitä lähemmäs keskustaa siirrytään, sitä ei-kylläisempiä värit ovat. Kapean spektrijakauman omaavan valonlähteen sijainti väridiagrammissa on lähellä spektriuraa. Valonlähde, jolla on laaja-alainen spektrijakauma, sijaitsee väridiagrammin keskivaiheilla, kuten esimerkiksi valkoinen LED. [1]

2.5 Värilämpötila

Värilämpötila on valkoisen valon mitattava arvo, jonka yksikkö on kelvin [K]. Värilämpötila kertoo valkoisen valon värivaikutelman ihmisen silmässä. Mitä pienempi luku on, sitä lämpimämmäksi valo koetaan ja mitä suurempi luku on, sitä kylmänsävyisemmäksi valo koetaan. [3]. Värilämpötila on Planckin mustan kappaleen säteilemän valon väri kyseisessä lämpötilassa kelvinasteikolla. Mustasta kappaleesta lisää alaluvussa 2.5.1. Kuvassa 9 on esitetty eri värilämpötilan arvot kelvineinä ja niitä vastaavat värit.

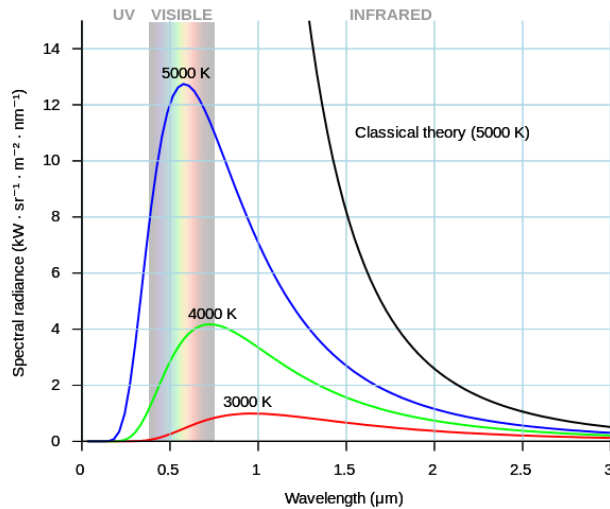


Kuva 9. Värilämpötilat ja sitä vastaavat värit. [18]

2.5.1 Musta kappale

Blackbody eli musta kappale on esine tai materiaali, joka absorboi kaiken elektromagneettisen säteilyn, joka ei ole siirtynyt tai heijastunut. Tällaisen ideaalisen kappaleen lämpötilan ollessa nolla Celsius astetta, näyttää kappale täysin mustalta. Vuonna 1860 Gustav Kirchhoff näytti toteen, että tällaisesta materiaalista tehdyn sylinterin muotoisen kappaleen sisällä, säteilyllä olisi sellainen spektri, joka riippuu täysin kappaleen todellisesta lämpötilasta. Tällaista kappaletta kutsutaan ns. mustaksi säteilijäksi, ja sen muodostamaa spektrin tehojakaumaa kutsutaan mustaksi säteilyksi (Blackbody radiation). Kuvassa 10 on esitetty mustan kappaleen spektri näkyvän valon alueella eri värilämpötiloissa. [1] Mustan kappaleen lämpötilat ovat absoluuttisia lämpötiloja, joita ilmaistaan kelvinasteikolla. Teoreettinen musta kappale säteilee keltaista valoa 3000 K lämpötilassa, valkoista valoa

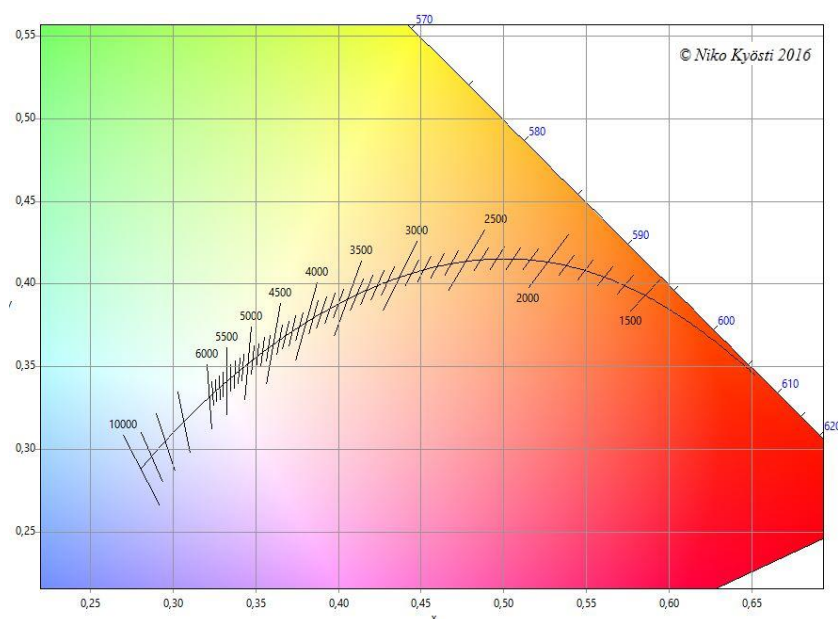
5000 K lämpötilassa, sinertävän valkoista valoa 8000 K lämpötilassa ja syvän sinistä valoa 60 000 K lämpötilassa. [3]



Kuva 10. Mustan kappaleen spektri. [11]

2.5.2 Värilämpötilan määritelmä valonlähteille

Värilämpötila kuuluu läheisesti yhteen väridiagrammien kanssa. Kuvassa 11 esitetty musta käyrä väridiagrammissa on ns. blackbody locus. Tämä käyrä kertoo mustan säteilijän kromaattisuuden eri lämpötiloilla, toisin sanoen se on absoluuttista värilämpötilaa kuvaava käyrä. Tällä käyrällä sijaitsee kaikki absoluuttiset värilämpötilat, joihin valonlähteitä verrataan.

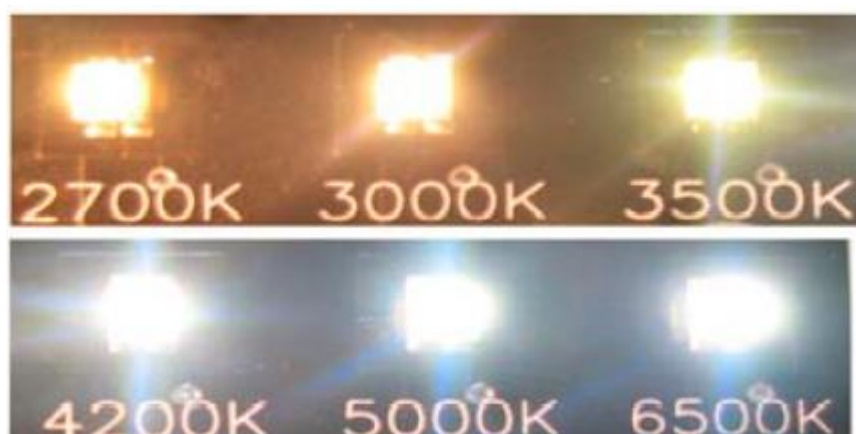


Kuva 11. Mustan säteilijän absoluuttinen värilämpötilakäyrä. [13]

Sellaisten valonlähteiden kohdalla, jotka eivät ole mustia kappaleita eikä niiden todellinen lämpötila vastaa valonlähteen värilämpötilaa, määritellään värilämpötila vertaamalla. Valonlähteen värilämpötilaa verrataan mustan kappaleen säteilemään värilämpötilaan ja näin etsitään parhaiten värilämpötilaa vastaava arvo. Esimerkiksi hehkulampun hehkulangan todellinen lämpötila on 2850 K, jolloin ekvivalentti värilämpötila on 2870 K.

Vertaaminen on käytännössä hankalaa, joten värilämpötilan määrittämiseen käytetään ekvivalenttia värilämpötilaa (CCT), jolla kuvataan valonlähteen värilämpötilan lähintä absoluuttista värilämpötilaa mustan kappaleen säteilykäyrällä. CCT:n yksikkö on myös kelvin, mutta on huomioitava, että CCT:llä ei ole mitään tekemistä valonlähteen tai sen komponenttien todellisen lämpötilan kanssa. CCT on yksittäinen luku, joka kertoo suurin piirtein valonlähteen värin vaikutelman, mutta ei kerro valonlähteen värin absoluuttista arvoa värikoordinaatistossa. [1]

ANSI C78.377 standardi määrittää CCT:lle arvot, joiden sisällä värilämpötila voi vaihdella ja se silti lasketaan olevan tietty tasalukuinen värilämpötila. Esimerkiksi 4000 kelvinin ekvivalentille värilämpötilalle sallitaan 3985 ± 275 K vaihtelu. Tämän vuoksi ekvivalentti värilämpötila ei ole pätevä arvo ilmaisemaan valaisimen todellista värilämpötilaa, vaan on suuntaa antava lukema. ANSI C78.377 mukainen sallittu CCT vaihtelu on noin MacAdams 7 SDCM, joten ero värilämpötilassa on helposti havaittavissa. Kuvassa 12 on esitetty eri CCT-värilämpötilan LED-valonlähteitä. [5]



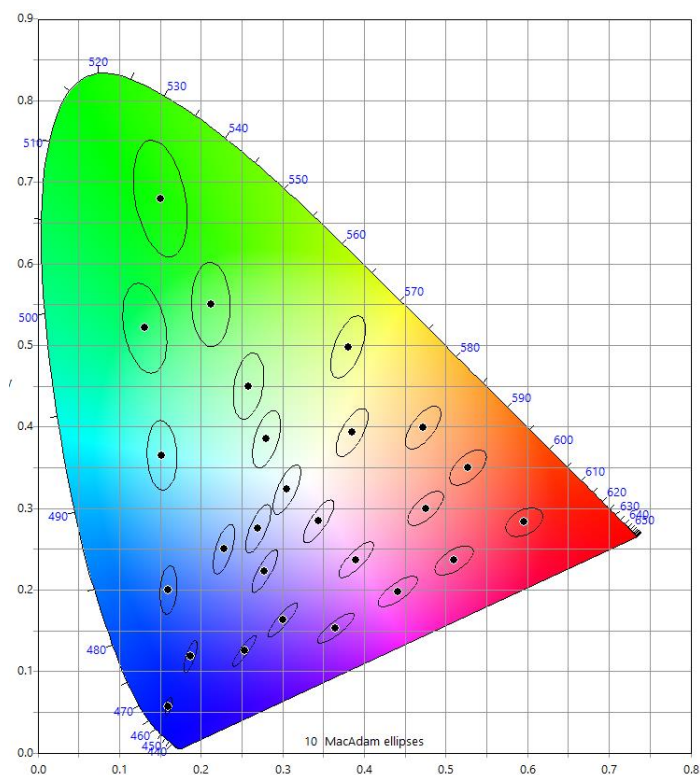
Kuva 12. Erilaisia nimellisen CCT-värilämpötilan omaavia LED-valonlähteitä. [6]

2.6 MacAdams SDCM

Vuonna 1940-luvulla Adam MacAdam tutki ihmisen värinäköä ja tulosten perusteella määritteli ellipsin muotoiset ”toleranssit” 26 eri värille CIE-väridiagrammiin. MacAdam pyrki määrittämään kuinka herkästi ihminen havaitsee värieron kahden värin välillä liikuttaessa CIE-värikoordinaatistossa x- ja y-suunnassa. Tämä toteutettiin kokeilla, joissa osallistujat katsoivat kahta eri väriä samanaikaisesti. Toinen väreistä oli koko kokeen ajan sama ns. referenssiväri ja toista väriä pystyi muuttamaan. Kokeeseen osallistujien tehtävänä oli muuttaa toista väriä niin kauan kunnes värien eroa ei enää huomaa. Kokeen jälkeen MacAdam huomasi, että testin tulokset muodostivat referenssivärin ympärille ellipsin. Näin syntyivät ellipsit, joita tänäkin päivänä käytetään monessa sovelluksessa liittyen valon väriin ja värinmäärittelyyn. [1]

MacAdams SDCM -arvo kertoo, kuinka tasalaatuinen valaisimen värilämpötila on eri valaisimella. Käytännössä MacAdam -arvo on siis ellipsi, jonka sisään mitatun valonlähteen xy-pisteet CIE-väridiagrammissa sijoittuvat. Mitä pienempi luku on, sitä pienemmän ellipsin sisään pisteet mahtuvat.[1] Ellipsien eri koot vastaavat keskihajontaa ja askelmat kuvaavat todennäköisyyttä, jolla ihminen havaitsee värieron. MacAdam SDCM -asteikolla värilämpötilan tasaisuutta arvioidaan välillä 0 - 10. Ellipsin keskipiste asetetaan nimelliseen värilämpötilaan, esimerkiksi 4000 K, jonka ympärille ellipsit muodostetaan. Ellipsin suuruus kertoo, kuinka paljon valonlähteen värilämpötila poikkeaa nimellisestä arvosta. [2]

Kuvassa 13 on esitetty MacAdamin alkuperäisen kokeen ellipsit kymmenkertaisella suurennoksella. Suurennus johtuu siitä, että ihmisen värinäkö on erittäin tarkka ja muuten ellipsit olisivat kuvassa todella pieniä. Huomion arvoista on myös se, että ellipsit ovat erikokoisia eri värialueilla. Tämä johtuu siitä, että ihmisen kyky havainnoida eri värejä tarkasti riippuu siitä mitä väriä havainnoidaan.[1]



Kuva 13. MacAdam kokeen ellipsit 10 kertaa suurennettuna. [13]

Arvojen ollessa välillä 0 - 4 eroa ei käytännössä voi huomata, mutta tätä suuremmilla arvoilla värierot alkavat näkyä jo hyvin selvästi. Varsinkin tilanteissa, joissa valonlähde on valkoista taustaa vasten, värilämpötilan erot tulevat selvästi näkyviin. Sisätilojen valaistuksen hyväksyttävänä arvoina voidaan pitää MacAdam arvoa 3 - 5 SDCM ja ulkotiloissa riittää jopa MacAdam 7 SDCM. Nykyään yhä useampi valmistaja antaa nämä arvot valaisinten tai valonlähteiden teknisissä tiedoissa, joten niihin kannattaa kiinnittää huomiota etenkin hankittaessa suuria määriä valaisimia. Hyvänä esimerkkinä toimivat LED-valonauhat, joissa on useita LED-yksiköitä. Jos LED-valonauhan MacAdam SDCM -arvo on hyvin suuri, niin värieron huomaa todella helposti nauhan eri LEDien välillä. [2]

MacAdam lukua määritettäessä täytyy olla tiedossa absoluuttiset xy-värikoordinaatit sille värilämpötilalle, johon tuloksia verrataan. ANSI C78.377–2015 standardi antaa verrattavat värikoordinaatit. Taulukossa 2 on esitetty ANSI standardin mukaiset värikoordinaatit eri värilämpötiloille.

Taulukko 2. ANSI C78.377 värilämpötilan absoluuttinen koordinaattipiste. [5]

			A	B	C	D
CCT		Center	(x, y) Tolerance Quadrangle			
2200 K	x	0,5018	0,5259	0,5045	0,4799	0,4993
	y	0,4153	0,4342	0,4344	0,3967	0,3967
2500 K	x	0,4806	0,5045	0,4813	0,4593	0,4799
	y	0,4141	0,4344	0,4319	0,3944	0,3967
2700 K	x	0,4578	0,4813	0,4562	0,4373	0,4593
	y	0,4101	0,4319	0,4260	0,3893	0,3944
3000 K	x	0,4339	0,4562	0,4303	0,4150	0,4373
	y	0,4033	0,4260	0,4173	0,3821	0,3893
3500 K	x	0,4078	0,4303	0,4003	0,3895	0,4150
	y	0,3930	0,4173	0,4035	0,3709	0,3921
4000 K	x	0,3818	0,4003	0,3737	0,3671	0,3895
	y	0,3797	0,4035	0,3880	0,3583	0,3709
4500 K	x	0,3613	0,3737	0,3550	0,3514	0,3672
	y	0,3670	0,3882	0,3754	0,3482	0,3585
5000 K	x	0,3446	0,3550	0,3375	0,3366	0,3514
	y	0,3551	0,3753	0,3619	0,3373	0,3481
5700 K	x	0,3287	0,3375	0,3205	0,3221	0,3366
	y	0,3425	0,3619	0,3476	0,3256	0,3374
6500 K	x	0,3123	0,3205	0,3026	0,3067	0,3221
	y	0,3283	0,3477	0,3311	0,3119	0,3255
Flexible CCT	x	0,4237	0,4461	0,4184	0,4049	0,4286
	y	0,3998	0,4229	0,4123	0,378	0,3868

Absoluuttisen värilämpötilan koordinaattien piste kertoo värilämpötilan, johon mitattujen valonlähteiden arvoja verrataan. Valonlähteestä mitataan sen spektritehojakauma, josta laskemalla saadaan valonlähteen xy-värikoordinaatit. Lasketut värikoordinaattipisteet sekä absoluuttisen värilämpötilan koordinaattipiste sijoitetaan sopivaan väridiagrammiin. Absoluuttisen pisteen ympärille muodostetaan MacAdam -ellipsejä, kunnes kaikkien mitattujen valonlähteiden koordinaattipisteet ovat ellipsin sisällä. Ellipsien määrä kertoo lopputuloksen, eli monenko MacAdam -ellipsin sisään pisteet mahtuvat.

3 LED ja LEDin valmistus

Tässä luvussa käydään läpi LEDien historiaa sekä valmistusmenetelmiä. Etenkin valkoisen ja sinisen LEDin kehityksestä ja valmistuksesta kerrotaan tarkemmin. Lisäksi kerrotaan LEDien jaottelusta sekä siihen vaikuttavista standardeista.

3.1 LEDin historiaa

LED (Light Emitting Diode) on nimensä mukaisesti valoa hohtava diodi, eli puolijohdekomponentti. Viimevuosien aikana LED on kehittynyt huimasti ja noussut valonlähteenä yhä yleisemmäksi maailmassa. Energiatehokkaana ja kestäväenä ratkaisuna tämä ei ole ihme, eikä LEDin kehitykselle näy vielä loppua. Jokaisella valonlähteellä on omat etunsa sekä heikkoutensa, niin myös LEDillä. LEDien yhtenä etuna voidaan pitää helppoutta valmistaa minkä tahansa värisiä LED-yksiköitä ja jopa säädettäviä LEDejä. Helppoudella on kääntöpuolensa, joka johtaa LEDien laadun suureen vaihteluun. Tärkein LEDin väri valaistuksen kannalta on valkoinen, jota käytetään valaisimissa, joilla halutaan korvata perinteiset valonlähteet. LED-yksiköiden eri värit saadaan muodostettua käyttämällä erilaisia puolijohdemateriaaleja, päällystämällä tietyn värinen LED-yksikkö tietyllä aineella tai yhdistämällä erivärisiä LED -yksiköitä. [1]

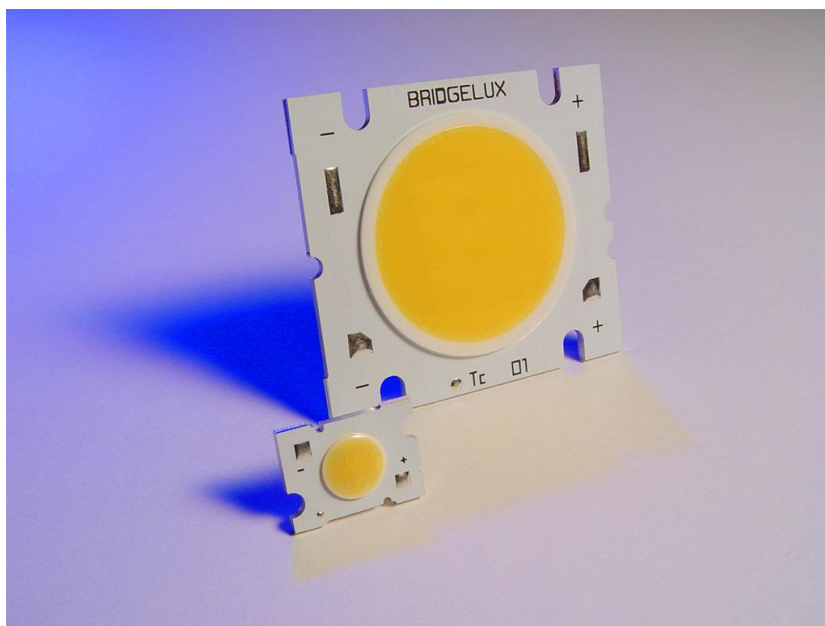
Ensimmäiset LEDit kehitettiin jo 1900-luvun alkupuolella, vaikka ensimmäiset kaupalliseen käyttöön valmistetut LEDit otettiin käyttöön vasta vuonna 1962. Ensimmäiset LEDit eivät olleet valoteholtaan kovin tehokkaita, vaan lähinnä merkkivalokäyttöön soveltuvia. LEDit kehittyivät suhteessa kovin hitaasti vuosikymmenien kuluessa, kunnes vasta vuonna 1994 tehtiin läpimurto, jolloin ensimmäinen kirkas sininen LED julkaistiin. Pian tämän jälkeen julkaistiin myös ensimmäinen valkoinen LED. Tämä läpimurto poiki jopa fysiikan Nobel-palkinnon vuonna 2014, jonka saivat Shuji Nakamura, Isamu Akasaki ja Hiroshi Amano tutkimustyöstään sinisen ja valkoisen LEDin kehittämiseksi. [20]

3.2 LEDin valmistus

Sinisen LEDin kehittäminen oli merkittävä etappi siksi, että se mahdollisti valkoisen LEDin valmistamisen. Yksinkertaisuudessaan sinisen LED-yksikön päälle lisätään tietynlaista fosforia, joka saa sinisen LEDin säteilemään valkoista valoa. Valkoinen LED-valo voidaan muodostaa kahdella tapaa, edellä mainitulla sinisen LEDin ja sopivan fosforin

yhdistelmällä tai RGB-värien yhdistelmällä. RGB-menetelmässä yhteen LED-yksikköön laitetaan yksi tai useampi punainen, vihreä ja sininen LED. Säättämällä näiden kolmen LEDin yhdistelmää sopivassa suhteessa saadaan valo säteilemään valkoisena. RGB-menetelmä on kuitenkin vähemmän käytetty, koska sinisen LEDin ja fosforin yhdistelmällä saadaan aikaisiksi tarkempi väri ja valmistus on yksinkertaisempaa ja edullisempaa.

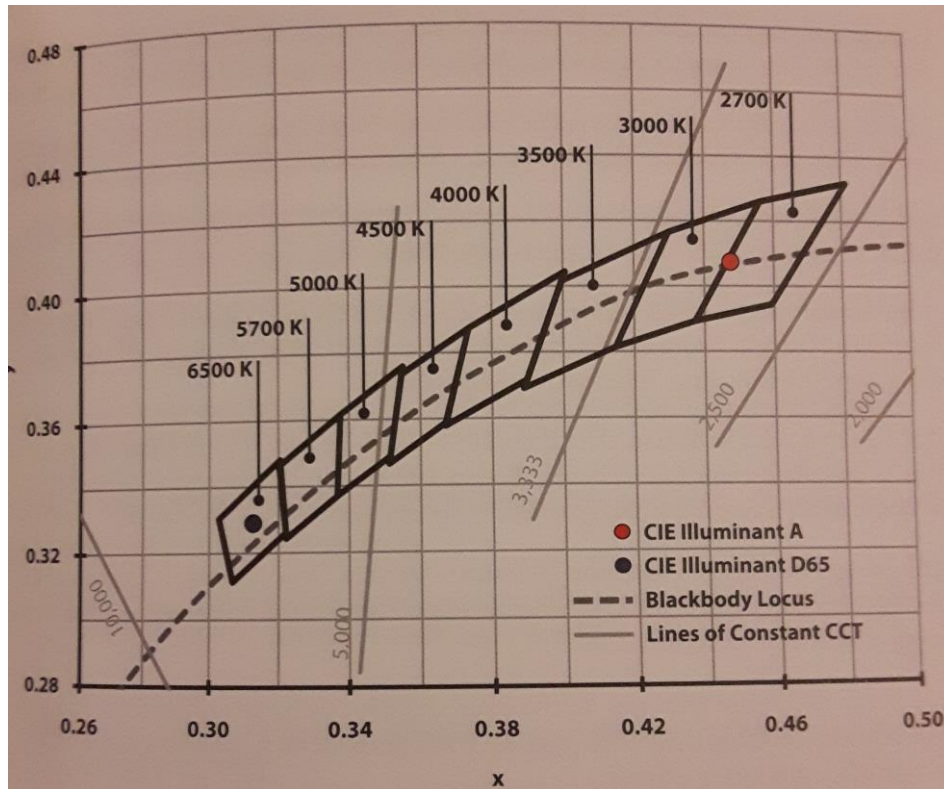
LEDin ongelma on värin yhteneväisyys ja vakaus. Tämä johtuu LEDin monimutkaisesta valmistusmenetelmästä ja tarkemmin ottaen puolijohdeiden valmistusmenetelmästä. Puolijohdeet valmistetaan levyille tai kiekkoille, joissa on yhdessä kiekossa monta komponenttia. Yksittäiset komponentit leikataan kiekosta erilleen, jolloin saadaan yksittäinen puolijohdekomponentti. Jokaisessa puolijohdekiekossa on eroavaisuuksia eri osissa ja jopa leikatuissa komponenteissa itsessään on eroavaisuuksia. Tästä syystä myös LEDien ominaisuuksissa on eroja. Kuvassa 14 on esitetty valmiita LED-chippejä eli yksiköitä.



Kuva 14. Kaksi erikokoista LED-yksikköä. [12]

LED-yksiköiden valmistuksesta johtuvien erojen hallitsemiseksi on kehitetty ns. binning-järjestelmä. Binning-järjestelmä tarkoittaa sitä, että valmistetut LED-yksiköt jaotellaan ominaisuuksiensa mukaisesti eri bineihin, eli ”koreihin”. Tällä menetelmällä LEDit rajataan osajoukkoihin, jotka täyttävät LEDien nimelliset fotometriset ja kromaattiset ominaisuudet. Värillisille LEDeille ei ole standardia binning-järjestelmästä, mutta valkoiselle LEDille on. Valkoiset LEDit, jotka tuottavat jatkuvaa tasaista CCT -värilämpötilaa täytyy jaotella ”koreihin” ANSI C78.377 standardin mukaisesti. Kuvassa 15 on esitetty ANSI

C78.377 standardin mukaiset binning-korit, joissa neliön sisään sijoittuvat LEDit omaavat kyseisen korin CCT-väriämpötilan. [1]



Kuva 15. ANSI C78.377 määrittely valkoisen LEDin nimelliselle ekvivalentille väriämpötilalle. [1]

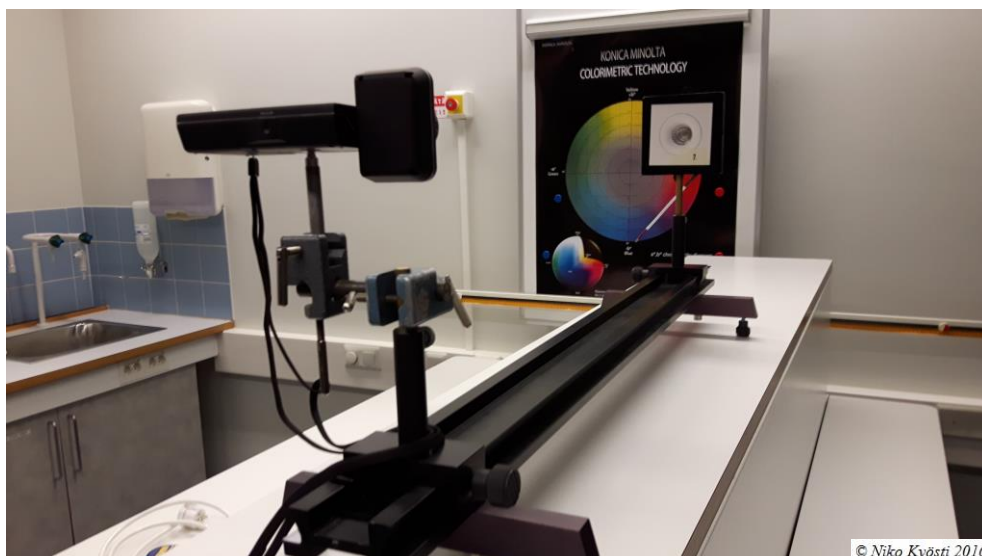
4 VALAISIMIEN SPEKTRIN MITTAAMINEN

Tämän työn tarkoituksena on määrittää mittauksiin perustuen Winled Oy:n Spectri 8W 4000 K -valaisimen MacAdams SDCM -arvo. Mittaukset tehtiin pilottimittauksena vain tälle yhdelle valaisinmallille ja tarkoitus on tulevaisuudessa mitata ja määrittää samalla tavalla jokaiselle Winled Oy:n valaisimelle MacAdams SDCM -arvo. Valaisimesta mitattiin valaisimen spektrijakauma, jota laskennallisesti käsiteltiin, jotta saatiin selvitettyä MacAdam SDCM -arvo.

Mittaukset suoritettiin Tampereen ammattikorkeakoulun fysiikan koulutuksen laboratorio-tiloissa, joista löytyy valaistusmittauksiin soveltuva pimeä huone. Mittaukset suoritettiin 15.1.2016 yhdellä mittauskerralla. Mitattavia valaisimia oli kaikkiaan 11 kappaletta. Mittalaitteena käytettiin Konica Minolta CL-70F valaistusmittaria.

4.1 Mittausmenetelmät

Kaikki valaisimet mitattiin samoissa olosuhteissa. Mittarin ja valonlähteen etäisyys toisistaan oli mittarin ohjekirjan mukainen 10 kertaa valonlähteen halkaisija, tässä tapauksessa n. 30 cm. Oleellinen osa valaisinta on virtalähde, joten jokaisella valaisimella oli käytössä oma virtalähde, jolloin virtalähteen aiheuttamat muutokset tulevat mukaan mittaukseen. Valaisimien annettiin lämmetä 10 minuuttia ennen mittauksen suorittamista. Mittaus suoritettiin täysin pimennetyssä huoneessa, jotta muut valonlähteet eivät aiheuta vääristymää mittauksiin. Lisäksi tehtiin kolme mittausta, jossa virtalähteitä vaihdettiin eri valaisimille. Kuvassa 16 nähdään mittalaite ja valaisin valmiina mittausta varten.



Kuva 16. Mittauspenkki valmiina mittaukseen.

Valaisimia mitattiin 11 kappaletta. Mittausten tarkkaa määrää ei ole määritelty standardeissa, joten tarvittava mittausten määrä valittiin sopivaksi arvioimalla. Valaisimien määrässä päädyttiin 11 kappaleeseen, koska tällä valaisimien määrällä eroja voidaan havaita kattavasti sekä mahdollisia mittavirheistä johtuvia eriäviä mittaustuloksia voidaan hylätä.

4.1.1 Mittalaitteet

Mittalaitteena käytettiin Konica Minoltan CL-70F -valaistusmittaria, joka on esitetty kuvassa 17. Käytetty mittari oli uusi ja juuri kalibroitu. Mittarilla pystyy mittaamaan spektrijakauman, värintoistoindeksin, valaistusvoimakkuuden ja CCT -värilämpötilan. Mittalaitte on varustettu lineaarisella CMOS -kuvasensorilla, joka pystyy mittaamaan näkyvän valon spektrin aallonpituusalueella 380nm - 780nm. Mittalaitteessa on myös LCD-näyttö, josta mittaustuloksia pääsee katsomaan heti mittauksen jälkeen. Tässä työssä tarvittiin spektrijakauman mittausta. Monipuolinen mittari antaa lopputulosten käsittelyyn tarvittavat xy-värikoordinaatit suoraan. [21] Mittarin olennaisimmat tekniset tiedot on esitetty taulukossa 3.



Kuva 17. Konica Minolta CL-70F -valaistusmittari.

Taulukko 3. Konica Minolta CL-70F -valaistusmittarin tärkeimmät ominaisuudet.

Malli	CRI -valaistusmittari CL70F
Valaistusmittariluokka	Täyttää JIS C 1909-1:2006 standardin. Yleisen luokan A valaistusmittarit.
	Täyttää DIN 5032 osa 7 luokka C määrittäykset
Sensori	Lineaarinen CMOS -kuvasensori
Spektrin aallonpituus-alue	380nm - 780nm
Aallonpituuden mit-taustarkkuus	1nm
Mittausalueet	Jatkuvalle valolle: 1 - 200 000lx; 1563 - 100 000 K(Kromaattisuuden näyttäminen vaatii vähintään 5lx)
	Salamavalolle: 20 - 20 500lx; 2500 -100 000 K
Mittaustarkkuus	E_v : $\pm 5\%$ + 1 numero näyttämästä.
	xy: ± 0.003
Spektrivaste	9 % tai vähemmän
Lämpötilaominaisuudet	Valaistusvoimakkuus: $\pm 5\%$.
	xy: ± 0.006
Kosteusominaisuudet	Valaistusvoimakkuus: $\pm 3\%$.
	xy: ± 0.006

4.1.2 Mitattava valaisin

Mitattava valaisin oli Winled Oy:n Spectri 8W 4000 K -spottivalaisin (Kuva 18). Valaisin on tarkoitettu kohdevalaisimeksi, joka asennetaan kiinteästi kattoon tai muuhun pintaan. Valaisinta saa kahdella eri värilämpötilalla; neutraali 4000 K ja lämmin 3000 K. Valaisimesta löytyy myös tuplamalli, jossa valaisimia on kaksi yhdessä. Valaisimen virtalähteenä toimii 500mA vakiovirtalähde, joka on mitoitettu tätä valaisinta varten. Kaikkiaan mitattavia valaisimia oli 11 kappaletta ja sama määrä virtalähteitä.



Kuva 18. Winled Oy Spectri 8W -valaisin. [15]

4.1.3 Apuvälineet

Valaisimet kiinnitettiin mittauspenkkiin laboratoriotiloista löytyvillä apuvälineillä. Mittauspenkistä pystyi helposti säätämään valaisimen ja mittarin etäisyyttä valmiin mitta-asteikon avulla. Itse valaisin kiinnitettiin levyyn, jossa oli sopiva reikä valaisimen asennukselle. Mittari kiinnitettiin jalustaan sopivilla kiinnityspaloilla. Mittarissa oli kameroihin sopivat kiinnityskierteet. Näillä välineillä jokainen mittaus pystyttiin mittaamaan samalla tavalla.

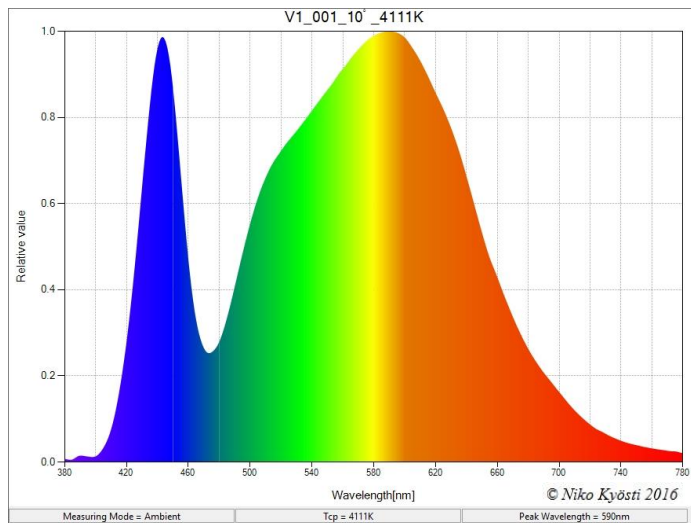
4.2 Mittausten suorittaminen

Tärkeä osa mittausten tekemistä oli dokumentointi ja järjestelmällisyys. Aivan aluksi valaisimet ja virtalähteet purettiin laatikoistaan ja merkattiin. Jokaiselle valaisimelle annettiin juokseva numero 1 - 11 ja jokaiselle virtalähteelle annettiin numero samalla tavalla. Numeroitu valaisin ja virtalähde yhdistettiin numerointien mukaisesti. Valaisimet kytkettiin liitälaitteella tavalliseen pistorasiaan, josta saatiin 230 V verkkojännite valaisimelle. Mittalaitteen asetukset asetettiin mittaukseen sopiville arvoille. Koska mitattava valaisin on LED-valaisin, asetettiin mittarin asetuksista 10 asteen normaalikatsojan mukainen asetus. Lisäksi mittarista asetettiin sopiva CIE-väridiagrammi, joka oli CIE 1964-väridiagrammi. Asetusten säätämisen jälkeen suoritettiin kolme testimittausta.

Mittaustulokset purettiin mittalaitteesta USB-liitännän kautta tietokoneelle. Mittalaitteesta saatiin ulos suoraan Excel-taulukot spektristä ja muista mitatuista arvoista. Taulukoiden lisäksi saatiin graafiset esitykset spektristä, kromaattisuusdiagrammista sekä vä-

rintoistoindeksistä. Ennen varsinaisten mittausten aloittamista testimittausten tulokset purettiin tietokoneelle ja tarkastettiin niiden todenmukaisuus. Lisäksi mittalaitteen muisti tyhjennettiin.

Ennen varsinaisten mittausten tekemistä valaisimien annettiin lämmetä 10 minuuttia. Itse mittauksen tekemiseen ei mennyt aikaa käytännössä kuin yhden napin painalluksen ajan. Mittauksia jouduttiin kuitenkin uusimaan, jos mittalaite liikahti. Mittauksia suoritettiin 11 varsinaista mittausta ja lisäksi kolme mittausta eri virtalähteillä. Kuvassa 19 on esitetty ensimmäisen mittauksen tulos, joka on spektrijakauma valaisimelle numero yksi.



Kuva 19. Mitattu spektrijakauma valaisimelle 1.

Mittausten puolivälissä siihen asti tehdyt mittaustulokset purettiin ja osittain käsiteltiin. Tällä varmistettiin, että mittaustulokset ovat linjassa, eikä virheitä ole tullut. Mittausten tekemiseen meni aikaa testaukset ja asetukset huomioiden yhteensä noin neljä tuntia.

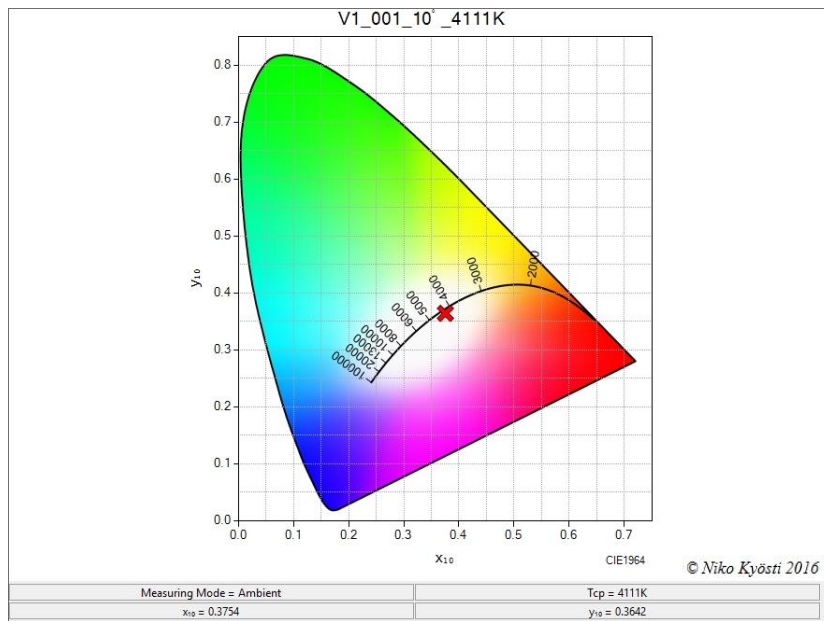
5 MACADAM SDCM -ARVON MÄÄRITYS MITTAUSTULOKSISTA

Jokaisesta yhdestätoista mitatusta valaisimesta saatiin mittaustuloksia neljän eri tiedoston verran. Mittarista saadut tiedostot olivat excel-tiedosto ja kolme kuvaajaa, joissa on esitetty xy-koordinaattipiste CIE 1964 ja CIE 1976 -väridiagrammeissa sekä valaisimen spektrijakauma. Käytännössä tulostenkäsittelyä varten kaikki tarvittava mittaustuloksia löytyy Excel-tiedostosta, jossa on spektrijakauma yhden nanometrin ja viiden nanometrin välein sekä värikoordinaatit molempien väridiagrammien arvoilla.

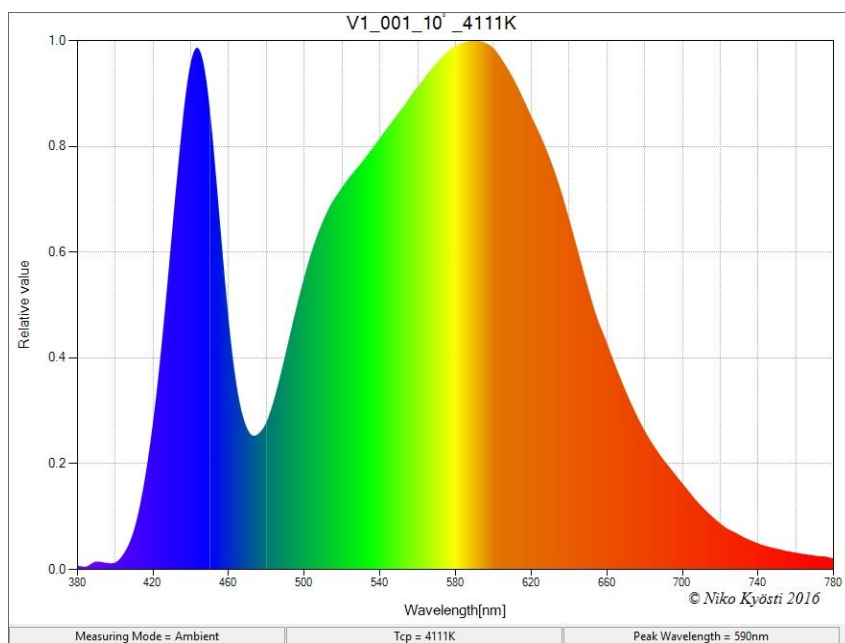
5.1 Mitattujen valaisimien mittaustulokset

Yhden valaisimen mittaustulosten spektridata sisältää säteilyn suhteellisen intensiteetin I aallonpituusalueella 380nm - 780nm yhden nanometrin tarkkuudella, joten tuloksia yhdestä mittauksesta on yli 400 riviä. Tulokset esitetään tässä työssä graafisesti ja spektrijakauman mittaustuloksia esitetään ainoastaan yhden valaisimen osalta. Mittaustuloksia on kuitenkin hyvin samanlaista jokaisella valaisimella.

Kuvioissa 3 ja 4 on esitetty valaisimen numero 1 mittaustulokset CIE 1964 -väridiagrammissa ja valaisimen spektrijakauma. Kuviossa 3 on myös esitetty mittalaitteen antamat x ja y -kromaattisuuskoordinaatit. Taulukossa 4 on esitetty valaisimen numero 1 mitattu spektrijakauma numeerisesti. Samassa taulukossa on lisäksi esitetty mittaustulosten laskeutukset.



Kuvio 3. Valaisimen numero 1 mittau tulokset.



Kuvio 4. Valaisimen numero 1 spektrijakauma.

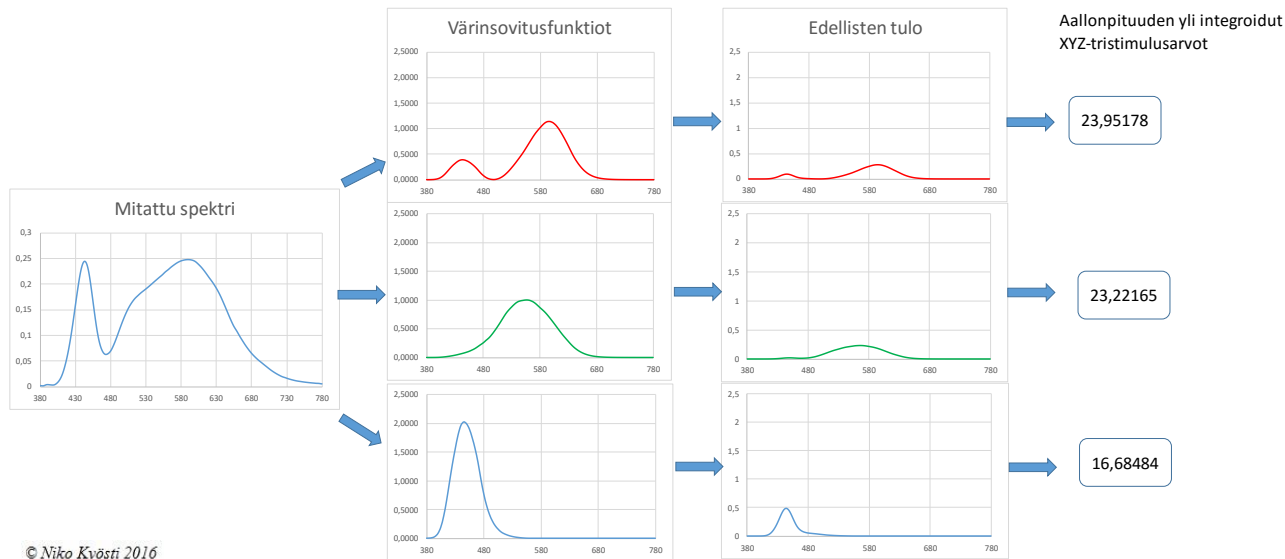
Taulukko 4. Mittarin antamat tulokset valaisimen 1 spektritehojakaumalle eri aallonpituuksilla yhden nanometrin tarkkuudella, sekä värinsovitusfunktio ja laskettu värinsovitus.

Aallonpituus nm	Värinsovitusfunktio 1964 10 degree 1nm	Mitattu rel/I	Laskettu värinsovitus ja XYZ	478	0,099042	0,239025	0,86746	0,065701	0,006507	0,015704	0,056993				
	\bar{x}_{10}	\bar{y}_{10}	\bar{z}_{10}	I(λ)	\bar{x}_{10} (λ)	\bar{y}_{10} (λ)	\bar{z}_{10} (λ)	479	0,089388	0,245997	0,81828	0,067169	0,006004	0,016523	0,054963
380	0,000159952	0,000017364	0,000704776	0,001779647	2,84658E-07	3,09018E-08	1,25425E-06	480	0,080507	0,253589	0,772125	0,068995	0,005555	0,017496	0,053273
381	0,00021508	0,000023327	0,00094823	0,001599569	3,44035E-07	3,73131E-08	1,51676E-06	481	0,072034	0,261876	0,72829	0,071197	0,005129	0,018645	0,051852
382	0,00028749	0,00003115	0,0012682	0,001437152	4,13167E-07	4,47673E-08	1,8226E-06	482	0,06371	0,270643	0,68604	0,073729	0,004697	0,019954	0,050581
383	0,00038199	0,00004135	0,0016861	0,001299153	4,96263E-07	5,372E-08	2,1905E-06	483	0,055694	0,279645	0,64553	0,076533	0,004262	0,021402	0,049404
384	0,00050455	0,00005456	0,0022285	0,00127089	6,41228E-07	6,93398E-08	2,83218E-06	484	0,048117	0,288694	0,60685	0,079553	0,003828	0,022966	0,048277
385	0,00066244	0,00007156	0,0029278	0,001439432	9,53537E-07	1,03006E-07	4,21437E-06	485	0,041072	0,297665	0,57006	0,082747	0,003399	0,024631	0,047171
386	0,0008645	0,0000933	0,0038237	0,001862292	1,60995E-06	1,73752E-07	7,12085E-06	486	0,034642	0,306469	0,53522	0,086095	0,002982	0,026385	0,04608
387	0,0011215	0,00012087	0,0049642	0,002438963	2,7353E-06	2,94798E-07	1,21075E-05	487	0,028896	0,315035	0,50234	0,089576	0,002588	0,02822	0,044998
388	0,00144616	0,00015564	0,0064067	0,003017884	4,36434E-06	4,69703E-07	1,93347E-05	488	0,023876	0,323335	0,4714	0,093173	0,002225	0,030126	0,043922
389	0,00185359	0,0001992	0,0082193	0,003447694	6,39061E-06	6,86781E-07	2,83376E-05	489	0,019628	0,331366	0,44239	0,096861	0,001901	0,032097	0,04285
390	0,0023616	0,0002534	0,0104822	0,00363688	8,58886E-06	9,21585E-07	3,81225E-05	490	0,016172	0,339133	0,415254	0,100613	0,001627	0,034121	0,04178
391	0,0029906	0,0003202	0,013289	0,003639214	1,08834E-05	1,16528E-06	4,83615E-05	491	0,0133	0,34786	0,390024	0,104402	0,001389	0,036317	0,040719
392	0,0037645	0,0004024	0,016747	0,003530105	1,32891E-05	1,42051E-06	5,91187E-05	492	0,010759	0,358326	0,366399	0,1082	0,001164	0,038771	0,039644
393	0,0047102	0,0005023	0,02098	0,003839303	1,59389E-05	1,69973E-06	7,09943E-05	493	0,008542	0,370001	0,344015	0,111987	0,000957	0,041435	0,038525
394	0,0058581	0,0006232	0,026127	0,003242306	1,89938E-05	2,0206E-06	8,47117E-05	494	0,006661	0,382464	0,322689	0,115744	0,000771	0,044268	0,037349
395	0,0072423	0,0007685	0,032344	0,003108826	2,25151E-05	2,38913E-06	0,00100552	495	0,005132	0,395379	0,302356	0,119545	0,000613	0,04723	0,036118
396	0,008896	0,0009417	0,039802	0,002984799	2,65635E-05	2,81079E-06	0,00118801	496	0,003982	0,408482	0,283036	0,123102	0,00049	0,050285	0,034842
397	0,0108709	0,0011478	0,048691	0,002875809	3,12626E-05	3,30085E-06	0,000140026	497	0,003239	0,421588	0,264816	0,126675	0,00041	0,053405	0,033546
398	0,0131989	0,0013903	0,05921	0,002827527	3,73203E-05	3,93111E-06	0,000167418	498	0,002934	0,434619	0,247848	0,130165	0,000382	0,056572	0,032261
399	0,0159292	0,001674	0,071576	0,002909615	4,63478E-05	4,87077E-06	0,000282959	499	0,003114	0,447601	0,232318	0,133564	0,000416	0,059783	0,031029
400	0,0191097	0,0020044	0,0860109	0,003192179	6,10016E-05	6,3984E-06	0,000274562	500	0,003816	0,460777	0,218502	0,136864	0,000522	0,063064	0,029905
401	0,022788	0,002386	0,10274	0,003730193	8,50036E-05	8,90024E-06	0,00038324	501	0,005095	0,47434	0,205851	0,140057	0,000714	0,066435	0,028831
402	0,027011	0,002822	0,122	0,004512405	0,000121885	1,2734E-05	0,000550513	502	0,006936	0,4882	0,193596	0,143137	0,000993	0,06988	0,027711
403	0,031829	0,003319	0,14402	0,005509447	0,00017536	1,82859E-05	0,000793471	503	0,009299	0,50234	0,181736	0,146098	0,001359	0,073391	0,026551
404	0,037278	0,00388	0,16899	0,006691987	0,000249464	2,56494E-05	0,001130879	504	0,012147	0,51674	0,170281	0,148934	0,001809	0,07696	0,025361
405	0,0434	0,004509	0,19712	0,008051097	0,000349418	3,63024E-05	0,001587032	505	0,015444	0,53136	0,159249	0,151641	0,002342	0,080576	0,024149
406	0,050223	0,005209	0,22857	0,00961953	0,000483122	5,01081E-05	0,002198736	506	0,019156	0,54619	0,148673	0,154215	0,002954	0,084231	0,022928
407	0,057764	0,005885	0,26347	0,011434525	0,000660504	6,84356E-05	0,0003012654	507	0,02325	0,56118	0,138609	0,156652	0,003642	0,08791	0,021713
408	0,066038	0,006833	0,3019	0,013533767	0,000893743	9,24762E-05	0,004085844	508	0,02769	0,57629	0,129096	0,158955	0,004041	0,091604	0,020552
409	0,075033	0,007757	0,34387	0,015956149	0,001197238	0,000123772	0,005486841	509	0,032444	0,5915	0,120215	0,161135	0,005228	0,095311	0,019371
410	0,084736	0,008756	0,389366	0,018741764	0,001588102	0,000164103	0,007297406	510	0,037465	0,606741	0,112044	0,163209	0,006115	0,099026	0,018287
411	0,095041	0,009816	0,43797	0,021931155	0,002084359	0,000215276	0,009605188	511	0,042956	0,62215	0,10471	0,165191	0,007096	0,102773	0,017297
412	0,105836	0,010918	0,48922	0,025559533	0,002705119	0,000279059	0,012504235	512	0,049114	0,63783	0,098196	0,167084	0,008206	0,106571	0,016407
413	0,117066	0,012058	0,5429	0,029623322	0,003467884	0,000357198	0,016082502	513	0,05592	0,65371	0,092361	0,168874	0,009443	0,110395	0,015597
414	0,128682	0,013237	0,59881	0,034099463	0,004387987	0,000451375	0,0204191	514	0,063349	0,66968	0,087088	0,170543	0,010804	0,114209	0,014852
415	0,140638	0,014456	0,65676	0,038964644	0,00547991	0,000563273	0,02559042	515	0,071358	0,68566	0,082248	0,172074	0,012279	0,117984	0,014153
416	0,152893	0,015717	0,71658	0,044202853	0,006758307	0,000694736	0,03167488	516	0,079901	0,70155	0,077744	0,173475	0,013861	0,121702	0,013487
417	0,165416	0,017025	0,77812	0,049821131	0,008241212	0,000848205	0,038766818	517	0,088909	0,71723	0,073456	0,17479	0,01554	0,125365	0,012839
418	0,178191	0,018399	0,84131	0,055832747	0,009948893	0,001027267	0,046972649	518	0,098293	0,73257	0,069268	0,176063	0,017306	0,128979	0,012196
419	0,191214	0,019848	0,90611	0,062250931	0,011903249	0,001235556	0,056460191	519	0,107949	0,74746	0,06506	0,177339	0,019144	0,132554	0,011538
420	0,204492	0,021391	0,972542	0,069084257	0,014217178	0,001477781	0,067187341	520	0,117749	0,761757	0,060709	0,178629	0,021033	0,136072	0,010844
421	0,21765	0,022992	1,0389	0,076333456	0,016613977	0,001755059	0,079302827	521	0,127839	0,77534	0,056457	0,179911	0,023	0,139492	0,010157
422	0,230267	0,024598	1,1031	0,083998501	0,019342083	0,002066195	0,092658747	522	0,13845	0,78822	0,052609	0,181161	0,025082	0,142795	0,009531
423	0,242311	0,026213	1,1651	0,092078075	0,02231153	0,002413643	0,107280165	523	0,149516	0,80046	0,049122	0,182355	0,027265	0,145968	0,008958
424	0,253793	0,027841	1,2249	0,10055431	0,02551998	0,002799533	0,123168674	524	0,161041	0,81214	0,045954	0,183491	0,02955	0,149021	0,008432
425	0,264737	0,029497	1,2825	0,109395407	0,028961012	0,003226836	0,14029961	525	0,172953	0,82333	0,04305	0,184586	0,031925	0,151975	0,007946
426	0,275195	0,031195	1,3382	0,118568927	0,032629576	0,003698758	0,158668938	526	0,185209	0,83412	0,040368	0,185656	0,034385	0,154859	0,007495
427	0,285301	0,032927	1,3926	0,12803641	0,036528916	0,004125855	0,173603504	527	0,197755	0,8446	0,037839	0,186715	0,036924	0,1577	0,007065
428	0,295143	0,034738	1,4461	0,137719691	0,040647003	0,004784107	0,199156445	528	0,210538	0,85487	0,035384	0,187777	0,039534	0,160525	0,006644
429	0,304869	0,036654	1,4994	0,147524163	0,044975544	0,005407351	0,2211973	529	0,22346	0,86504	0,032949	0,188847	0,0422	0,16336	0,006222
430	0,314679	0,038676	1,55348	0,157355174	0,049516369	0,006085869	0,244448116	530	0,236491	0,875211	0,030451	0,189934	0,044918	0,166232	0,005784
431	0,324355	0,040792	1,6072	0,167125762	0,054208076	0,006817394	0,268604524	531	0,249633	0,88537	0,028029	0,191044	0,047691	0,169145	0,005355
432	0,33357	0,042946	1,6589	0,176769957	0,058965155	0,007591563	0,293243682	532	0,262972	0,89537	0,025862	0,192177	0,050537	0,172069	0,00497
433	0,342243	0,045114	1,7082	0,186226204	0,063734615	0,008401409	0,318111602	533	0,276515	0,90515	0,02392	0,193327	0,053458	0,17499	0,004624
434	0,350312	0,047333	1,7548	0,195434391	0,068463013	0,009250496	0,34294827	534	0,290269	0,92181	0,022174	0,194491	0,056455	0,177891	0,004313
435	0,357719	0,049602	1,7985	0,204286665	0,073077221	0,010133027	0,367409567	535							

578	0,98959	0,887249	0	0,243547	0,241011	0,216086	0	678	0,047006	0,018315	0	0,068138	0,003203	0,001248	0
579	1,00191	0,877986	0	0,244139	0,244606	0,214351	0	679	0,043823	0,017069	0	0,066458	0,002912	0,001134	0
580	1,01416	0,868934	0	0,244675	0,24814	0,212607	0	680	0,040851	0,015905	0	0,064837	0,002649	0,001031	0
581	1,0265	0,860164	0	0,245156	0,251652	0,210874	0	681	0,038072	0,014818	0	0,063274	0,002409	0,000938	0
582	1,0388	0,851519	0	0,245582	0,25511	0,209118	0	682	0,035468	0,013801	0	0,061769	0,002191	0,000852	0
583	1,051	0,842963	0	0,245956	0,2585	0,207332	0	683	0,033031	0,01285	0	0,06032	0,001992	0,000775	0
584	1,0629	0,834393	0	0,246281	0,261772	0,205495	0	684	0,030753	0,011961	0	0,05892	0,001812	0,000705	0
585	1,0743	0,825623	0	0,246559	0,264878	0,203565	0	685	0,028623	0,01113	0	0,05756	0,001648	0,000641	0
586	1,0852	0,816764	0	0,246791	0,267818	0,20157	0	686	0,026635	0,010356	0	0,056229	0,001498	0,000582	0
587	1,0952	0,807544	0	0,246976	0,270488	0,199444	0	687	0,024781	0,009633	0	0,054921	0,001361	0,000529	0
588	1,1042	0,797947	0	0,24711	0,272859	0,197181	0	688	0,023052	0,00896	0	0,053643	0,001237	0,000481	0
589	1,112	0,787893	0	0,247191	0,274877	0,19476	0	689	0,021441	0,008332	0	0,052405	0,001124	0,000437	0
590	1,11852	0,777405	0	0,247216	0,276516	0,192187	0	690	0,019941	0,007749	0	0,051219	0,001021	0,000397	0
591	1,1238	0,76649	0	0,247184	0,277785	0,189464	0	691	0,018544	0,007205	0	0,050088	0,000929	0,000361	0
592	1,128	0,755309	0	0,247093	0,278721	0,186632	0	692	0,017241	0,006698	0	0,048993	0,000845	0,000328	0
593	1,1311	0,743845	0	0,246945	0,279319	0,183688	0	693	0,016027	0,006225	0	0,047909	0,000768	0,000298	0
594	1,1332	0,73219	0	0,246734	0,279599	0,180656	0	694	0,014896	0,005785	0	0,046814	0,000697	0,000271	0
595	1,1343	0,720353	0	0,246456	0,279555	0,177535	0	695	0,013842	0,005375	0	0,045697	0,000633	0,000246	0
596	1,1343	0,708281	0	0,246101	0,279152	0,174309	0	696	0,012862	0,004994	0	0,044567	0,000573	0,000223	0
597	1,1333	0,696055	0	0,245662	0,278409	0,170994	0	697	0,011949	0,004639	0	0,043439	0,000519	0,000202	0
598	1,1312	0,683621	0	0,245126	0,277286	0,167573	0	698	0,0111	0,004309	0	0,042324	0,00047	0,000182	0
599	1,1281	0,671048	0	0,244471	0,275787	0,164052	0	699	0,010311	0,004003	0	0,041225	0,000425	0,000165	0
600	1,12399	0,658341	0	0,243674	0,273887	0,16042	0	700	0,009577	0,003718	0	0,040133	0,000384	0,000149	0
601	1,1189	0,645545	0	0,242712	0,271571	0,156682	0	701	0,008894	0,003453	0	0,039042	0,000347	0,000135	0
602	1,1129	0,632718	0	0,241592	0,268868	0,15286	0	702	0,008258	0,003206	0	0,037941	0,000313	0,000122	0
603	1,1059	0,619815	0	0,240356	0,26581	0,148976	0	703	0,007666	0,002976	0	0,036836	0,000282	0,00011	0
604	1,098	0,606887	0	0,239047	0,262474	0,145075	0	704	0,007116	0,002763	0	0,035734	0,000254	9,87E-05	0
605	1,0891	0,593878	0	0,237709	0,258889	0,14117	0	705	0,006605	0,002565	0	0,034646	0,000229	8,89E-05	0
606	1,0792	0,580781	0	0,236354	0,255073	0,13727	0	706	0,006131	0,00238	0	0,033582	0,000206	7,99E-05	0
607	1,0684	0,567653	0	0,234963	0,251035	0,133378	0	707	0,00569	0,00221	0	0,032546	0,000185	7,19E-05	0
608	1,0567	0,55449	0	0,233518	0,246758	0,129483	0	708	0,005282	0,002051	0	0,03154	0,000167	6,47E-05	0
609	1,044	0,541228	0	0,231999	0,242207	0,125564	0	709	0,004903	0,001904	0	0,030566	0,00015	5,82E-05	0
610	1,03048	0,527963	0	0,230404	0,237426	0,121645	0	710	0,004553	0,001768	0	0,029625	0,000135	5,24E-05	0
611	1,016	0,514634	0	0,22874	0,2324	0,117717	0	711	0,004228	0,001642	0	0,028713	0,000121	4,72E-05	0
612	1,0008	0,501363	0	0,227017	0,227199	0,113818	0	712	0,003926	0,001525	0	0,027826	0,000109	4,24E-05	0
613	0,98479	0,488124	0	0,225243	0,221817	0,109947	0	713	0,003646	0,001417	0	0,026958	9,83E-05	3,82E-05	0
614	0,96808	0,474935	0	0,223424	0,216292	0,106112	0	714	0,003386	0,001316	0	0,026107	8,84E-05	3,44E-05	0
615	0,95074	0,461834	0	0,221564	0,21065	0,102326	0	715	0,003145	0,001222	0	0,025277	7,95E-05	3,09E-05	0
616	0,9328	0,448823	0	0,219668	0,204906	0,098592	0	716	0,002921	0,001136	0	0,024472	7,15E-05	2,78E-05	0
617	0,91434	0,435917	0	0,217741	0,199089	0,094917	0	717	0,002713	0,001055	0	0,023696	6,43E-05	2,5E-05	0
618	0,89539	0,423153	0	0,2158	0,193225	0,091316	0	718	0,00252	0,00098	0	0,022946	5,78E-05	2,25E-05	0
619	0,87603	0,410526	0	0,213866	0,187353	0,087798	0	719	0,002341	0,000911	0	0,022217	5,2E-05	2,02E-05	0
620	0,856297	0,398057	0	0,211961	0,181502	0,084373	0	720	0,002175	0,000846	0	0,021501	4,68E-05	1,82E-05	0
621	0,83635	0,385835	0	0,210099	0,175716	0,081064	0	721	0,002021	0,000786	0	0,020796	4,2E-05	1,64E-05	0
622	0,81629	0,373951	0	0,208259	0,169999	0,077879	0	722	0,001877	0,000731	0	0,020116	3,78E-05	1,47E-05	0
623	0,79605	0,362311	0	0,206408	0,164311	0,074784	0	723	0,001744	0,000679	0	0,019485	3,4E-05	1,32E-05	0
624	0,77561	0,350863	0	0,204517	0,158625	0,071757	0	724	0,001621	0,000631	0	0,018924	3,07E-05	1,19E-05	0
625	0,75493	0,339554	0	0,202558	0,152917	0,068779	0	725	0,001506	0,000586	0	0,018444	2,78E-05	1,08E-05	0
626	0,73399	0,328309	0	0,20053	0,147187	0,065836	0	726	0,001399	0,000545	0	0,018014	2,52E-05	9,82E-06	0
627	0,71278	0,317118	0	0,198436	0,141441	0,062928	0	727	0,0013	0,000507	0	0,017597	2,29E-05	8,92E-06	0
628	0,69129	0,305936	0	0,196278	0,135685	0,060049	0	728	0,001209	0,000471	0	0,017155	2,07E-05	8,08E-06	0
629	0,66952	0,294737	0	0,194058	0,129925	0,057196	0	729	0,001124	0,000438	0	0,016677	1,87E-05	7,31E-06	0
630	0,647467	0,283493	0	0,191769	0,124164	0,054365	0	730	0,001045	0,000407	0	0,016181	1,69E-05	6,59E-06	0
631	0,62511	0,272222	0	0,189406	0,118399	0,05156	0	731	0,000972	0,000379	0	0,015688	1,52E-05	5,95E-06	0
632	0,60252	0,26099	0	0,186962	0,112648	0,048795	0	732	0,000904	0,000353	0	0,015522	1,38E-05	5,37E-06	0
633	0,57989	0,249877	0	0,18443	0,106949	0,046085	0	733	0,00084	0,000328	0	0,014781	1,24E-05	4,85E-06	0
634	0,55737	0,238946	0	0,181802	0,101331	0,043441	0	734	0,000782	0,000305	0	0,014366	1,12E-05	4,38E-06	0
635	0,53511	0,228254	0	0,179067	0,09582	0,040873	0	735	0,000727	0,000284	0	0,01397	1,02E-05	3,97E-06	0
636	0,51324	0,217853	0	0,176216	0,090441	0,038389	0	736	0,000677	0,000264	0	0,013587	9,2E-06	3,59E-06	0
637	0,49186	0,207878	0	0,173255	0,085217	0,035999	0	737	0,00063	0,000246	0	0,013215	8,33E-06	3,25E-06	0
638	0,47108	0,198072	0	0,170207	0,080181	0,033713	0	738	0,000586	0,000229	0	0,012854	7,54E-06	2,95E-06	0
639	0,45096	0,188748	0	0,1671	0,075355	0,03154	0	739	0,000546	0,000213	0	0,0125	6,82E-06	2,67E-06	0
640	0,431567	0,179828	0	0,163959	0,070759	0,029484	0	740	0,000508	0,000199	0	0,012156	6,18E-06	2,42E-06	0
641	0,41287	0,171285	0	0,160797	0,066388	0,027542	0	741	0,000473	0,000185	0	0,011824	5,6E-06	2,19E-06	0
642	0,39475	0,163059	0	0,157611	0,062217	0,0257	0	742	0,000441	0,000172	0	0,011509	5,07E-06	1,98E-06	0
643	0,37721	0,155151	0	0,154395	0,058239	0,023955	0	743	0,000411	0,000161	0	0,011216	4,61E-06	1,8E-06	0
644	0,36019	0,147535	0	0,151147	0,054441	0,022299	0	744	0,000382	0,00015	0	0,010947	4,19E-06	1,64E-06	0
645	0,34369	0,140211	0	0,147873	0,050823	0,020733	0	745	0,000356	0,00014	0	0,010698	3,81E-06	1,49E-06	0
646	0,32769	0,13317	0	0,144594	0,047382	0,019256	0	746	0,000332	0,00013	0	0,010469	3,48E-06	1,36E-06	0
647	0,31217	0,1264	0	0,141328	0,044118	0,017864	0	747	0,00031	0,000121	0	0,010257	3,18E-06	1,24E-06	0
648	0,29711	0,119892	0	0,138095	0,041029	0,016556	0	748	0,000289	0,000113	0	0,010056	2,9E-06	1,14E-06	0
649	0,2825	0,11364	0	0,134903	0,03811	0,01533									

5.2 Mittaustulosten käsittely ja laskutoimitukset

Mittausdata käsiteltiin jokaisen valaisimen kohdalla erikseen. Mittausdatana käytettiin yhden nanometrin mittaustuloksia. Tällaisissa tapauksissa epätarkemman mittausdatan käyttö ei aiheuta merkittävää virhettä laskelmissa, joten laskennat voitaisiin suorittaa myös viiden nanometrin mittaustuloksilla [8]. Työssä päädyttiin kuitenkin käyttämään tarkempaa mittausdataa, koska data oli jo valmiiksi saatavilla. Mitattu spektrijakauma käsiteltiin laskennallisesti CIE 1964 -värinsovitusfunktioiden avulla, jolla mitattu spektri sovitettiin värijärjestelmän mukaisiksi $x(\lambda)$, $y(\lambda)$ ja $z(\lambda)$ arvoiksi. Itse värinsovitus on värinsovitusfunktion ja spektritehon tulo kullakin aallonpituudella. Kuvassa 20 on esitetty periaatekuva värinsovituksen laskennasta. Taulukossa 4 on esitetty värinsovitusfunktio ja samassa taulukossa esitetään laskettu värinsovitus mitatulle spektritehojakaumalle.



Kuva 20. Värinsovitusfunktion laskennan periaatekuva.

Kromaattisuukoordinaattien laskemiseksi täytyy ensin laskea värinsovituksella saaduista $x(\lambda)$, $y(\lambda)$ ja $z(\lambda)$ arvoista tristimulus XYZ-arvot. Tristimulus-arvot lasketaan kaavoilla 4, 5 ja 6. Integrointi voidaan suorittaa summausmenetelmällä, jolloin laskentakaavat muuttuvat kaavojen 7, 8 ja 9 mukaisiksi. [8]

$$X_{10} = k_{10} \int \phi_{\lambda}(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \quad (4)$$

$$Y_{10} = k_{10} \int \phi_{\lambda}(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \quad (5)$$

$$Z_{10} = k_{10} \int \phi_{\lambda}(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda \quad (6)$$

X_{10} , Y_{10} ja Z_{10} = laskettu tristimulus-arvo.

k_{10} = normalisointi kerroin

ϕ_{λ} = spektrin intensiteetti.

$x(\lambda)$, $y(\lambda)$ ja $z(\lambda)$ = värinsovitusfunktio

$\Delta\lambda$ = värinsovitusfunktion tarkkuus

$$X_{10} = k_{10} \sum_{\lambda} \phi_{\lambda}(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \quad (7)$$

$$Y_{10} = k_{10} \sum_{\lambda} \phi_{\lambda}(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \quad (8)$$

$$Z_{10} = k_{10} \sum_{\lambda} \phi_{\lambda}(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda \quad (9)$$

Normalisointikerroin k_{10} määritellään eri tavalla eri tapauksissa. Mitatun spektrin ollessa absoluuttinen, normalisointikerroin on K_m , joka on maksimaalinen spektrin valovoimakkuus (683 lm*W). Tässä työssä on mitattu suhteellinen spektri, jolloin normalisointikerroin voidaan määrittää tilanteeseen sopivaksi luvuksi [9]. Koska XYZ-tristimulus-arvot muunnetaan kaksiulotteiseksi xy-kromaattisuuskoordinaateiksi, ei normalisointikertoimella ole merkitystä. Kertoimeksi valitaan $k_{10} = 1$, jolloin sitä ei tarvitse ottaa laskennassa huomioon. XYZ-tristimulus-arvot muunnetaan xy-kromaattisuuskoordinaateiksi kaavoilla 10, 11 ja 12.

$$x_{10} = \frac{X_{10}}{X_{10} + Y_{10} + Z_{10}} \quad (10)$$

$$y_{10} = \frac{Y_{10}}{X_{10} + Y_{10} + Z_{10}} \quad (11)$$

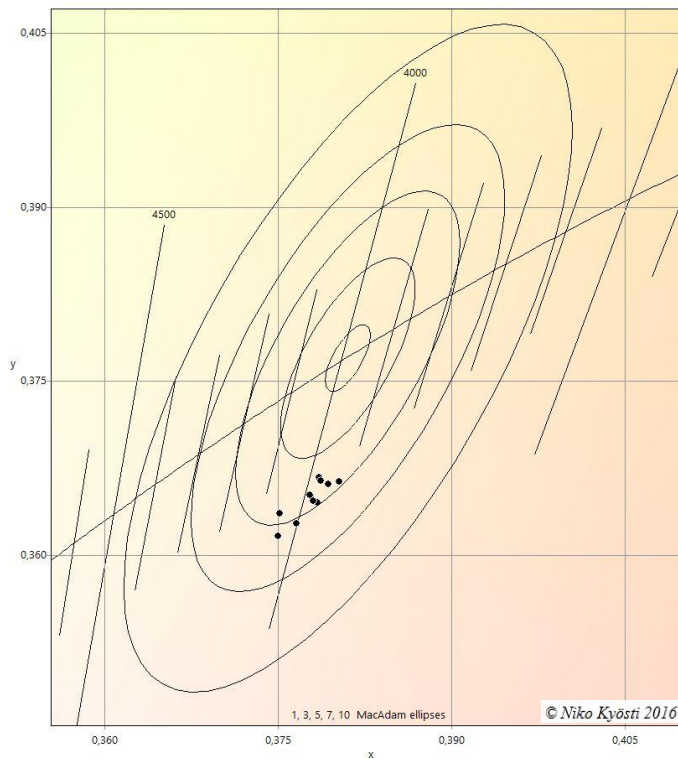
$$z_{10} = \frac{Z_{10}}{X_{10} + Y_{10} + Z_{10}} \quad (12)$$

Muunnettaessa XYZ-tristimulus-arvoja xy-värikoordinaatistoon, voidaan z arvo jättää laskematta, koska sillä ei ole käyttöä tässä tilanteessa. Muunnoksen jälkeen saamme tarvittavat xy-kromaattisuuskoordinaatit, jotka määrittävät valaisimen väripisteen CIE-väriagrammissa. Taulukossa 5 on esitetty lasketut ja mittalaitteesta suoraan saadut xy-värikoordinaatit.

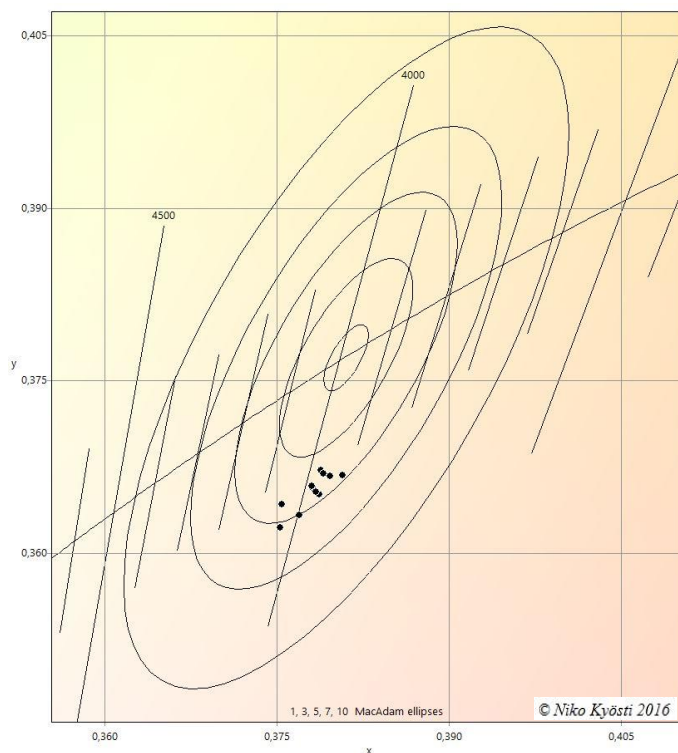
Taulukko 5. Mittarin antamat ja lasketut xy-värikoordinaatit mitatuille valaisimille.

	Mittarin antamat arvot		Lasketut arvot	
	x	y	x	y
Valaisin 1	0,3754	0,3642	0,3751	0,3636
Valaisin 2	0,3787	0,3651	0,3784	0,3645
Valaisin 3	0,3788	0,3672	0,3785	0,3667
Valaisin 4	0,3781	0,3657	0,3778	0,3651
Valaisin 5	0,3780	0,3658	0,3777	0,3652
Valaisin 6	0,3807	0,3668	0,3803	0,3663
Valaisin 7	0,3790	0,3669	0,3787	0,3664
Valaisin 8	0,3796	0,3667	0,3793	0,3661
Valaisin 9	0,3769	0,3633	0,3766	0,3627
Valaisin 10	0,3753	0,3622	0,3750	0,3616
Valaisin 11	0,3784	0,3653	0,3780	0,3647

Seuraavaksi lasketut xy-värikoordinaattipisteet sijoitettiin CIE 1964 -väriagrammiin. Tähän apuna käytettiin Osram Sylvanian ColorCalculator 6.35 -ohjelmistoa, jolla saa asetettua helposti mittaustulokset samaan väriagrammiin sekä määritettyä absoluuttisen 4000 K arvon referenssipisteeksi. Lisäksi ohjelmalla saadaan piirrettyä MacAdam-ellipsit absoluuttisen pisteen ympärille. Sijoitetut xy-koordinaattipisteet itse lasketuilla ja mittarin antamilla tuloksilla on esitetty kuvissa 21 ja 22.



Kuva 21. Sijoitetut xy-koordinaattipisteet lasketuilla tuloksilla. Kuvassa MacAdam ellipsit 1,3,5,7 ja 10.



Kuva 22. Sijoitetut xy-koordinaattipisteet mittarin antamalla tuloksilla. Kuvassa MacAdam ellipsit 1,3,5,7 ja 10.

Luvun 3 taulukossa numero 3 on esitetty mittalaitteen ominaisuudet. Mittalaitteen mitta-
virheeksi värikoordinaattimittauksessa annetaan $xy \pm 0.003$. Mittalaitteen suhteellinen
virhe värikoordinaattimittauksessa on:

$$\frac{\Delta xy}{xy} = \frac{0,003}{0,3754} \approx 0,8\% \quad (13)$$

Mittalaitteen virheen ollessa käytännössä mitätön voidaan virhe jättää huomioimatta,
koska virheen vaikutus lopputuloksiin on hyvin pieni. Suurin virhe tulee itse mittauksen
tekemisestä, koska mittalaite liikkuu helposti, eikä mittausta pysty suorittamaan joka
kerta täysin samalla tavalla. Tästä johtuvaa virhettä on todella vaikea arvioida, joten se
jätettiin huomioimatta.

Lopputuloksista todettiin, että mitattu valaisin täyttää määritelmän alle MacAdam 5
SDCM -arvon. Kaikki mitatut valaisimet eivät olleet MacAdam 5 ellipsin sisällä, mutta
11 mitatusta valaisimesta 10 on, joten voitiin jättää huomioimatta tämä yksittäinen ulko-
puolella ollut piste. Taulukon 4 laskettujen ja mitattujen xy-pisteiden välillä huomattiin
pieni ero, joka johtuu mitä todennäköisimmin mittarin sekä laskennassa käytetyn värin-
sovitusfunktion pyöristyseroista. Erot ovat luokkaa alle 1 %, joten todettiin tulosten ole-
van linjassa toisiinsa verrattuna.

6 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on edistää tietoutta LED-valaisimien värilämpötilan laadusta ja toimia oppaana MacAdam SDCM -arvon määrittämiselle. Lisäksi tavoitteena oli selvittää MacAdam SDCM -arvo Winledin valaisimille, tässä tapauksessa yhdelle valaisinmallille, joka oli Spectri 8W 4000 K. MacAdam SDCM -arvon selvittämistä varten tehtiin mittauksia, joissa mitattiin valaisimen spektritehojakauma. Teoria, mittaukset ja mittaustulosten käsittely on laadittu niin, että näitä on mahdollista käyttää oppaana selvittäessä MacAdam SDCM -arvoa valonlähteille.

Mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että Winledin Spectri 8W 4000 K valaisin alittaa arvon MacAdam 5 SDCM. Tämä kertoo sen, että valaisimesta voidaan hyvin todennäköisesti huomata väriero, kun valaisinta verrataan muihin saman CCT-värilämpötilan omaaviin valaisimiin. Tavoiteltava arvo olisi MacAdams 3 SDCM, jolloin värilämpötilan eroja ei käytännössä voi huomata, kuin todella hyvän värinerottelukyvyn omaavat ihmiset.

Työn suurimpana haasteena oli lähdemateriaalin keruu. Tästä aiheesta ei ole kerrottu tarkasti juuri missään julkaisussa. Monessa julkaisussa asiaa sivutaan, mutta pääaiheena MacAdam SDCM -arvon selvittäminen ei ole ollut yhdessäkään. Suurin osa materiaalista on englanninkielistä ja osittain haastavaa ymmärtää. Kuitenkin tätä työtä varten saatiin kerättyä tarvittava materiaali ja riittävä perehtyminen sekä syvä kiinnostus aiheita kohtaan auttoi lopulta asian ymmärtämisestä. Itse mittausten tekeminen ja lopulta mittaustulosten käsittely oli vaivatonta. Tosin, jos mittaukset haluttaisiin tehdä absoluuttisen tarkoin menetelmin, vaatisi mittausten tekeminen hyväksytyn tilan, jossa mittaukset suoritettaisiin.

MacAdams SDCM -arvo on hyvä tapa määrittää valonlähteen värilämpötilan laatu. MacAdam SDCM -arvon avulla suunnittelijoiden ja kuluttajien on helppoa vertailla eri valaisimien värilämpötilan yhteneväisyyttä. Joskus tulee tarve vaihtaa valaisimia tai päivittää rakennukseen osittain uudet valaisimet tällöin MacAdam SDCM -arvon merkitys korostuu. Kuka haluaisi asentaa valaisimet, jotka ovat kaikki hiukan erinäköisiä värilämpötilan osalta. MacAdam SDCM -arvon avulla voi varmistua siitä, että kaikkien valaisinten valon värilämpötila näyttää samalta siitä huolimatta, minkä valaisinvalmistajan valaisimia käytetään.

LED-yksiköiden valmistuseristä johtuvien erojen vuoksi olisi ensiarvoisen tärkeää tehdä jatkuvaa laadunvalvontaa myös MacAdam SDCM -arvon osalta. Jos toimitettavat LED-yksiköt eivät ole enää ominaisuuksiltaan samanlaisia, kuin aikaisemman erän yksiköt, voi MacAdam SDCM -arvo olla aivan jotain muuta. Valaisinvalmistajien vastuulle jää siis laadunvalvonta omaehtoisesti, koska ei ole tahoa, joka näitä asioita valvoisi. Tietysti hyvän liiketoiminnan mukaista on olla varma kaikista niistä ominaisuuksista, joita omalle tuotteelleen antaa. MacAdams SDCM -arvoa määritettäessä on myös tärkeää käyttää mitattavissa valaisimissa sitä virtalähdettä, joka on tarkoitettu juuri kyseiselle valaisimelle. Erilaisilla virtalähteillä on erilaisia ominaisuuksia, joten ne voivat vaikuttaa mittaustuloksiin. LED-yksiköiden valmistajat voivat myös ilmoittaa valmistamilleen yksiköille MacAdam SDCM -arvon, mutta tätä arvoa ei tulisi käyttää lopullisen tuotteen ominaisuuksissa, koska valaisinvalmistaja ei voi tietää millaisissa olosuhteissa ja millaisilla virtalähteillä mittaustulos on saavutettu.

MacAdam SDCM -arvon selvittämisestä valonlähteille ei löydy kovin paljon tietoa, ainakaan julkisesta levityksestä. Olisi mielenkiintoista tehdä erilaisia mittauksia liittyen MacAdam SDCM -arvoon ja tutkia arvon käyttäytymistä erilaisissa tilanteissa. Esimerkiksi erilaisten virtalähteiden vaikutusta sekä erilaisilla valmistusmenetelmillä tehtyjen LED-yksiköiden aiheuttamia eroja olisi mielenkiintoista selvittää. Lisäksi LED-yksiköiden ikääntymisestä johtuvia muutoksia ja muutosnopeutta olisi hyvä selvittää, jotta olisi kuva siitä, kuinka pitkään ikääntyvän LEDin MacAdam SDCM -arvo pysyy vielä alkuperäisen ilmoitetun arvon sisällä.

MacAdam SDCM -arvo on tänä päivänä vielä suhteellisen tuntematon käsite johtuen siitä, että LEDit valonlähteenä ovat myös suhteellisen uusia ja vasta LEDien kohdalla MacAdam SDCM -arvon merkitys on alkanut korostua. Tämän laatukriteerin merkitys ja ymmärrys tulee varmasti kasvamaan, kun kuluttajat sekä suunnittelijat alkavat ymmärtää paremmin LEDien ominaisuuksia sekä laatukriteereitä. Tulevaisuus näyttää, tuleeko tälle laatukriteerille jokin toisenlainen esitystapa. Loogista olisi, jos värilämpötilaa ja sen laatua voitaisiin kuvata tarkasti yhdellä termillä. Tulevaisuudessa MacAdam SDCM -arvon käyttö saattaa jopa jäädä turhaksi.

LEDit kehittyvät vielä kovaa vauhtia ja niiden valmistusmenetelmiä kehitetään jatkuvasti. Todennäköistä on, että tulevaisuudessa valmistusmenetelmästä saadaan kehitettyä sellainen, että värilämpötila on vakio jokaisella valmistuserällä, eivätkä laatuerot ole enää niin

suuria. Voisiko esimerkiksi jossain vaiheessa tilata valmistajilta suoraan tietyn xy-koordinaatin mukaisia LED-yksiköitä? Tai olisiko mahdollista valmistaa absoluuttisen värilämpötilan omaavia LED-yksiköitä? LEDien kehityksen kannalta elämme edelleen jännittäviä aikoja ja uusia menetelmiä sekä innovaatioita kehitetään jatkuvasti. Tulevaisuus näyttää kuinka tarkkaan värilämpötilaan LED-tekniikka kykenee.

LÄHTEET

- [1] DiLaura, D., Houser, K., Mistrick, R., Steffy, G., The Lighting Handbook, 10th Edition, Illuminating Engineering Society, 2011, 1328p
- [2] Fagerhult valaistustietoutta 2015 (viitattu 5.2.2016): <http://www.fagerhult.com/fi/Valaistustietoutta/>
- [3] Halonen, L., Lehtovaara, J., Valaistustekniikka, Otatieto Oy, Jyväskylä, 1992, 456s
- [4] Commission Internationale de l'Eclairage (viitattu 5.2.2016): www.cie.co.at
- [5] ANSI C78.344–2015 standardi
- [6] OSRAM LED Fundamentals Colorimetry (viitattu 5.2.2016): http://ledlight.osram-os.com/wp-content/uploads/2013/01/OSRAM-OS_LED-FUNDAMENTALS_Colorimetry_v1_07-11-11_SCRIPT.pdf
- [7] Ilmatieteen laitos Geofysiikan tutkimus (viitattu 5.2.2016): <http://www.geo.fmi.fi/oppimateriaali/envisat/valonsade/spektri.htm>
- [8] CIE 15:2004 3rd Edition Colorimetry
- [9] muokattu; Nuutinen, M., Aalto-yliopisto http://www.helsinki.fi/~msjnuuti/courses/t754100/luento2_vari-informaation_koodaus.pdf
- [10] Vatanen, A., Väriin vaikuttavat tekijät ja niiden ennustaminen värimalleilla, Joensuun yliopisto, Tietojenkäsittelytiede, 2013, 49s
- [11] Sähkömagneettinen Spektri (viitattu 5.2.2016): https://fi.wikipedia.org/wiki/sähkömagneettinen_spektri
- [12] Bridgelux (viitattu 5.2.2016): <http://i.bnet.com/blogs/bridgelux-chevron-led.jpg>
- [13] OSRAM ColorCalculator ohjelmisto
- [14] NASA Imagine the Universe! (viitattu 5.2.2016): <http://imagine.gsfc.nasa.gov/>
- [15] Winled Oy Ltd (viitattu 5.2.2016): www.winled.fi
- [16] Kallioharju, K. Valo ja valon biologiset vaikutukset ihmiseen, Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan koulutusohjelma, 2011, 80s
- [17] Ikääntyvä silmä (viitattu 5.2.2016): <http://www.tohtori.fi/>
- [18] Värilämpötila (viitattu 5.2.2016): <https://fi.wikipedia.org/wiki/värilämpötila>
- [19] Konica Minolta Measurement Fundamentals (viitattu 5.2.2016): <http://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/>

- [20] Light Emitting Diode. (viitattu 5.2.2016): https://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode
- [21] Konica Minolta CL-70F manual (viitattu 5.2.2016): <http://sensing.konicaminolta.us/products/cl-70f-illuminance-meter/support/CL-70FOperatingManual.pdf>
- [22] Public Lab (viitattu 25.2.2016): <https://publiclab.org/wiki/spectrometer>
- [23] Sateenkaari (viitattu 25.2.2016): <https://fi.wikipedia.org/wiki/Sateenkaari>
- [24] Artificial Lighting (viitattu 23.3.2016): <https://ideatoreality.files.wordpress.com/2010/04/fig-2-white-led-vs-rgb-led-spectrum.jpg>

LIITTEET

Liite 1. Winled Oy Spectri 8w valaisintietoarkki



Spectri 8W

Pieni ja siro Spectri 8W luo kauniin kapean valokeilan 36 asteen kulmassa koristamaan kotiasi tai vaikka toimistotilaa. Valaisimen spottimainen valokeila on omiaan korostamaan tilan sisustusta ja arkkitehtuuria. Tyylikkäällä Spectrillä on vain 65 millimetrin upotussyvyys ja lisäksi se on suunnattavissa. Spectristä löytyy 3000 Kelvinisen version lisäksi myös 4000 Kelvinin versio.



Tekniset tiedot

Jännite: 230V
 Nimellisteho: 8.5W
 Kehyksen väri: Valkoinen
 Valaisukulma: 36°
 Värilämpötila: 3000K/4000K
 Valovirta: 489lm/524lm
 Kotelointi: IP44
 Runkomateriaali: Alumiini
 Värintoistoindeksi: 85
 Mitat: 90mm*90mm*52mm
 Upotussyvyys: 65mm
 Asennusreikä: 83mm
 Käyttölämpötila: -20° – +40°
 Virtalähde: Ulkoinen, IP20
 Himmennettävyys: Kyllä
 Käyttöikä: 50 000h
 Tuotetakuu: 2 vuotta

MATERIAALIT

Valonjakotiedosto NV

Valonjakotiedosto LV

Mittakuva

Asennusohje

Winled Oy Ltd
 Puh. 0290 011 411
 Email myynti@winled.fi
 Fax: 06 830 2030

KOKKOLA
 Käynti : Levytie 1
 Posti : PL 501, 67101

TAMPERE
 Käynti: Rautatienkatu 21A
 Posti: PL 511, 33101

Laskutustiedot
 Y-tunnus 0806098-0