SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - **AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO**
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

STANDARDIEN MUKAISEN VALAISTUKSEN TODENTAMINEN JA LED-VALAISTUKSEN TAKAISINMAKSUAIKA

TEKIJÄ: Petrus Pesonen

SAVONIA-AMMATTIKORKEAKOULU

OPINNÄYTETYÖ
Tiivistelmä

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Sähkötekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä Petrus Pesonen	
Työn nimi Standardien mukaisen valaistuksen todentaminen ja led-valaistuksen takaisinmaksuaika	
Päiväys 11.11.2015	Sivumäärä/Liitteet 39/12
Ohjaajat Lehtori Jari Ijäs ja lehtori Heikki Laininen	
Toimeksiantaja Ovitor Oy	

Tiivistelmä

Opinnäytetyössä tutkittiin Ovitor Oy:n koneistamon valaistuksen toteutumista ja siitä aiheutuvia kustannuksia sekä valaistukselle syötettävän sähkön laatua. Tutkimustulosten pohjalta tehtiin elinkaarilaskenta nykyiselle loisteputkivalaistukselle ja vaihtoehtoiselle led-valaistukselle, jolloin vaihtoehtoiselle led-valaistukselle saatiin laskettua takaisinmaksuaika.

Työn suorittaminen jaettiin kolmeen osaan: valaistusvoimakkuusmittauksiin, sähkönlaatumittauksiin ja elinkaarilaskentaan. Valaistusvoimakkuusmittauksissa yhden kulkuväylän ja työpisteen valaistusvoimakkuudet mitattiin vähentämällä valaistusta vaiheittain, minkä jälkeen tuloksia verrattiin standardiin *SFS-EN 12464-1*. Sähkönlaatumittauksissa tutkittiin jännitteen, virran ja tehon harmonisia yliaaltoja. Mittaukset otettiin valaistusta syöttävästä jakokeskuksesta Fluke 435 -sähkönlaadun analysaattorilla standardien *SFS-EN 50160* ja *SFS-EN 61000-3-2* mukaisesti, jotta tuloksia pystyttiin vertailemaan standardeissa määritettyihin raja-arvoihin. Työn kolmannessa vaiheessa nykyiselle ja vaihtoehtoiselle led-valaistukselle tehtiin elinkaarilaskenta, jonka pohjalta saatiin laskettua investoinnille takaisinmaksuaika-arvio.

Mittaustuloksista voidaan todeta, että nykyisellä loisteputkivalaisulla koneistamo on ylivalaistu. Kulkuväylän valaistusvoimakkuudet olivat yli kaksinkertaiset standardin raja-arvoihin verrattuna ja valaistusta pystyttiin pudottamaan kolmannekseen alittamatta standardin mukaisia raja-arvoja. Työpiste oli myös nykyisellään ylivalaistu ja sen valaistusta saatiin vähennettyä kolmanneksella alittamatta standardin raja-arvoja. Sähkönlaatumittauksien tuloksista voidaan todeta, ettei valaistus aiheuta standardien raja-arvoja ylittäviä harmonisia yliaaltoja eikä niiden suodatukselle ole näin ollen välttämätöntä tarvetta. Mikäli koneistamossa siirrytään led-valaistukseen, voidaan loisteputkivalaistuksesta saatuja mittaustuloksia käyttää referenssinä led-valaistuksen sähkönlaatumittauksissa jolloin nähdään, vaikuttaako led-valaistus jännitteen suodatettavuuteen.

Elinkaarilaskennasta saaduista tuloksista voitiin todeta, että sähkön hinta on ratkaiseva kustannuksien muodostumisessa. Mikäli kaikki loisteputket vaihdetaan led-putkiin, asettuu investoinnin takaisinmaksuaika laskennassa käytetyillä sähkön hinnoilla 3 ja 4 sekä 8 ja 10 vuoden välille, joista jälkimmäinen vastaa enemmän yrityksen tilannetta. Vaikka työssä tutkitut led-putket kuluttavat puolet vähemmän sähköä loisteputkiin verrattuna, niihin uusimisen kannattavuutta tulee harkita suuren alkuinvestoinnin takia. Led-putkiin siirtyminen on kannattavampaa siinä vaiheessa, kun niiden ostohinnoissa tapahtuu merkittäviä muutoksia alaspäin.

Avainsanat
valaistusvoimakkuus, sähkönlaatu, loisteputkivalaistus, led-valaistus, harmoniset yliaallot

Julkinen

SAVONIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

THESIS
Abstract

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Electrical Engineering			
Author Petrus Pesonen			
Title of Thesis Ensuring Standardized Lighting and Calculating the Paypack-period for a Led-lighting			
Date	November 11, 2015	Pages/Appendices	39/12
Supervisors Mr. Jari Ijäs, Senior Lecturer and Mr. Heikki Laininen, Senior Lecturer			
Client Organisation Ovitor Oy			

Abstract

The purpose of this final project was to measure the strength, consumption and power quality of lighting in the factory premises of Ovitor Oy. These measurements made it possible to make life cycle calculations for the current fluorescent lighting and for the alternative led-lighting. A repayment-period was calculated for the alternative led-lighting from the results of the life cycle calculations.

Lighting was measured in one passageway and in one work station by gradually reducing lighting and by comparing the results to the recommendations of standard *SFS-EN 12464-1*. The power quality measurements were focused on voltage, current and power harmonics and conducted by a Fluke 435 power quality analyzer using procedures defined in the standards *SFS-EN 50160* and *SFS-EN 61000-3-2*. The results were compared to the limits defined in the standards mentioned above. Life cycle calculations were done for current lighting and for the alternative led-lighting. A payback-period was calculated for the alternative led-lighting. According to the results the passageway is lighted more than two times over the standard recommendations and by taking the lighting down to one third it would still be over the standard values. In addition, the lighting of the work station could be taken down by one third without going under the standard recommendations. The power quality measurements indicate that the lighting does not cause harmful harmonics in the power network and that there is no need for harmonic filtering. The results of the power quality measurements could be used as a reference value when measuring the power quality of the led-lighting.

The results of the life cycle calculations indicate that the price of electricity is the determining factor in the lighting costs. If every fluorescent lightbulb in the factory were to be replaced with a led-bulb, and with the two different electricity prices per kWh used in the calculations, the payback-period for the investment would be 3 - 4 and 8 - 10 years. Replacing the fluorescent lightbulbs is questionable because of the major cost of the investment.

Keywords
lighting strength, power quality, fluorescent lighting, led lighting, harmonics

public

ESIPUHE

Opinnäytetyö tuli ensimmäisen kerran puheeksi työhaastattelussa Helsingissä toukokuussa 2015. Työhaastattelua seurasi se, että pääsin töihin Ovitor Oy -nimiseen yritykseen Helsinkiin, vaikka osa opintoihin kuuluvista työharjoitteluista oli vielä tekemättä. Ovitor Oy tarjosi opinnäytetyön aiheen ja mahdollisuuden tehdä puuttuvat työharjoittelut. Aiheen sain Ovitor Oy:n tuotantopäällikkö Juha-Matti Lyhykäiseltä ja työhön liittyvää ohjausta ostopäällikkö Jukka Luotolalta. Yksi asia johti toiseen ja loppuvuodesta 2015 opinnäytetyö oli valmis.

Haluankin kiittää kaikkia mukana olleita Ovitor Oy:n työntekijöitä kaikenlaisesta avusta ja resursseista, jotka mahdollistivat opinnäytetyön tekemisen. Haluan myös kiittää lehtori Jari Ijästä tehokkaasta opinnäytetyön ohjauksesta ja todella mielenkiintoisista sähköpostianalyyseistä. Lopuksi haluan kiittää perhettäni tuesta koko opinnäytetyön teon aikana.

Helsingissä 13.10.2015

Petrus Pesonen

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO 7
2 OVITOR OY 8
3 STANDARDIT 9
3.1 SFS-EN ISO 50001 9
3.2 SFS-EN 50160 10
3.3 SFS-EN 12464-1 10
3.4 SFS-EN 61000-3-2 11
4 LYHENTEET JA MÄÄRITELMÄT 12
4.1 Teho, sähköteho P (W) 12
4.2 Valovoima I (cd) 12
4.3 Valovirta Φ (lm) 12
4.4 Valaistusvoimakkuus E (lx) 13
4.5 Valotehokkuus (lm / W) 13
4.6 Luminanssi L 13
4.7 Värilämpötila (K) 13
4.8 Häikäisy 14
4.9 Sähkönlaatu 14
4.10 Yliaallot 14
4.11 Harmoninen kokonaissärö (THD) 14
5 VALAISTUSTEKNIIKAT 15
5.1 Led 15
5.1.1 Ledin historia 15
5.1.2 Ledin tekniikka 15
5.1.3 Ledien vaikutukset sähkön laatuun 16
5.2 Loistelamppu 17
5.2.1 Loistelampun historiaa 18
5.2.2 Loisteputkilampun tekniikka 18
5.2.3 Loistelamppujen vaikutukset sähkön laatuun 19
6 VALAISTUSVOIMAKKUUSMITTAUKSET 20
6.1 Tavoitteet ja yleiskuvaus 20
6.2 Kulkuväylän mittaustulokset 21

6.3 Työpisteen mittaustulokset ... 23
7 SÄHKÖNLAATUMITTAUKSET ... 25
7.1 Tavoitteet ja yleiskuvaus ... 25
7.2 Jännitteen harmoniset yliaallot ... 26
7.3 Virran harmoniset yliaallot ... 28
7.4 Tehon harmoniset yliaallot ... 29
8 ELINKAARILASKENTA JA TAKAISINMAKSUAIKA ... 31
8.1 Tavoitteet ja parametrit ... 31
8.2 Tulokset ... 32
9 YHTEENVETO ... 35
LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT ... 37
LIITE 1: TESTO 540-LUKSIMITTARI ... 40
LIITE 2: MITTAUSPÖYTÄKIRJA, VALAISTUSVOIMAKKUUDET ... 41
LIITE 3: FLUKE 435 -SÄHKÖNLAADUN ANALYSAATTORI ... 42
LIITE 4: FLUKE 435 HARMONISTEN YLIAALTOJEN MITTAUSOMINAISUUDET ... 43
LIITE 5: FLUKE I400S-AC VIRTAPIHDIT ... 44
LIITE 6: FLUKE I400S-AC VIRTAPIHTIEN TEKNISET TIEDOT ... 45
LIITE 7: ELINKAARILASKENTATAULUKOT ... 46

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tavoitteena on tehdä Ovitor Oy:lle selvitystyö koneistamon valaistuksen kustannuksista ja toteutumisesta sekä valaistukselle syötettävän sähkön laadusta. Tutkimustulosten pohjalta tehdään elinkaarilaskenta nykyiselle loisteputkivalaistukselle ja vaihtoehtoiselle led-valaistukselle, jolloin voidaan laskea led-valaistukseen uusimisen takaisinmaksuaika.

Selvitystyön pääpaino on valaistusvoimakkuus- ja sähkönlaatumittauksissa. Valaistusvoimakkuusmittauksissa tutkitaan loisteputkivalaistuksen toteutumista vertaamalla tuloksia standardissa *SFS-EN 12464-1* määriteltyihin valaistusvoimakkuuksien minimivaatimuksiin. Mittauksien tavoitteena on varmistaa standardin mukaisen valaistuksen toteutuminen kulkuväylillä ja työpisteissä. Loisteputkivalaistuksen vaikutusta sähkön laatuun mitataan koneistamon valoja syöttävästä jakokeskuksesta. Mittausten tavoitteena on selvittää, ylittävätkö valaistuksen syötöstä mitattujen jännitteen, virran ja tehon harmonisten yliaaltojen arvot standardeissa *SFS-EN 50160* ja *SFS-EN 61000-3-2* määriteltyjä raja-arvoja.

Opinnäytetyön toimeksiantajana on Ovitor Oy ja työtä ohjaa Savonia-ammattikorkeakoulu Oy. Työ tehdään Ovitor Oy:n tiloissa Helsingissä ja työn suunnittelussa käytetään standardin *SFS-EN ISO 50001* mukaisia ohjeistuksia.

2 OVITOR OY

Ovitor Oy on perustettu Helsingissä vuonna 1953 nimellä Telemeca Oy. Yrityksen alkuvaiheessa liiketoiminta koostui lähinnä kierukkavaihteiden valmistuksesta ja myynnistä, kunnes 1950-luvun lopulla yritys aloitti ovikoneistojen valmistuksen. Vuonna 1966 Ovitor Ky perustettiin Telemecalle markkinointi- ja kokoonpanoyhtiöksi myymään ovikoneistoja Pohjoismaihin, kunnes vuonna 1976 Telemecan toiminta lopetettiin ja sen tuotanto siirrettiin kokonaisuudessaan Ovitor Oy:lle. Vuonna 1985 Brandt Group Oy Ltd osti Ovitor Oy:n, ja vuonna 2006 saksalainen perheyritys OWF GmbH & Co. KG osti Ovitor Oy:n. (Pirttilahti 2009, 1.)

Nykyisin Ovitor Oy on keskittynyt teollisuusporttien ja ovien automaation ja sähkökäyttöjen suunnitteluun ja valmistukseen (Ovitor Oy 2015). Yrityksen päätuotteita ovat nosto- ja pikarullaovissa käytettävät ovikoneistot, mutta yritys valmistaa myös liikennepuomeja ja porttikoneistoja. Lisäksi yritys valmistaa koneistojen ohjauskeskuksia sekä ylläpitää huoltopalvelua.

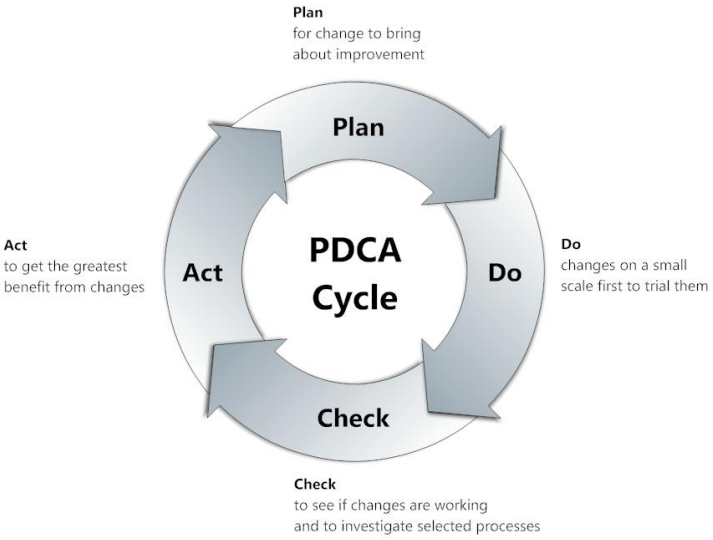
Ovitor Oy:n kiinteistö kattaa 4 500 m^2 alueen, josta noin 1 000 m^2 on toimistotiloja. Yrityksen palveluksessa työskentelee 54 henkilöä, ja yrityksen vuosittainen liikevaihto oli vuonna 2014 n. 8 miljoonaa €, josta viennin osuus oli 62 %. Ovitor Oy:llä on standardin *ISO 9001:2008* mukainen sertifioitu laatujärjestelmä, joka kattaa koko yritystoiminnan (MFZ-ANTRIEBE 2015).

3 STANDARDIT

3.1 SFS-EN ISO 50001

Standardissa *SFS-EN ISO 50001* määritellään energiankulutuksen ja -käytön kannalta oleelliset vaatimukset. Standardi sisältää ohjeistukset mittauksiin, dokumentointiin ja raportointiin sekä laitteiden suunnittelua tai hankintaa varten. Tämän lisäksi standardissa määritellään vaatimukset sellaiselle henkilöstölle, jolla on huomattava vaikutus energiatehokkuuteen työtehtävien kautta. Standardi itsessään ei velvoita yritystä toteuttamaan siinä mainittuja ohjeita vaan on lähinnä ohjeistus tehokkaampaan energiankäytön hallintaan yrityksessä. (Energiahallintajärjestelmät 2012, 12.)

Standardissa ohjeistetaan organisaatiota tekemään ja ylläpitämään energiatavoitteita ja –päämääriä, jotka koskevat yrityksen olennaisia toimintoja, hallinto- ja organisaatiotasoja sekä systeemejä ja kiinteistöä. Standardissa käytetään jatkuvan parantamisen mallia, jonka rakenne on jaettu neljään osaan: suunnittele, toteuta, arvioi ja toimi (Plan-Do-Check-Act eli PDCA). Kuvassa 1 on eritelty PDCA-mallin rakennetta ja siihen liittyviä osa-alueita. (Energiahallintajärjestelmät 2012, 8.)



KUVA 1. PDCA-malli (Smartdraw 2015-09-21.)

PDCA-malli voidaan toteuttaa standardin ohjeita soveltaen esimerkiksi seuraavalla tavalla:

- Suunnittele: Tee energiakatselmus ja määrittele energiantehokkuutta parantavat toimenpiteet ja tavoitteet.
- Toteuta: Suorita energiakatselmuksen pohjalta tehty toimenpidesuunnitelma.
- Arvioi: Analysoi prosesseja ja raportoi tulokset.
- Toimi: Tee tarvittavat toimenpiteet energiatehokkuuden jatkuvalle parantamiselle.

Standardia *SFS-EN ISO 50001* voidaan käyttää rekisteröinti- ja sertifiointitarkoituksessa ja halutessaan organisaatio voi integroida standardin vaatimukset esimerkiksi laatujärjestelmään (Energiahallintajärjestelmät 2012, 10).

3.2 SFS-EN 50160

Standardissa *SFS-EN 50160* määritellään, kuvataan ja spesifioidaan jännitteen pääominaisuudet verkon käyttäjän liittymiskohdassa yleisiin pien-, keski- ja suurjännitteisiin vaihtosähköjakeluverkkoihin normaaleissa käyttöolosuhteissa. Tämä standardi määrittelee rajat tai arvot, joiden sisällä kuluttaja voi olettaa liittymiskohdan jännitteen ominaisuuksien pysyvän eurooppalaisen yleisen jakeluverkon alueella. Standardin tarkoituksena on määrittää vaatimukset jakelujännitteen taajuudelle, suuruudelle, aaltomuodolle ja kolmivaiheisen jännitteen symmetrisyydelle. (Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet 2010, 6.)

Standardissa esitetään mittausmenetelmät harmonisille yliaaltojännitteille ja sallitut yliaaltojännitteiden arvot verkon käyttäjän liittämiskohdassa yleiseen pienjänniteverkkoon. Standardin mukaan normaaleissa käyttöolosuhteissa, kunkin viikon pituisen mittausjakson aikana, 95 % jakelujännitteen kunkin yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen 10 minuutin keskimääräisistä tehollisarvoista tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin taulukossa 1 annettu arvo. (Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet 2010, 22.)

TAULUKKO 1. Harmonisten yliaaltojännitteiden sallitut arvot liittämiskohdassa järjestyslukuun 25 saakka prosentteina perustaajuisesta jännitteestä (Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet 2010, 34. Muokattu.)

Parittomat yliaallot				**Parilliset yliaallot**	
Kolmella jaottomat		**Kolmella jaolliset**			
Järjestysluku h	**Suhteellinen jännite (Uh)**	**Järjestysluku h**	**Suhteellinen jännite (Uh)**	**Järjestysluku h**	**Suhteellinen jännite (Uh)**
5	6,0 %	**3**	5,0 %	**2**	2,0 %
7	5,0 %	**9**	1,5 %	**4**	1,0 %
11	3,5 %	**15**	0,5 %	**6...24**	0,5 %
13	3,0 %	**21**	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

Taulukkoa voidaan tulkita siten, että sarakkeessa ”kolmella jaolliset” oleva suhteellinen jännite U_h on suurin sallittu harmonisen yliaaltojännitteen prosentuaalinen arvo jännitteen ollessa perustaajuinen. Harmonisille yliaalloille, joiden järjestysluku on yli 25, ei määritellä arvoja, koska yleensä ne ovat hyvin arvaamattomia ja pieniä resonanssitilanteiden takia. THD:n eli jakelujännitteen kokonaissärökertoimen laskemisessa tulee ottaa huomioon kaikki järjestysluvultaan 40 asti olevat harmoniset yliaallot. Kokonaissärökertoimen arvon tulee olla 8 % tai alle. (Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet 2010, 22.)

3.3 SFS-EN 12464-1

Standardissa *SFS-EN 12464-1* käsitellään sisätyötiloihin liittyviä valaistusvaatimuksia normaalinäkökykyisten ihmisten näkötehokkuuden ja näkömukavuuden tarpeiden pohjalta. Se sisältää ohjeistukset yleisimpiin näkötehtäviin ja päätetyöskentelyyn. Standardissa määritellään useimpien sisätyöpaikkojen valaistusratkaisujen laadulliset ja määrälliset vaatimukset, sekä siinä tarjotaan suosituksia

kelvollisista valaistuskäytännöistä. Standardi ei rajoita uudenlaisen tekniikan soveltamista tai modernin laitteiston käyttöä vaan tarvittava valaistus on mahdollista luoda keinovalolla, päivänvalolla tai kummankin yhdistelmänä. (Valo ja valaistus 2010, 10.)

Standardin mukaan valaistuksessa on tärkeää se, että oikeanlaisen valaistusvoimakkuuden myötä valaistukseen liittyvät laadulliset ja määrälliset vaatimukset täytetään. Valaistusvaatimusten täyttyminen edellyttää kolmea perusasiaa, jotka määritellään standardissa seuraavasti:

- näkömukavuus, jolloin työntekijä kokee valaistuksen vaikuttavan positiivisesti hyvinvointiinsa; tämä johtaa epäsuorasti myös parempaan tuottavuuteen ja työn laatuun
- näkötehokkuus, jolloin työntekijät pystyvät suoriutumaan näkötehtävästään myös vaativissa olosuhteissa ja pitempien jaksojen aikana
- turvallisuus. (Valo ja valaistus 2010, 14.)

Standardin soveltamista valaistuksen suunnitteluun helpottaa siinä esitetyt tarkat valaistusvaatimustaulukot, joissa ilmaistaan esimerkiksi keskimääräinen ylläpidettävä valaistusvoimakkuus tila-, tehtävä- tai toimintakohtaisesti.

3.4 SFS-EN 61000-3-2

Standardi *SFS-EN 61000-3-2* määrittelee harmonisten yliaaltovirtojen raja-arvot sellaisille sähkö- ja elektroniikkalaitteille, joiden syöttövirta on 16 A tai alle yhtä vaihetta kohti ja jotka on tarkoitus yhdistää yleiseen pienjännitteiseen vaihtosähköjakeluverkkoon (Electromagnetic Compatibility (EMC) 2014, 7).

Standardissa *SFS-EN 61000-3-2* sähkölaitteet jaotellaan neljään eri ryhmään, A, B, C ja D. Ryhmään A kuuluvat symmetriset kolmivaiheiset laitteet, kiinteät työkalut, hehkulamppujen himmentimet, äänentoistolaitteet ja ryhmään D kuulumattomat kodinkoneet. Ryhmään kuuluvat myös ne laitteet, joita ei ole eritelty muissa ryhmissä. Ryhmään B kuuluvat liikuteltavat työkalut ja valokaarihitsauslaitteet, joita ei ole tarkoitettu ammattikäyttöön. Ryhmään C kuuluvat pelkästään valaistuslaitteet ja ryhmään D henkilökohtaiset tietokoneet ja niiden näytöt. Ryhmään D voidaan laskea myös televisiovastaanottimet ja laitteet, joiden teho on pienempi tai yhtä suuri kuin 600 W. (Electromagnetic Compatibility (EMC) 2014, 12 - 13.)

Led- ja loisteputkivalaisimet kuuluvat luokkaan C, joka on jaettu kahteen osioon: sähköteholtaan yli 25 W valaisimet ja valaisimet, joiden sähköteho on 25 W tai alle. Valaisimille asetettujen harmonisten yliaaltovirtojen sallitut arvot suhteessa perustaajuiseen virtaan on esitetty taulukossa 2. (Electromagnetic Compatibility (EMC) 2014, 19 - 20.)

TAULUKKO 2. Harmonisten yliaaltovirtojen sallitut arvot prosentteina perustaajuisesta virrasta yli 25 W valaisulaitteille (Electromagnetic Compatibility (EMC) 2014, 21. Muokattu.)

Järjestysluku h	2	3	5	7	9	11 ≤ h ≤ 39 (Vain parittomat yliaallot)
Suhteellinen virta Ih	2,0 %	30 * λ %	10,0 %	7,0 %	5,0 %	3,0 %

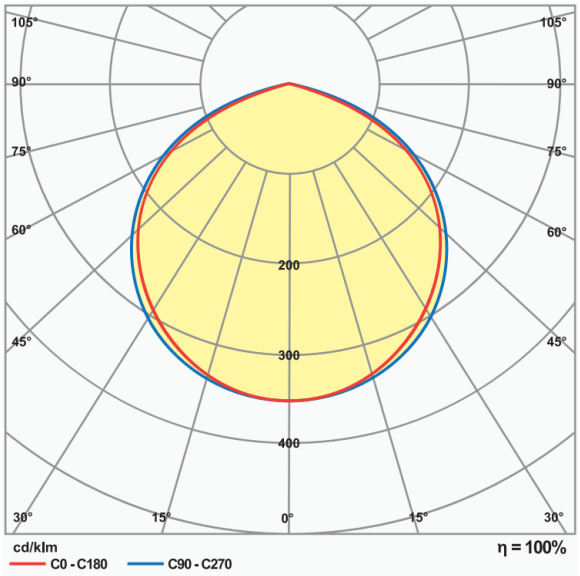
4 LYHENTEET JA MÄÄRITELMÄT

4.1 Teho, sähköteho P (W)

Lampun wattilukema kertoo lampun sähkötehon kulutuksen. Vanhemmissa lampuissa suurin osa niiden käyttämästä sähkötehosta muuttuu valon sijaan lämpöenergiaksi. Lamppua valittaessa tulisi sähkötehon sijaan keskittyä enemmän valaisimen valotehokkuuteen, joka kertoo, kuinka paljon valaisimen ottamasta tehosta kuluu valaisuun lämmön tuottamisen sijaan. (Limic Oy 2015.)

4.2 Valovoima I (cd)

Valovoimalla kuvataan valonlähteen intensiteettiä eli sitä, kuinka paljon lamppu valaisee määräsuuntaan (Limic Oy 2015). Valovoimaa käytetään ilmaisemaan lamppujen ja valaisimien valonjakoominaisuuksia ja se kuvataan yleensä valonjakokäyrällä, kuten esimerkiksi kuvassa 2.



KUVA 2. Valonjakokäyrä (Valtavalo 2015-10-05, 4.)

Valonjakokäyrä on kuvaaja, joka on piirretty napakoordinaatistoon. Kuvaajan tarkoituksena on kertoa, mikä on lampun tai valaisimen valovoima eri suunnissa. Napakoordinaatiston arvot skaalataan siten, että ne vastaavat 1 000 lm valonlähdettä. Tällä tavoin samaa valonjakokäyrää voidaan käyttää eritehoisille, mutta samantyyppisille valaisimille. (Ensto 2008b.)

4.3 Valovirta Φ (lm)

Valovirran tarkoituksena on ilmaista valonlähteeltä tulevan näkyvän valon säteilytehoa. Valovirran yksikkö on lumen, ja sitä käytetään lamppujen valontuoton ilmaisemisessa sekä valaisimien hyötysuhteen arvioimisessa. Taulukossa 3 on esitetty esimerkiksi kolmen erilaisen lampun valovirrat suhteessa sähkötehoon. (Ensto 2008a.)

TAULUKKO 3. Kolmen eri lampun sähköisiä ominaisuuksia (Ensto 2008a. Muokattu.)

Lampputyyppi	Sähköteho (W)	Valovirta (lm)	Valotehokkuus (lm / W)
Hehkulamppu	75	920	12
Halogeenilamppu	50	1000	20
Energiansäästölamppu TC-DSE/827	15	875	58

4.4 Valaistusvoimakkuus E (lx)

Valaistusvoimakkuutta käytetään kuvaamaan valonlähteen antamaa valaistuksen voimakkuutta, joka kohdistuu valaistavalle pinnalle. Valaistusvoimakkuuden yksikkö on luksi, joka tarkoittaa yhden lumenin valovirran jakautumista yhden neliömetrin alalle. Valaistusvoimakkuus saadaan jakamalla valaistusvirta valaistavan pinnan alalla. (Staples Finland Oy 2015.)

4.5 Valotehokkuus (lm / W)

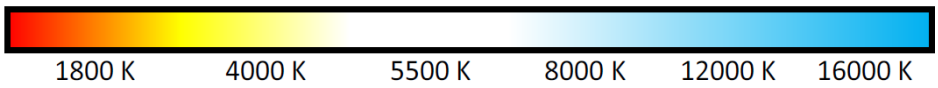
Valotehokkuus eli valaisimen käyttöhyötysuhde kuvastaa valovirran ja tehon suhdetta. Käytännössä valotehokkuus ilmaisee, kuinka paljon sähkötehosta kuluu valaisuun lämmön tuottamisen sijaan. Hehkulampuissa suurin osa niiden ottamasta tehosta kuluu lämpöenergian tuottamiseen, jolloin valotehokkuudeksi muodostuu 75 W hehkulampulla 12 lm / W. Taulukosta 3 voidaan nähdä, että vastaavasti 50 W halogeenilampun valotehokkuus on 20 lm / W. (Staples Finland Oy 2015.)

4.6 Luminanssi L

Luminanssilla eli valotiheydellä tarkoitetaan valaistavasta pinnasta heijastuvan valovoiman suhdetta pinnan suunnasta tulevan projektion pinta-alaan. Sitä käytetään ilmaisemaan valaistavan kohteen pintakirkkautta. Luminanssi syntyy valaistavan pinnan heijastumissuhteen ja valaistusvoimakkuuden yhteisvaikutuksena. Esimerkiksi kiiltävällä peilipinnalla luminanssi vaihtelee katselusuunnan ja tulevan valon suunnan mukaan. (Ensto 2009.)

4.7 Värilämpötila (K)

Värilämpötilaa käytetään kuvaamaan lampun valon sävyä ja sen yksikkönä käytetään kelviniä. Kuvan 3 Kelvin-asteikkoa tulkitaan siten, että alempana asteikossa oltaessa valo on lämpimämpi ja vastaavasti korkeammalla asteikossa oltaessa valo muuttuu kylmemmäksi. (Staples Finland Oy 2015.) Standardissa *SFS-EN 12464-1* on määritelty värivaikutelmat siten, että lämmin vaikutelma on alle 3 300 K, neutraali vaikutelma 3 300 K – 5 300 K ja kylmä vaikutelma yli 5 300 K. (Valo ja valaistus 2010, 28).



KUVA 3. Kelvin-asteikko (Pesonen 2015-08-18.)

4.8 Häikäisy

Häikäisyä on kahdenlaista. Esimerkiksi estohäikäisy on sellaista, jossa luminanssi on liian korkea ja estää näkemisen. Kiusahäikäisyä taas voivat aiheuttaa sellaiset näkökentässä olevat valolähteet, jotka ovat suuriluminanssisia. Suuret luminanssierot heikentävät näkemistä ja aiheuttavat häikäisyä, koska ihmisen silmä yrittää sopeutua sen näkökentässä olevaan keskimääräiseen luminanssiin. Lamput tulisi asentaa suuren luminanssin takia näkökentän ulkopuolelle, etteivät ne aiheuttaisi häikäisyä. Taulukossa 5 on esimerkkejä luminanssin aiheuttajista ja niiden voimakkuuksista. (Ensto 2009.)

TAULUKKO 5. Häikäisyä aiheuttavia suuriluminanssisia kohteita (Ensto 2009. Muokattu.)

Häikäisyn aiheuttaja	Luminanssi (cd / m^2)
Aurinko keskipäivällä	$16 * 10^9$
Auringonlasku	$6 * 10^6$
Kirkas taivas	8000
Pilvinen taivas	2000
Hehkulamppu 60 W kirkas	$5 * 10^6$
Loistelamput	n. 10 000 - 40 000

4.9 Sähkönlaatu

Sähkönlaadulla tarkoitetaan sähköverkon kykyä ylläpitää virheetöntä ja vakaata jännitettä, joka on mahdollisimman vapaa häiriöstä, noudattaa sini-aaltomaista rakennetta ja pysyy standardissa *SFS-EN 50160* määriteltyjen jännitteen ja taajuuden rajojen sisällä. (Comsys Ab 2015.)

4.10 Yliaallot

Sähkölaitteiden toiminta pohjautuu siniaaltomuotoiseen jännitteeseen. Toimiakseen oikein osa laitteista edellyttää virheetöntä jännitettä ja yksi monista sähkön laatuun negatiivisesti vaikuttavista tekijöistä ovat yliaallot. Yliaaltoja aiheuttavat sähkönjakeluverkkoon jännitteen tai virran suhteen epälineaariset osat virtapiirissä. Epälineaaristen kuormien aiheuttamat sähkövirran yliaallot voivat olla harmonisia eli virran perustaajuuden monikertoja tai epäharmonisia, joiden taajuus sijoittuu harmonisten yliaaltojen välille. Yliaallot ovat usein harmittomia niiden aiheuttajalle, mutta kulkeutuessaan sähköverkossa muille käyttäjille ne voivat aiheuttaa ongelmia. Purkaus- ja loistelamput ovat esimerkiksi yliaaltoja aiheuttavia epälineaarisia kuormia sähköverkossa ja tarvitsevat yliaaltosuodatinta tai virran rajoitinta. (Korpinen, Mikkola, Keikko, Falck 2008, 3.)

4.11 Harmoninen kokonaissärö (THD)

Total Harmonic Distorsion eli harmoninen kokonaissärö esittää jännitteen tai virran harmonisten aaltomuotojen kerrannaisten summaa verrattuna alkuperäiseen puhtaaseen jännitteen tai virran siniaaltoon. THD:n arvo esitetään prosentteina, josta voidaan nähdä kuinka paljon säröjen määrä vaikuttaa alkuperäiseen aaltoon. Täysin puhtaan siniaallon THD:n arvo on nolla. (Associated Power Technologies 2015.)

5 VALAISTUSTEKNIIKAT

5.1 Led

Led tulee sanoista Light Emitting Diode. Se on puolijohdekomponentti, joka tuottaa valoa, kun sähkövirtaa syötetään sen läpi. Sen toiminta perustuu elektroluminesenssi-ilmiöön, ja se pystyy emittoimaan näkyvää valoa sekä infrapuna- ja ultraviolettisäteilyä. Ledille tyypillisiä ominaisuuksia ovat alhainen energiankulutus, pieni koko, pitkä käyttöikä ja nopea syttyvyys. Näiden ominaisuuksiensa ansiosta led on monipuolinen käytettävyydeltään, mikä on myös osasyy sen nopeasti kasvaneeseen suosioon yleisvalaistussektorilla. (History of Lighting 2015.)

5.1.1 Ledin historia

Ledin historia sai alkunsa vuonna 1907 englantilaisesta tutkijasta nimeltä Henry Joseph Round. Hän havaitsi, että kun piikarbidin läpi johdetaan 10 voltin jännite, alkaa se säteillä kellertävää valoa. Saman havainnon teki myös venäläinen fyysikko Oleg Losev, joka julkaisi 20 vuotta myöhemmin kirjoituksen valoa emittoivasta diodista. (History of Lighting 2015.)

Toisen maailmansodan seurauksena ledin kehitys pysähtyi useiksi vuosiksi, kunnes vuonna 1955 Robin Braunstein raportoi, että jotkin yksinkertaiset diodit emittoivat infrapunasäteilyä, kun niiden läpi syötetään sähköä. Vuonna 1961 Gary Pittman ja Bob Biard, jotka työskentelivät Texas Instrumentsille, havaitsivat että gallium-arsenididiodi emittoi infrapunasäteilyä aina, kun sen läpi johdetaan sähkövirta. Tämän havainnon seurauksena Pittman ja Biard saivat patentin infrapunaledille. (History of Lighting 2015.)

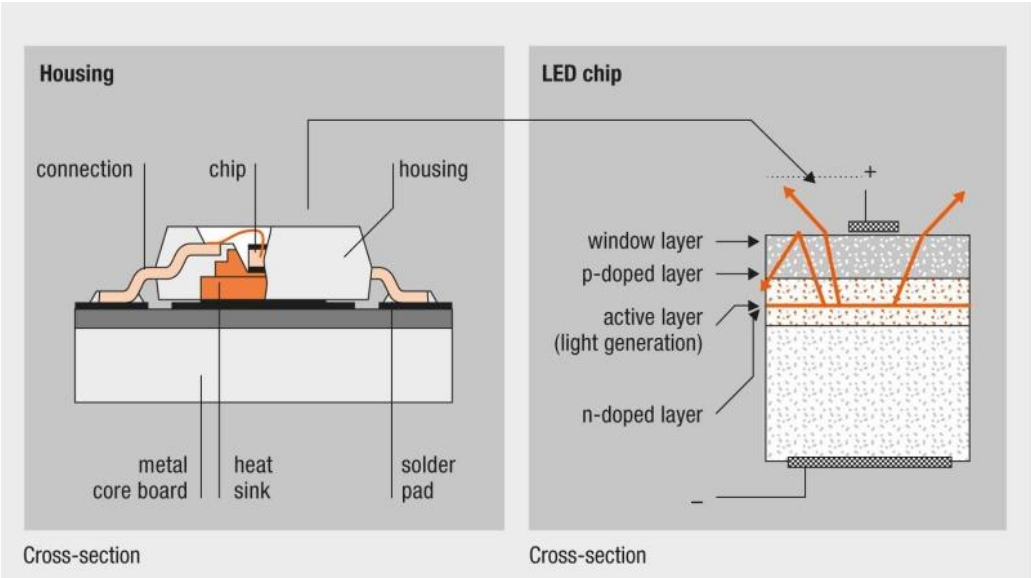
Vuonna 1979 eli 18 vuotta infrapunaledin keksimisen jälkeen Shuji Nakamura kehitti ensimmäisen kirkkaan sinisen ledin, mutta se oli liian kallis kaupalliseen käyttöön aina vuoteen 1994 asti. Vuonna 1995 hän esitteli ensimmäisen valkoisen ledin, joka lanseerattiin markkinoille kaksi vuotta myöhemmin. (History of Lighting 2015.)

Vasta vuonna 2006 kehitettiin ensimmäiset valodiodit, joiden valovoimakkuus ylti yli 100 lumeniin wattia kohden. Neljä vuotta myöhemmin laboratorio-olosuhteissa kehitettiin ledi, joka antoi valovoimakkuudeltaan 250 lumenia wattia kohden. Lediteknologian kehitys jatkuu edelleen ja tulevaisuudessa painopisteen odotetaan siirtyvän yhä enemmän OLED (Organic Light-Emitting Diode) -teknologiaa kohti. (Osram GmbH 2015a.)

5.1.2 Ledin tekniikka

Ledi eli valodiodi koostuu monista kerroksista puolijohtavaa materiaalia. Kuvassa 4 on esitetty ledin aktiivinen eli tasavirralla valoa muodostava kerros, joka on p- ja n-tyypin puolijohdekerrosten rajapinta. P-tyypin puolijohdekerroksen valenssivyöllä on ylimääräisiä aukkoja eli toisin sanoen tyhjiä elektronitiloja ja n-tyypin kerroksessa ylimääräisiä elektroneja. Ylimääräiset elektronit liikkuvat negatiivisesti varatulta alueelta täyttääkseen tyhjät elektronitilat ja muodostavat näin ollen rajapinnalle

niin sanotun tyhjennystilan, joka toimii samalla eristeenä. Kun diodiin kytketään tarpeeksi suuri kynnysjännite, tyhjennystila häviää ja sähkökenttä pakottaa elektronit liikkumaan vapaasti p-tyypin puolijohdekerroksen matalamman energian aukkoihin. Tämän reaktion seurauksena energia muuttuu fotoneiksi ja lämmöksi. (HowStuffWorks 2015.)



KUVA 4. Ledin poikkileikkaus (Osram GmbH 2015-08-21.)

Ledissä käytettävä puolijohdemateriaali määrittää sen värin. Puolijohdemateriaalissa käytetäänkin pääasiassa kahdenlaista materiaalijärjestelmää, joilla tehdään erivärisiä ledejä aina sinisestä punaiseen ja luminesenssikonversiota käyttämällä valkoiseen. Ledit loistavat kideyhdisteiden koostumuksen vuoksi sinistä, vihreää, punaista tai keltaista valoa, kun niiden läpi johdetaan sähkövirta. Luminesenssikonversio eli valkoisen valon tuottaminen sinisillä ledeillä johtuu ylimääräisestä kellertävästä fluoresoivasta kerroksesta. Valkoista valoa voi tuottaa myös yhdistämällä punainen, vihreä ja sininen valodiodi. Näitä kolmea RGB-väriä muuntelemalla voidaan tuottaa kaikki värisävyt, jolloin saadaan aikaiseksi monenlaisia eri valaistusratkaisuja. (Osram GmbH 2015c.)

Ledit eivät säteillessään tuota lämpöä, vaan led-valaisimen taustalla toimiva elektroniikka tuottaa ja ohjaa sen pois ledistä valaisinrakenteen kautta. Ledin käyttöikä riippuu paljolti siitä, kuinka tehokkaasti lämpöä johdetaan pois ledistä. Useimmat led-komponenttivalmistajat ovat kehottaneet välttämään ledin altistamista sellaisille lämpötiloille, joissa ledin sisäisen Tj-pisteen ennalta määritetty maksimilämpötila ylittyy. Tj-pisteen arvo riippuu usein valmistajasta, mutta keskimääräisesti se on 120 °C:n ja 150 °C:n välillä. Yleisesti voidaan todeta, että jokainen + 1 °C:n ylitys ledin Tj pisteestä puolittaa sen eliniän. (Cariitti Oy 2015.)

5.1.3 Ledien vaikutukset sähkön laatuun

Led-lamppuja valittaessa tulee huomioida niiden vaikutukset sähköverkkoon. Tony Katajisto tutki kuutta E27-kannalla olevaa led-lamppua opinnäytetyössään ja havaitsi, että käynnistyshetkellä osa led-lampuista otti paljon virtaa verkosta. Vaikka käynnistysvirtapiikit olivat lyhytkestoisia, voisivat

lamput suurina määrinä Katajiston mukaan laukaista johdonsuojakatkaisijan. Tämän lisäksi Katajisto havaitsi, että joidenkin led-lamppujen verkosta ottama virta oli säröytynyttä. ”Säröytyneen virran yhteydessä esiintyy virran yliaaltoja, jotka suurilla led-lamppukuormilla voivat aiheuttaa säröä myös syöttävän verkon jännitteeseen. Yliaaltojen aiheuttamia haittoja ovat muun muassa sähköverkon häviöiden kasvu, suojareleiden virhetoiminnat ja sähkömittareiden virhenäyttämät. Lisäksi led-lamput tuottavat myös loistehoa, joka muun muassa alentaa verkon pätötehon siirtokapasiteettia.”, Katajisto kirjoittaa. Katajisto kehottaa opinnäytetyössään kiinnittämään huomiota yliaaltojen suodatuksen tarpeellisuuteen uusittaessa suurien tilojen valaistusta led-valaistukseen. (Katajisto 2015, 40 - 41.)

Katajiston tutkimustuloksia vahvistaa Turvallisuus- ja kemikaaliviraston ohje ”Led-valoputkiasennuksissa huomioitavaa”. Ohjeen mukaan led-putkien niin sanottu retrofit-asennus eli led-putkien vaihtaminen vanhojen loisteputkien tilalle samaan valaisimeen voi aiheuttaa sen, että valaisimet synnyttävät verkkoon merkittävässä määrin loistehoa. Tämä voi johtaa huomattavaan kokonaisvirran kasvuun ja saada siten aikaan lisälämpenemistä valaisinryhmän johtimissa. Useimmiten kompensointikondensaattorien poistaminen valaisimista parantaa tilannetta (tehokerrointa), mutta tällöin valaisinmuutoksiin liittyviä seikkoja ei voi jättää huomiotta. Etenkin suurien valaisinryhmien kohdalla tulee varmistua siitä, ettei led-valoputkien vaihtaminen muuta valaisinasennusten turvallisuuteen ja että keskitettyihin kompensointilaitteisiin kohdistuvat muutokset selvitetään. Lisäksi uudesta asennuksesta tulee selvittää, ettei se aiheuta haitallista 3. yliaaltovirtaa nollajohtimeen. Led-valoputkien valmistajien antamia lisäohjeita mm. yksittäiseen ryhmään liitettävien led-valoputkien suurimman määrän suhteen tulee noudattaa asennuksissa. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2014, 5.)

Led-valaistuksen vaikutusta sähkönlaatuun selvitti myös Katerina Zaitseva. Zaitseva tutki koulurakennuksen luokkahuoneeseen uusitun led-valaistuksen sähkönlaatua vertaamalla tutkimustuloksia standardeissa määriteltyihin arvoihin. Yhteenvedossa Zaitseva toteaa, ettei led-valaistus ylitä yhtäkään standardissa määritettyä arvoa saatikka huononna rakennuksen sähköverkon jännitteen laatua merkittävästi. (Zaitseva 2012, 63 - 64.) Zaitsevan tutkimuksen pohjalta voidaan todeta, että mikäli led-valaisimista saadut sähkön laatuun liittyvät mittaustulokset ovat standardien mukaiset, eivät ne todennäköisesti aiheuta ylimääräisiä toimenpiteitä yliaaltojen suodatuksessa.

5.2 Loistelamppu

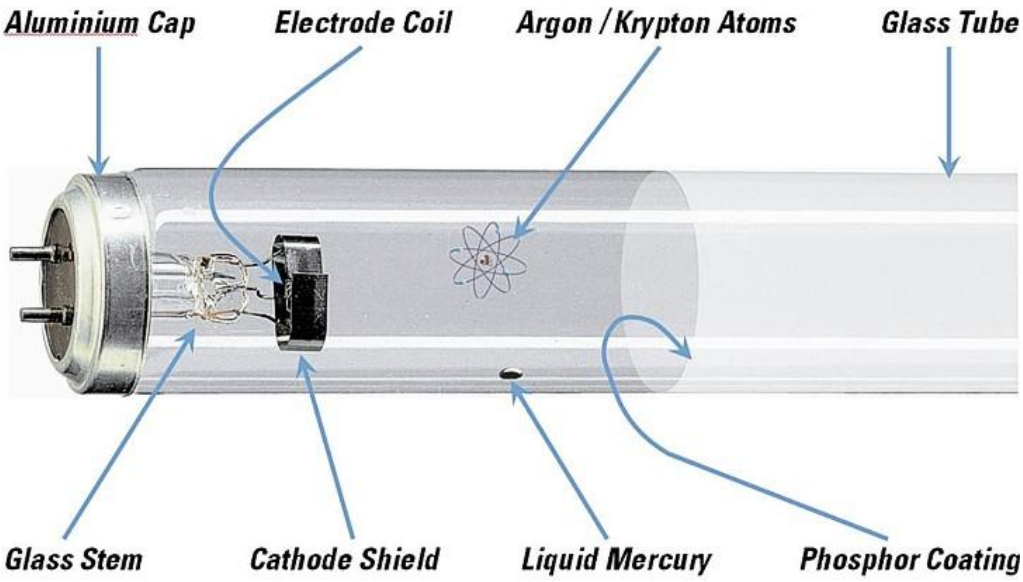
Purkaus- eli loisteputkilamput ovat yksi eniten käytetyistä keinovalonlähteistä maailmalla. Loisteputkilamppujen valon tuottaminen perustuu pienpainekaasupurkausperiaatteeseen, jossa sähkövirta johdetaan lasiputken sisällä olevan elohopean ja jalokaasuseoksen lävitse. (HowStuffWorks 2015.) Lamppujen energiankulutus on pieni verrattuna niiden tuottamaan valon määrään ja niiden hyötypolttoikä voi saavuttaa jopa 90 000 tuntia tehden niistä erinomaisia yksityis- ja ammattisektorikäyttöön. (Osram GmbH 2015b.)

5.2.1 Loistelampun historiaa

Loistelampun historia sai alkunsa vuonna 1857, jolloin ranskalainen fyysikko Alexandre E. Becquerel pinnoitti sähkövarauksen purkamiseen tarkoitettuja putkia luminesoivilla materiaaleilla. Nämä kokeilut aloittivat laajan tutkimuksen, ja vuonna 1901 amerikkalainen Peter Cooper Hewitt patentoi elohopeahöyrylampun, jota voidaan pitää loistelampun prototyyppinä. Ensimmäisen moderneja loisteputkivaloja muistuttavan kokeellisen loistelampun patentoivat saksalaiset Edmund Germer, Friedrich Meyer ja Hans Spanner vuonna 1927 Berliinissä. Myöhemmin vuonna 1936 General Electric -yrityksen tutkijat George Inman ja Richard Thayer patentoivat loisteputkivalon, joka kehitettiin saksalaisilta ostetun kokeellisen loistelampun patentin pohjalta. Kaksi vuotta myöhemmin loisteputket esiteltiin kaupalliseen tarkoitukseen ensimmäistä kertaa maailmassa. (About 2015.)

5.2.2 Loisteputkilampun tekniikka

Loistelamput perustuvat toiminnaltaan pienpainekaasupurkausperiaatteeseen. Loistelampun lasiputken sisällä on matalapaineista jalokaasua ja pieni määrä elohopeaa. Putken molemmissa päissä on elektrodit ja sen seinämä on pinnoitettu fluoresoivalla loisteaineella. Kun loistelamppuun kytketään sähkövirta, elektrodien väliin muodostuu kaasupurkauksen aiheuttava sähkökenttä. Tämän kaasupurkauksen seurauksena elohopeahöyry alkaa säteillä UV-säteitä, jotka muodostavat näkyvää valoa osuessaan fluoresoivaan loisteaineeseen. Erivärisiä loistelamppuja saadaan aikaiseksi käyttämällä pinnoitteena erilaisia fluoresoivia yhdistelmiä. (Osram GmbH 2015d.)



KUVA 5. Loisteputkilampun poikkileikkaus (Lamp Technology 2015-08-31.)

Normaalilla käyttöjännitteellä loistelamput vaativat katodien esihehkutuksen syttyäkseen. Tämä tarkoittaa sitä, että loistelampussa olevat katodit saatetaan haluttuun lämpötilaan, jolloin katodien läheisyydessä sijaitsevat kaasuatomit ionisoituvat. Esihehkutus saadaan aikaan joko erillisellä hehkutusmuuntajalla tai sytyttimellä, joka on katodien kautta kulkevaan sytytyspiiriin kytketty rele. Esihehkutuksen alettua piiri on suljettuna noin 1 – 2 sekuntia, minkä jälkeen piiri aukaistaan ja katodi-

en välille muodostuu jännite ja lamppu syttyy. Jos lamppu ei syty, niin sytytin toimii uudelleen. Sytyttämisyritysten määrää voidaan halutessa rajoittaa asentamalla erillinen piiri, jottei lamppu jäisi vilkkumaan.

Suoraan jännitelähteeseen kytkettynä loistelampun ottama virta suurenee niin kauan, kunnes lamppu menee rikki. Virran hallitsematonta kasvamista rajoitetaan lampun kanssa sarjaan kytketyllä liitäntälaitteella, jolla tarkoitetaan yleensä magneettista kuristinta. Vastusta virranrajoitukseen ei voida käyttää, jottei tehohäviöistä tulisi liian suuria. Kun käytetään 400 Hz suurempia taajuuksia, voidaan loistelampuissa käyttää kondensaattoria. Tätä pienemmillä taajuuksilla lampussa olevat elektrodit voivat vioittua kondensaattorin aikaansaamista purkaus- ja varausvirroista. (Tuomimäki 2013, 21 - 22.)

5.2.3 Loistelamppujen vaikutukset sähkön laatuun

Loistelampun käyttäminen edellyttää liitäntälaitetta. Liitäntälaite voi esimerkiksi muuntaa verkkojännitteen lampulle sopivaksi, kompensoida kuristimesta syntyvän loistehon, vaimentaa häiriöitä tai stabiloida verkkojännitettä. Nykyisin liitäntälaitteen tilalle voidaan ottaa elektroninen liitäntälaite, joka on uusissa valaisimissa syrjäyttänyt vanhat liitäntälaitteet käytännössä kokonaan. Elektroninen liitäntälaite muuttaa lampulle syötettävää virtaa nostamalla virran taajuutta 30 kHz:iin tai korkeammalle, korvaten tavallisen liitäntälaitteen sytyttimen, kuristimen ja muut komponentit. Tällä tavoin energiankulutusta ja lampun lämpenemää saadaan pienemmäksi ja vastaavasti lampun syttyminen nopeammaksi. Elektroninen liitäntälaite myös hidastaa lampun valotehon alenemista ja eliminoi lampun välkyntää, jolloin silmät rasittuvat vähemmän. (Tuomimäki 2013, 22 - 23.)

6 VALAISTUSVOIMAKKUUSMITTAUKSET

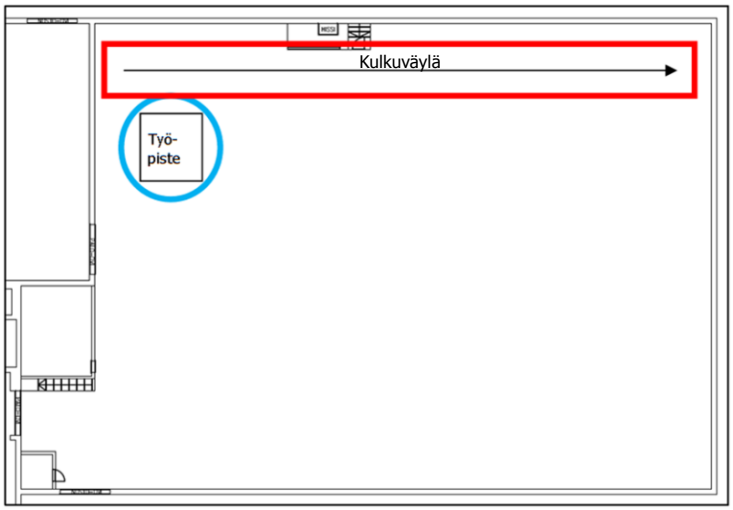
6.1 Tavoitteet ja yleiskuvaus

Yritys asetti valaistusvoimakkuusmittausten tavoitteeksi mitata yhden hyvin valaistun kulkuväylän valaistusvoimakkuudet koneistamossa, jolloin saatujen mittaustulosten perusteella voitaisiin laskea koko koneistamon valaistusvoimakkuuksien teoreettinen keskiarvo. Tämän lisäksi mitattiin myös yhden työpisteen valaistusvoimakkuudet, jotta saataisiin selvyys siitä, kuinka paljon valaistusvoimakkuudet heikkenevät isojen koneiden ja muiden laitteiden läheisyydessä.

Koneistamossa on 147 valaisinta ja yhdessä valaisimessa on kolme putkea eli yhteensä osastolla on 441 loisteputkea. Tämän lisäksi koneistamossa on suuret kattoikkunat, joista pääsee luonnonvaloa kiinteistön sisälle. Loisteputket ovat Lem-Kem Oy:n valmistamia Lem-Lux-sarjan L 58W/840 4 000K, 5 200 lm putkia. Palaneita putkia koneistamossa oli 62 kappaletta, mikä aiheutti valotehon jakautumisen epätasaisesti lattiapinta-alalle. Standardin mukaisen valotehon toteutuminen varmistettiin ylivalaistuissa kohteissa siten, että loisteputkia vähennettiin, kunnes alueen tai työpisteen valaistusvoimakkuudet saatiin lähelle standardin määrittelemiä arvoja tai hieman niiden alle. Tällä tavoin selvitettiin, kuinka paljon energiankulutusta voidaan vähentää nykyistä valaistusta muuttamalla ilman merkittävää standardista poikkeamista.

Koneistamossa tehtävät työt voidaan lukea standardin *SFS-EN 12464-1* mukaan tarkkuuskonetöiksi eli vähimmäisvalaistusvoimakkuuden tulee olla vähintään 500 lx koneistamon työpisteillä ja kulkuväylillä. (Valo ja valaistus 2010, 48.) Valaistusvoimakkuuden vähimmäismäärän toteutuminen varmistetaan opinnäytetyössä tehdyissä laskelmissa keino- ja luonnonvalon yhdistelmän sijaan pelkästään keinovalaisulla, jotta oikeanlainen valaistus toteutuisi aina kellonajasta tai sääolosuhteista riippumatta.

Valaistusvoimakkuusmittaukset suoritettiin Teston 540-luksimittarilla, joka on esitelty liitteessä 1. Mittarilla pystytään mittaamaan luonnonvalon ja keinovalon valaistusvoimakkuudet 0 – 99 999 lx alueelta. Mittaukset toteutettiin syyskuussa pimeän aikaan, jotta luonnonvalon määrä saataisiin minimoitua mittaustuloksista. Mittaukset suoritettiin kuvassa 6 merkitylle työpisteelle ja kulkuväylälle.

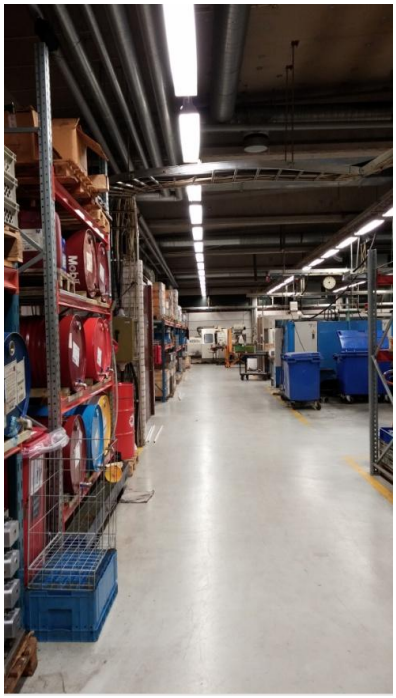


KUVA 6. Koneistamon pohjapiirros (Pesonen 2015-09-06.)

6.2 Kulkuväylän mittaustulokset

Kuvassa 7 esitetyn kulkuväylän valaistusvoimakkuudet mitattiin suoraan jokaisen valaisimen alta metrin korkeudelta lattiapinnasta. Ensimmäisessä mittauksessa kulkuväylän valaistusvoimakkuudet mitattiin siten, että kaikissa valaisimissa oli kolme loisteputkea. Toisessa mittauksessa kulkuväylän valaisimista otettiin yksi putki keskeltä pois ja kolmannessa mittauksessa valaisimista otettiin toinen putki pois.

Lisäksi kahdesta kohdasta mitattiin valaistusvoimakkuudet kahden peräkkäisen valaisimen välistä ja mitattiin, toteutuuko standardin mukainen valaistus. Mittaus otettiin kahden valaistusvoimakkuuksiltaan keskimääräisesti tehokkaimman ja kahden heikoimman valaisimen väliltä.



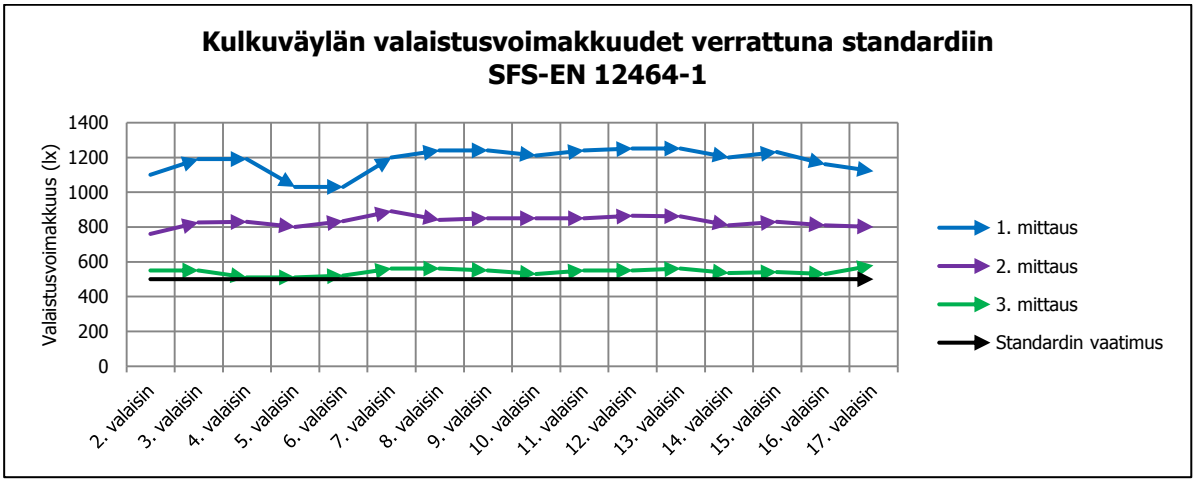
KUVA 7. Kulkuväylä, jolta mitattiin valaistusvoimakkuudet (Pesonen 2015-09-06.)

Kulkuväylän valaistusvoimakkuusmittauksen tulokset on esitetty taulukossa 6 ja kuviossa 1. Ensimmäisen ja viimeisen valaisimen mittaustulokset eivät ole soveltamiskelpoisia, koska ensimmäisen valaisimen kohdalla oli hylly valon edessä ja viimeisen alapuolella kone, joka esti mittaukset kokonaan. Tästä syystä alku ja loppupään valaisimien valaistusvoimakkuuksia ei jatkossa huomioida laskutoimituksissa.

TAULUKKO 6. Valaistusvoimakkuusmittausten tulokset

Valaisin	1. mittaus (lx)	2. mittaus (lx)	3. mittaus (lx)	4. mittaus (lx)
1.	800	610	510	
2.	1100	760	550	
3.	1190	825	550	
4.	1190	830	510	500
5.	1030	800	510	
6.	1030	833	520	
7.	1200	890	560	500
8.	1240	840	560	
9.	1240	850	550	
10.	1210	850	530	
11.	1240	850	550	
12.	1250	865	550	
13.	1250	860	560	
14.	1200	810	535	
15.	1230	830	540	
16.	1160	810	530	
17.	1120	800	580	
18.	-	-	-	
Keskiarvo	1180	831	543	

Valaistusvoimakkuusmittauksista saatuja tuloksia verrataan standardiin *SFS-EN 12464-1* kuviossa 1.



KUVIO 1. Valaistusvoimakkuudet verrattuna standardiin *SFS-EN 12464-1*

Taulukosta 6 ja kuviosta 1 voidaan nähdä, että kun kulkuväylältä mitattuja valaistusvoimakkuuksia verrataan standardissa määriteltyyn tarkkuuskonetyön 500 lx valaistusvoimakkuuteen, ovat kolmen loisteputken valaisinten valaistusvoimakkuudet kulkuväylällä yli kaksinkertaiset. Myös kahden putken valaisimien antamat valaistusvoimakkuudet ylittävät standardissa määritellyn 500 lx rajan 831 lx keskiarvolla. Tuloksista voidaan lisäksi nähdä, että koneistamon kulkuväylällä toteutuu standardin mukainen valaistus, vaikka nykyistä valaistusta vähennettäisiin kolmasosaan alkuperäisestä. Tällöin

kulkuväylän keskimääräiseksi valaistusvoimakkuudeksi saadaan 543 lx. Taulukosta 6 nähdään myös, että lamppujen välistä mitatut valaistusvoimakkuudet pysyvät standardissa määritellyllä rajalla, mikä tarkoittaa sitä että standardin mukainen valaistus toteutuu tasaisesti koko kulkuväylällä.

Koneistamon keskimääräiseksi valaistusvoimakkuudeksi saadaan yhden putken valaisimilla 543 lx, joten teoriassa yhden putken valaisimet täyttäisivät standardin määrittelemän valaistusvoimakkuuden myös koneistamon työpisteillä. Käytännössä koneistamon keskimääräinen valaistusvoimakkuus jäisi kuitenkin paljon pienemmäksi suurien koneiden ja muiden esteiden ohjatessa valaistusta epätasaisesti alueelle.

Se, minkä takia taulukossa 6 esitettyjen valaisimien 4 ja 5, ja 7 ja 8 väliltä otettujen valaistusvoimakkuusmittausten molemmat arvot ovat 500 lx, johtuu koneistamossa olevista esteistä. Koneiden ja hyllyjen sijoittelu ohjaa taustalta tulevan valon jakautumista siten, että ison valovirran valaisinten välillä valaistusvoimakkuus voi olla samaa luokkaa kuin kahden pienemmän valovirran valaisimen välillä. Kuviosta 1 voidaan nähdä, että ensimmäisessä mittauksessa viidennen ja kuudennen valaisimen kohdalla valaistusvoimakkuuksissa on notkahdus. Tämä selittyy niiden välissä olevalla kaapelikiskolla. Toisessa ja kolmannessa mittauksessa notkahdus tasoittuu taustalta tulevan valon takia. Näiden syiden takia mittaustuloksia ei voi suoraan käyttää työpisteen valaisun optimoimiseen.

6.3 Työpisteen mittaustulokset

Seuraavaksi suoritettiin työpisteen valaistusvoimakkuusmittaukset. Kuvassa 8 näkyvä työpiste sijoittuu koneistamossa kahden valaisinrivin väliin.

Kuva 8. Työpiste (Pesonen 2015-09-15.)

Ensimmäinen mittaus aloitettiin mittaamalla työpisteen valaistusvoimakkuus useasta kohdasta nykyisellä valaistuksella eli kolme loisteputkea sisältävien valaisimien antamalla valoteholla. Toisessa mittauksessa työpistettä ympäröivistä valaisimista otettiin yksi putki keskeltä pois ja mittaukset toistet-

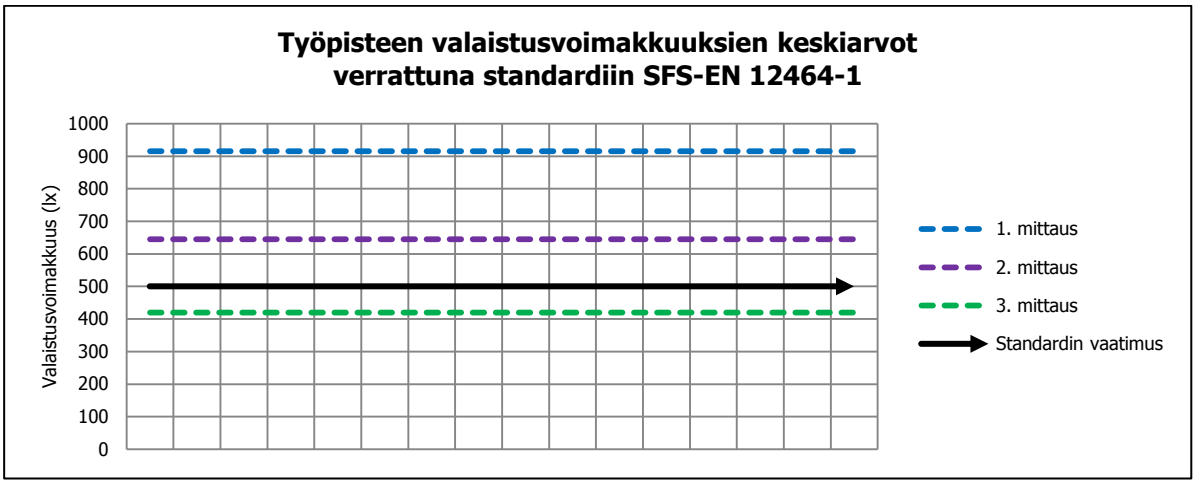
tiin. Kolmannessa mittauksessa valaisimista otettiin toinen putki pois siten, että valaiseva putki siirrettiin valaisimen keskelle, minkä jälkeen suoritettiin mittaukset.

Kuvassa 8 näkyvässä työpisteessä sijaitsevien koneiden, hyllyjen ja tässä tapauksessa myös kaapelihyllyjen takia valo jakaantui epätasaisesti työskentelyalueelle. Tästä syystä työpisteestä otetuista mittaustuloksista on esitetty pienin ja suurin arvo sekä mitattujen valaistusvoimakkuuksien keskiarvo taulukossa 7.

TAULUKKO 7. Työpisteestä saadut valaistusvoimakkuusmittaustulokset

	Min, max (lx)	Keskiarvo (lx)
1. mittaus	800 - 1030	915
2. mittaus	530 - 760	645
3. mittaus	340 - 500	420

Työpisteestä mitatuista valaistusvoimakkuusmittaustulosten keskiarvoista tehtiin kuvio 2, jossa keskiarvoja verrataan standardiin *SFS-EN 12464-1*.



KUVIO 2. Työpisteen valaistusvoimakkuuksien keskiarvot verrattuna standardiin *SFS-EN 12464-1*

Taulukosta 7 ja kuviosta 2 voidaan nähdä, että kolmen ja kahden putken valaisimilla keskimääräinen valaistusvoimakkuus on suurempi kuin standardin määrittelemä arvo ja alimmillaankin kahden putken valaisimilla yli 500 lx. Yhden putken valaisimilla työpiste on alivalaistu, joten standardin mukaisen valaistuksen saavuttamiseksi valaisimissa tulee olla vähintään kaksi loisteputkea.

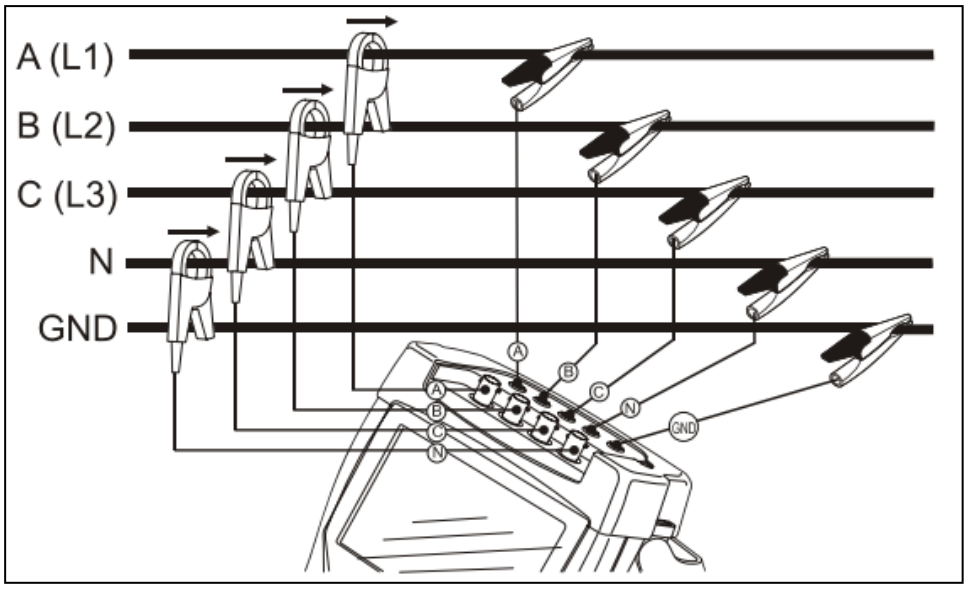
7 SÄHKÖNLAATUMITTAUKSET

7.1 Tavoitteet ja yleiskuvaus

Koneistamon loisteputket on jaettu kolmeen valaisinryhmään, joista jokaista ryhmää syöttää yksi vaihe. Koneistamon sähkölaatumittauksien tavoitteena oli selvittää, pysyvätkö jännitteen ja virran harmoniset yliaallot standardien *SFS-EN 50160* ja *SFS-EN 61000-3-2* määrittelemissä rajoissa. Tämän lisäksi sähkönlaatumittauksissa tarkasteltiin tehon harmonisia yliaaltoja, joille ei ole erikseen standardin määrittelemiä raja-arvoja. Mittaukset otettiin koneistamon valoja syöttävästä jakokeskuksesta 10 minuutin keskiarvoina viikon aikana, jotta mittaustuloksia pystyi suoraan vertaamaan standardeissa määriteltyihin raja-arvoihin. Mittauksesta saatuja tuloksia voidaan käyttää referenssinä, jos koneistamossa siirrytään led-valaistukseen ja tehdään vertailumittaukset.

Mittaukset suoritettiin Metropolia Ammattikorkeakoulu Oy:ltä lainaksi saadulla Fluke 435 -sähkönlaadun analysaattorilla, joka on esitelty tarkemmin liitteessä 3. Fluke 435:lla pystyy mittaamaan esimerkiksi vaihekohtaiset jännitteet, virrat ja tehot, huippukertoimet, harmoniset yliaallot, välkynnän, taajuuden sekä kuopat ja kohoumat. (Fluke Corporation 2008, 3 - 2.) Fluke 435 on LVD ja EMC (Low Voltage Directive 2006/95/EC ja Electromagnetic Compatibility Directive 2004/108/EC) -direktiivien mukainen laite. (Fluke Corporation 2008, 1 - 3.) Siinä on luokan A tarkkuus, mikä tarkoittaa, että sillä pystyy mittaamaan jännitetulon 0,1 % tarkkuudella. Harmonisia yliaaltoja mittalaite pystyy tallentamaan jopa 50 yliaaltokomponenttiin saakka. (Fluke Corporation 2008, 3-1.) Harmonisten yliaaltojen mittausominaisuudet on esitetty tarkemmin liitteessä 4.

Mittalaitteen kytkennän koneistamon valoja syöttävään keskukseen suoritti yrityksen työntekijä, jolla on riittävät pätevyydet sähkötöiden tekemiseen. Kytkennät suoritettiin kuvassa 9 näkyvien ohjeiden mukaisesti.



KUVA 9. Fluke 435 -sähkönlaadun analysaattorin kytkeminen 3-vaihejärjestelmään (Fluke Corporation 2008-09-16.)

Kuvassa 10 on kuva keskuksesta ja siihen tehdyistä kytkennöistä. Virtapihteinä käytettiin Fluken i400s-pihtejä, jotka on esitetty liitteessä 5. Pihdeillä pystytään mittaamaan vaihtovirtaa väliltä 0,5 - 400 A ja niillä on CAT IV 600 V / CAT III 1000 V turvaluokitus. (Fluke Corporation 2015.) Virtapihtien tekniset tiedot on esitetty tarkemmin liitteessä 6.

KUVA 10. Mittauskytkennät (Pesonen 2015-09-18.)

Mittauksista saatuja tuloksia tarkasteltiin tietokoneella Fluken PowerLog –ohjelmalla. Ohjelma rakentaa automaattisesti esimerkiksi harmonisten yliaaltojen spektrin, josta näkee kokonais- ja yksittäissäröt. Tämän lisäksi ohjelmalla voi tarkastella erikseen jokaista 10 minuutin välein otettua mittatietoa koko mittausjakson ajalta.

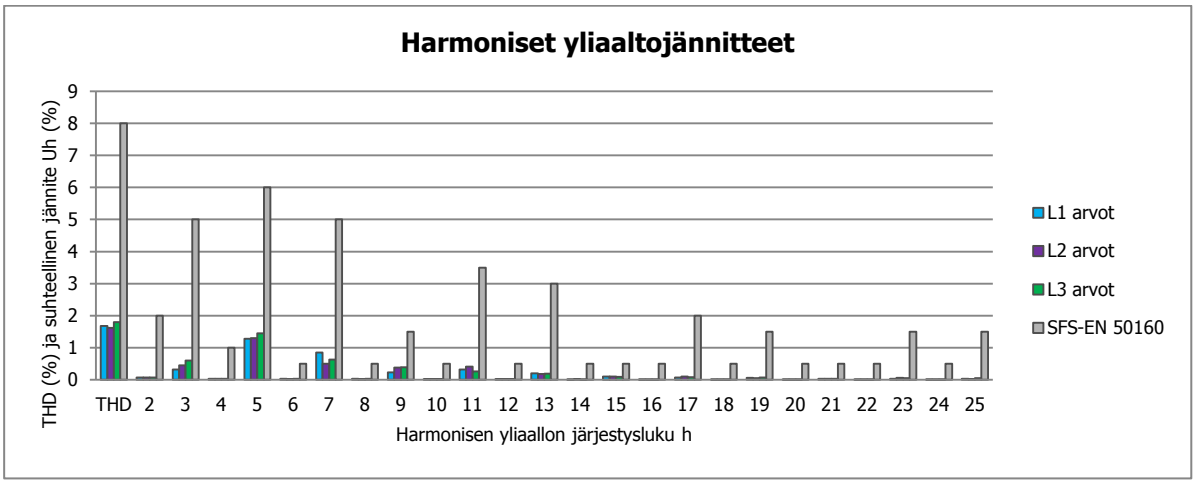
7.2 Jännitteen harmoniset yliaallot

Mittauksista saadut tulokset on esitetty 25 yliaaltokomponenttiin asti taulukossa 8. Standardissa ei ole määritelty raja-arvoja järjestysluvultaan 25 ylittäville harmonisille yliaalloille niiden pienuuden ja arvaamattomuuden takia, eikä niitä tämän takia esitetä mittaustuloksissa. (Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet 2010, 22). Tästä huolimatta kokonaissärössä eli THD:ssa on huomioitu harmoniset yliaaltokomponentit 40 yliaaltoon asti.

TAULUKKO 8. Harmonisten yliaaltojännitteiden suhteelliset jännitteet 25 yliaaltokomponenttiin asti

Parittomat yliaallot								Parilliset yliaallot			
Kolmella jaottomat				Kolmella jaolliset							
Järjestysluku h	Suhteellinen jännite Uh (%)			Järjestysluku h	Suhteellinen jännite Uh (%)			Järjestysluku h	Suhteellinen jännite Uh (%)		
	L1	L2	L3		L1	L2	L3		L1	L2	L3
5	1,28	1,30	1,45	**3**	0,32	0,45	0,60	**2**	0,07	0,07	0,07
7	0,85	0,50	0,63	**9**	0,23	0,38	0,39	**4**	0,03	0,03	0,03
11	0,32	0,41	0,26	**15**	0,09	0,10	0,09	**6**	0,02	0,02	0,03
13	0,20	0,18	0,19	**21**	0,02	0,03	0,03	**8**	0,02	0,02	0,03
17	0,07	0,10	0,08					**10**	0,02	0,02	0,02
19	0,06	0,05	0,07					**12**	0,02	0,02	0,02
23	0,03	0,06	0,05					**14**	0,01	0,01	0,01
25	0,03	0,02	0,05					**16**	0,01	0,01	0,01
								18	0,01	0,01	0,01
								20	0,01	0,01	0,01
								22	0,01	0,01	0,01
THD: L1 = 1,68 %, L2 = 1,62 %, L3 = 1,8 %								**24**	0,01	0,01	0,01

Harmonisten yliaaltojännitteiden spektri ja standardissa *SFS-EN 50160* määritellyt raja-arvot on esitetty kuviossa 3.



KUVIO 3. Harmonisten yliaaltojen suhteelliset jännitteet ja THD, sekä standardissa *SFS-EN 50160* esitetyt raja-arvot

Kuviosta 3 voidaan nähdä, että koneistamon loisteputkivalaistuksen harmonisten yliaaltojen suhteelliset jännitteet pysyvät standardin asettamien rajojen sisällä. Myös vaiheiden kokonaissärökertoimien arvot ovat 1,62 % ja 1,82 % välillä eli keskimäärin yli 6 prosenttiyksikköä alempana kuin standardin määrittämä yläraja 8 %. Kuviosta voidaan myös nähdä, että jokaisella vaiheella toinen yliaaltokomponentti kolmannesta lähtien on hallitseva 13 yliaaltokomponenttiin asti, mutta silti suurimmillaankin muutamia kymmenyksiä standardin ylärajasta. Yliaaltojännitteet ovat näin ollen standardin *SFS-EN 50160* mukaan hyväksyttävällä tasolla ja siksi voidaan olettaa, ettei valaistus heikennä jännitteen laatua merkittävästi.

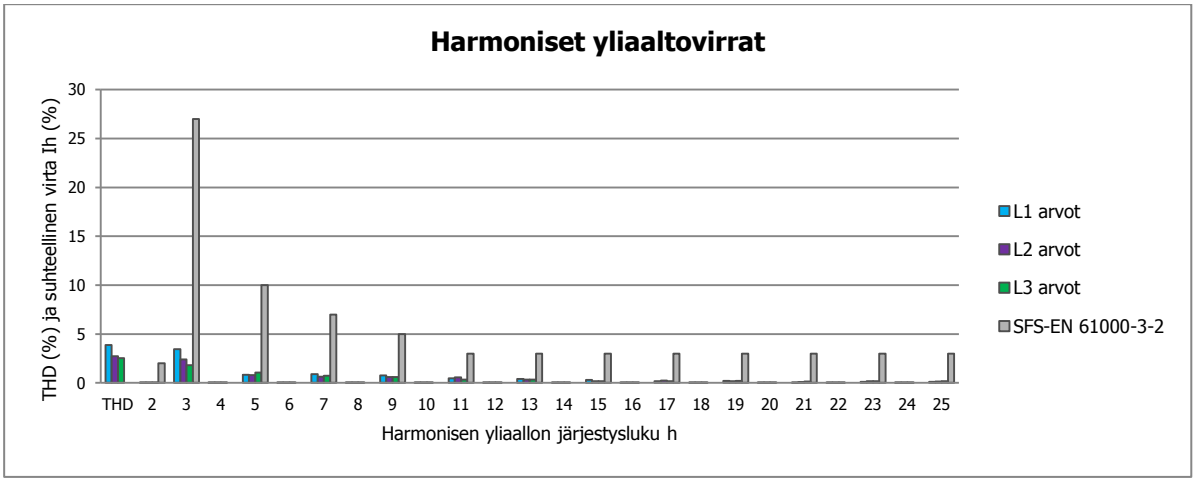
7.3 Virran harmoniset yliaallot

Harmonisten yliaaltovirtojen mittauksista saadut tulokset on esitetty 25 yliaaltokomponenttiin asti taulukossa 9. Järjestysluvultaan 25 ja 39 välillä olevien harmonisten yliaaltojen suhteellisten virtojen arvot ovat niin pieniä, ettei niitä esitetä mittaustuloksissa. Tästä huolimatta virran harmonisten yliaaltojen THD:ssa on huomioitu harmoniset yliaaltokomponentit 40 yliaaltoon asti.

TAULUKKO 9. Harmonisten yliaaltovirtojen suhteelliset virrat 25 yliaaltokomponenttiin asti

Parittomat yliaallot								Parilliset yliaallot			
Kolmella jaottomat				Kolmella jaolliset							
Järjestysluku h	Suhteellinen virta Ih (%)			Järjestysluku h	Suhteellinen virta Ih (%)			Järjestysluku h	Suhteellinen virta Ih (%)		
	L1	L2	L3		L1	L2	L3		L1	L2	L3
5	0,83	0,80	1,06	**3**	3,44	2,40	1,82	**2**	0,03	0,01	0,01
7	0,91	0,62	0,74	**9**	0,78	0,60	0,59	**4**	0,01	0,01	0,01
11	0,47	0,58	0,34	**15**	0,29	0,19	0,18	**6**	0,00	0,01	0,02
13	0,41	0,33	0,35	**21**	0,12	0,08	0,13	**8**	0,03	0,02	0,03
17	0,16	0,25	0,19					**10**	0,02	0,03	0,03
19	0,20	0,18	0,20					**12**	0,03	0,03	0,03
23	0,09	0,18	0,18					**14**	0,02	0,02	0,02
25	0,12	0,13	0,16					**16**	0,02	0,02	0,02
								18	0,02	0,02	0,02
								20	0,01	0,02	0,02
								22	0,01	0,02	0,02
THD: L1 = 3,9 %, L2 = 2,7 %, L3 = 2,5 %								**24**	0,01	0,02	0,02

Harmonisten yliaaltovirtojen spektri ja standardissa *SFS-EN 61000-3-2* määritellyt raja-arvot on esitetty kuviossa 4.



KUVIO 4. Harmonisten yliaaltovirtojen suhteelliset virrat ja THD, sekä standardissa *SFS-EN 61000-3-2* määritellyt raja-arvot

Kuviosta 4 voidaan nähdä, että virran harmonisten yliaaltojen vaihekohtaiset kokonaissäröt ovat 3,9 %, 2,7 % ja 2,5 %. Yksittäissäröistä 3., 5., 7. ja 9. yliaaltokomponentit ovat hallitsevia muihin yliaaltokomponentteihin verrattuna jokaisen vaiheen kohdalla. Vaiheen L1 kolmas yliaaltokomponentti on yli nelinkertainen suhteessa toiseksi suurimpaan yliaaltokomponenttiin ollessaan 3,44 % perustaajuisesta syöttövirrasta. Vaiheessa L2 ero on kolminkertainen tämän ollessa 2,4 % ja vaiheessa L1 hie-

man alle kaksinkertainen arvolla 1,82 %. Tästä huolimatta standardin ylärajan ollessa 27 % ei kolmannen yliaallon suodatus ole tarpeellista yhdenkään vaiheen kohdalla.

Standardissa ei ole erikseen määritelty virran harmonisten yliaaltojen kokonaissärön raja-arvoa, mutta koska vaiheiden yksittäissäröt pysyvät standardissa määriteltyjen rajojen alapuolella voidaan olettaa, että kokonaissäröt ovat kohtuullisella tasolla. Mittaustuloksista voidaan todeta, että valaistuksesta mitatut yliaaltovirrat ovat standardin *SFS-EN 61000-3-2* mukaan hyväksyttävällä tasolla ja siksi voidaan olettaa, ettei valaistus heikennä virran laatua merkittävästi.

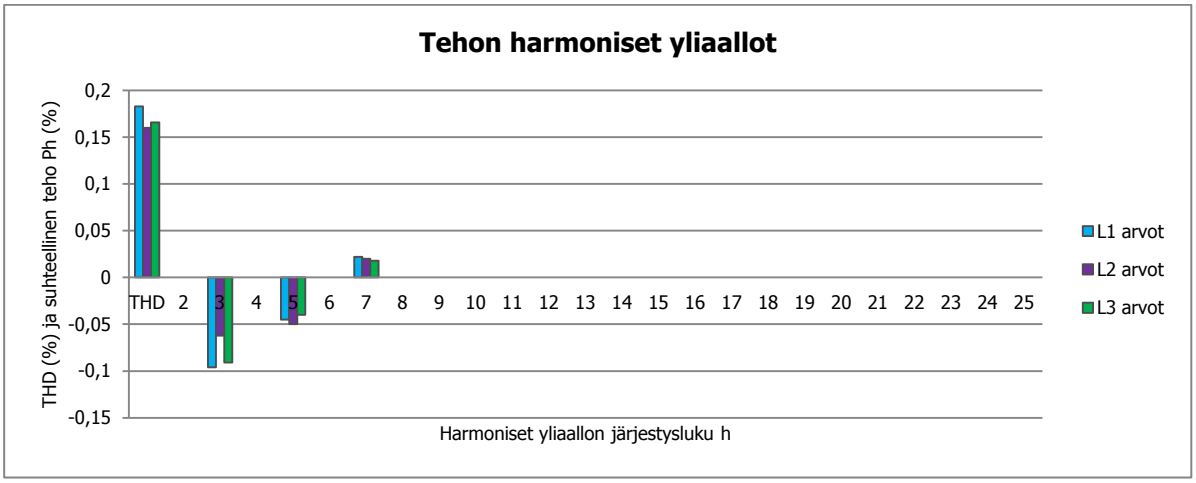
7.4 Tehon harmoniset yliaallot

Mittauksista saadut tulokset on esitetty 25 yliaaltokomponenttiin asti taulukossa 10. Järjestysluvultaan 25 ja 39 välillä olevien harmonisten yliaaltojen suhteellisten tehojen arvot ovat niin pieniä, ettei niitä esitetä tuloksissa. THD:ssa on huomioitu harmoniset yliaaltokomponentit 40 yliaaltoon asti.

TAULUKKO 10. Tehon harmonisten yliaaltojen suhteelliset tehot 25 yliaaltokomponenttiin asti

Parittomat yliaallot								Parilliset yliaallot			
Kolmella jaottomat				Kolmella jaolliset							
Järjestysluku h	Suhteellinen teho Ph (%)			Järjestysluku h	Suhteellinen teho Ph (%)			Järjestysluku h	Suhteellinen teho Ph (%)		
	L1	L2	L3		L1	L2	L3		L1	L2	L3
5	-0,05	-0,05	-0,04	**3**	-0,10	-0,06	-0,10	**2**	0,00	0,00	0,00
7	0,02	0,02	0,02	**9**	0,00	0,00	0,00	**4**	0,00	0,00	0,00
11	0,00	0,00	0,00	**15**	0,00	0,00	0,00	**6**	0,00	0,00	0,00
13	0,00	0,00	0,00	**21**	0,00	0,00	0,00	**8**	0,00	0,00	0,00
17	0,00	0,00	0,00					**10**	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00					**12**	0,00	0,00	0,00
23	0,00	0,00	0,00					**14**	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,00	0,00					**16**	0,00	0,00	0,00
								18	0,00	0,00	0,00
								20	0,00	0,00	0,00
								22	0,00	0,00	0,00
THD: L1 = 0,18 %, L2 = 0,16 %, L3 = 0,17 %								**24**	0,00	0,00	0,00

Tehon harmonisten yliaaltojen spektri ja THD on esitetty kuviossa 5.



KUVIO 5. Harmonisten yliaaltojen suhteellisten tehojen ja THD:n spektri

Kuviosta 5 voidaan nähdä, että tehon harmonisten yliaaltojen vaihekohtainen kokonaissärö asettuu 0,185 % ja 0,166 % välille. Tuloksista voidaan myös nähdä, että tehon 3. ja 5. harmonisten yliaaltokomponenttien suunnat ovat jokaisella vaiheella negatiivisia kun taas 7. komponentilla positiivisia. Opinnäytetyön ohjaajan kanssa käytyjen sähköpostikeskustelujen mukaan negatiivisia arvoja voidaan tulkita siten, että 3. ja 5. yliaaltokomponenteilla teho virtaa kuormasta syöttävään verkkoon päin ja positiivisilla arvoilla vastaavasti verkosta kuormaan päin. (Keskusmittaukset, Fluke 435 2015-09-17 – 2015-10-01.) Parillisten yliaaltokomponenttien arvot ovat niin pieniä, ettei niitä huomioida tuloksissa. Myöskään 9. tai sitä suurempia yliaaltokomponentteja ei huomioida tuloksissa niiden pienuuden vuoksi.

8 ELINKAARILASKENTA JA TAKAISINMAKSUAIKA

8.1 Tavoitteet ja parametrit

Elinkaarilaskennalla selvitettiin, kuinka suuret elinkaarikustannukset koneistamon valaistuksesta syntyy led-valaistuksella verrattuna nykyiseen loisteputkivalaistukseen. Elinkaarilaskennan pohjalta arvioitiin investoinnin takaisinmaksuaika, jonka perusteella yritys voi harkita investoinnin toteuttamista.

Koneistamossa on valot päällä 4 264 tuntia vuodessa. Elinkaarikustannukset tehdään 15 vuodeksi eli 63 960 valaistuksi tunniksi. Led-putkien käyttöiäksi annetaan 125 000 tuntia eli noin 30 vuotta 4 264 tunnin vuosittaisella käyttöajalla ja loisteputkien 28 000 - 57 000 tuntia eli 6 - 13 vuotta. Tämä tarkoittaa sitä, että optimitilanteessa loisteputket täytyy uusia kerran tarkastelujakson aikana, kun led-putkia ei tarvitse uusia ollenkaan. Laskennassa käytetään 24 W / 3 190 lm Valtavalo G3+ LED -valoputkea (Valtavalo Oy 2015) ja erään loisteputkivalmistajan 58 W / 5 000 lm loisteputkea. Valmistajan nimeä ei käytetä opinnäytetyössä hintakilpailutuksen takia.

Laskenta tehdään kahdella eri sähkön hinnalla vertailun helpottamiseksi. Hintoina käytetään 0,05 € / kWh ja 0,15 € / kWh. Ekoenergo Oy:n ylläpitämän Energianet-sivuston mukaan sähkön hinnan vuosittainen nousu on 1 – 2 %. Laskennassa käytetään näiden lukujen keskiarvoa, jolloin vuosittaiseksi sähkön hinnan nousuksi saadaan 1,5 %. Laskennassa on myös huomioitu yleinen hintojen nousu, joka on Energianetin mukaan 1,04 % vuodessa. (Ekoenergo Oy 2015.) Yleistä hintojen nousua sovelletaan kaikkiin komponentteihin laskennassa.

Laskennan kiinteinä parametreina käytettiin seuraavia arvoja: valaisinten käyttöaika 4 264 tuntia / vuosi, sähkön hinta 0,05 € / kWh ja 0,15 € / kWh, valaisimien määrä 147 kpl, sähkön hinnan nousu 1,5 % vuodessa ja yleinen hintojen nousu 1,04 % vuodessa. Led-valaisun elinkaarilaskennassa käytettiin investointikustannuksina 69,90 € putkea kohden ja putkien käyttöikänä valmistajan korkeimman arvion mukaista 125 000 tuntia. Loisteputkivalaisun elinkaarianalyysin laskennassa kunnossapitokustannuksiksi kilpailutettiin 6,60 € / putki, sytyttimen hinnaksi 0,99 € / kpl (Lamppuexpress 2015.) ja niiden käyttöiäksi 57 000 tuntia. Laskennassa loisteputkien vaihdon yhteydessä vaihdetaan myös sytyttimet, joita on yksi kappale yhtä loisteputkea kohden.

Elinkaarilaskennoissa käytettiin kaavaa 1.

$$K_{VALAISTUS} = K_{INVESTOINTI} + K_{ENERGIA}, \tag{1}$$

jossa $K_{VALAISTUS}$ on valaistuksen kokonaiskustannukset 15 vuodeksi, $K_{INVESTOINTI}$ lamppujen ja sytyttimien uusimisesta aiheutuneet kustannukset ja $K_{ENERGIA}$ valaisimista aiheutuneet energiakustannukset. Kaava voidaan purkaa osiin seuraavasti:

$$K_{INVESTOINTI} = k \cdot h \cdot e \cdot p^{(s-1)},$$

jossa k on putkien lukumäärä, h yksittäisen putken hinta euroina, e yksittäisen sytyttimen hinta euroina, p yleinen hintojen nousu vuodessa prosentteina ja s tarkastelujakson vuosi, jolloin investointi tehdään ja

$$K_{ENERGIA} = \sum_{i=1}^{15} \left(k \cdot \frac{P_L}{1000} \cdot t \cdot y \cdot z^{i-1} \right),$$

missä k on putkien lukumäärä, P_L lampun teho watteina, t putkien käyttöaika tunteina vuodessa, y sähkön hinta euroina ja z sähkön vuotuinen hinnannousu prosentteina.

Laskennassa ei ole huomioitu putkien asennuksesta tai vaihdosta aiheutuvia kustannuksia, koska led-putket voidaan asentaa suoraan loisteputken tilalle ilman sähköasentajan koulutusta. Valaisimia ei ole myöskään kilpailutettu tai otettu mukaan laskentaan, koska putkien vaihtaminen ei edellytä valaisimen vaihtamista ja koska nykyiset valaisimet on vaihdettu uusiin vuonna 2008. Tätä edeltävät valaisimet oli hankittu 1980-luvun alussa, joten laskennassa oletetaan, että nykyiset valaisimet kestävät tarkastelujakson ajan ilman vaihtoa. Valaisimien vaihtoa voidaan harkita tulevaisuudessa, mikäli valaistuksen muuttamisen seurauksena niiden valonjako osoittautuu huonoksi.

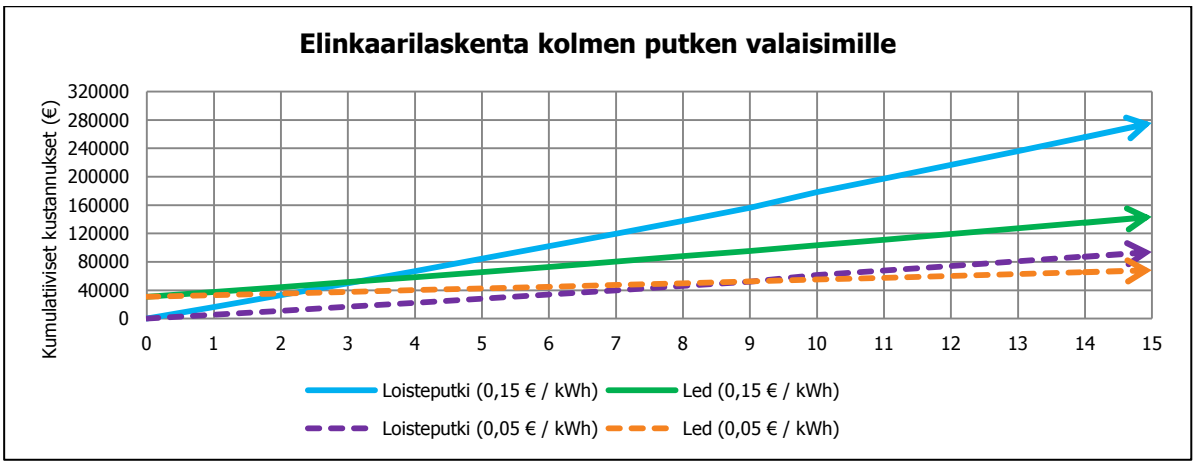
Lisäksi laskennassa oletettiin, ettei putkiin tule vikoja ja etteivät niiden hinnat muutu tarkastelujakson aikana, lukuun ottamatta yleistä hintojen nousua. Kaikki laskelmat on tehty putkille lasketun pisimmän käyttöiän perusteella, jolloin tuloksien pääpaino siirtyy sähköenergiasta aiheutuviin kustannuksiin.

8.2 Tulokset

Elinkaarilaskenta suoritettiin kolmen, kahden ja yhden putken led- ja loisteputkivalaisimille käyttämällä edellä määriteltyjä tietoja. Tulokset on esitetty kahdella eri sähkön hinnalla, jolloin nähdään sähkön hinnan vaikutus valaistuksen kustannuksiin, vaikka led-putkien alkuinvestointi on huomioitu laskennoissa.

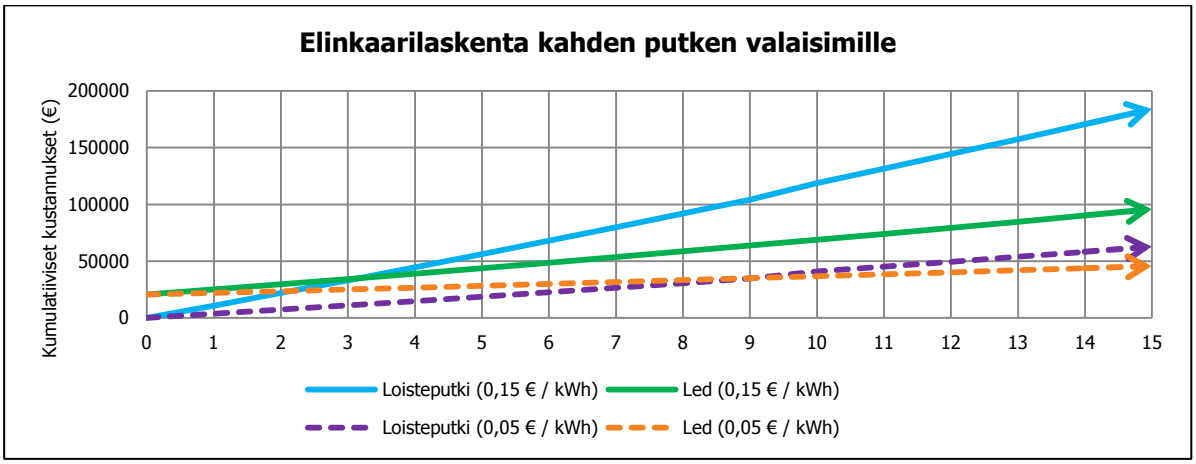
Elinkaarilaskennan pohjalta tehtiin kuviot 6, 7 ja 8, joissa verrataan led-putkivalaistuksen ja loisteputkivalaistuksen kumulatiivisia kustannuksia 15 vuoden tarkastelujaksolla toisiinsa. Kuviossa 9 on esitetty erikoistilanne, jossa verrataan kahden loisteputken valaisinten ja kolmen led-putken valaisinten kumulatiivisia kustannuksia 15 vuoden tarkastelujaksolla.

Kolmen putken valaistukselle saadut elinkaarilaskennan tulokset on esitetty kuviossa 6 ja elinkaarilaskentataulukot liitteissä 7.



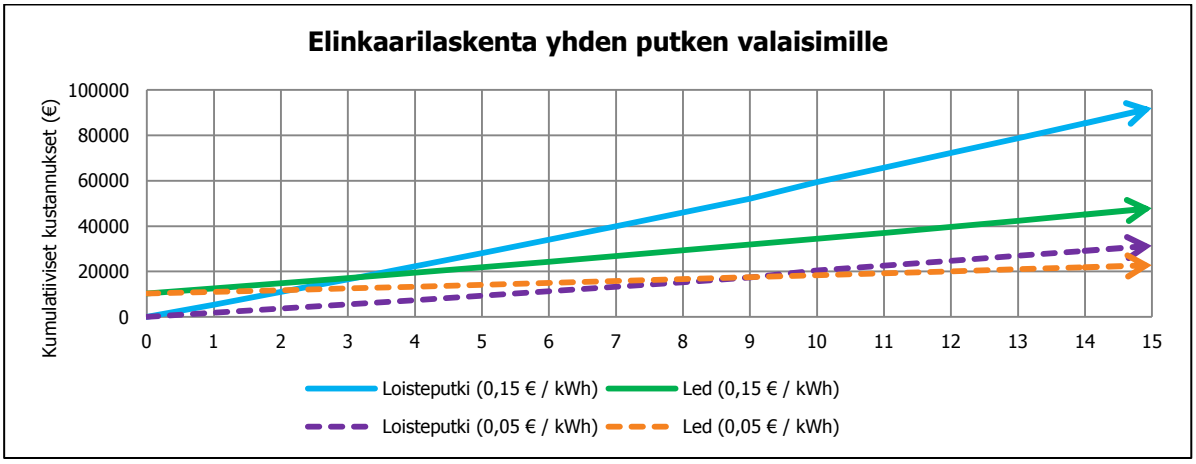
KUVIO 6. Elinkaarilaskenta kolmen putken valaisimille

Kuviossa 7 on esitetty elinkaarilaskennan tulokset valaisimille, joissa on kaksi putkea.



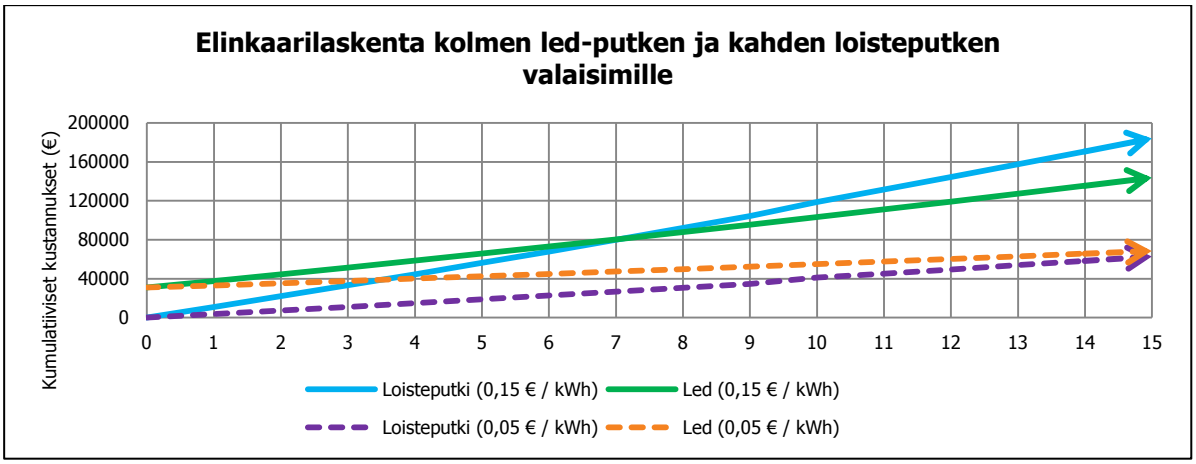
KUVIO 7. Elinkaarilaskenta kahden putken valaisimille

Kuviossa 8 on esitetty elinkaarilaskennan tulokset valaisimille, joissa on yksi putki.



KUVIO 8. Elinkaarilaskenta yhden putken valaisimille

Kuviossa 9 on esitetty elinkaarilaskennan tulokset kolmen led-putken ja kahden loisteputken valaisimille.



KUVIO 9. Elinkaarilaskenta kolmen led-putken ja kahden loisteputken valaisimille.

Elinkaarilaskennan tuloksista saaduista kuvioista nähdään arvio kummankin valaistusmuodon kokonaiskustannuksista tiettyyn vuoteen mennessä. Arviot ovat tehty kolmelle eri putkimäärälle kahdella eri sähkön hinnalla. Esimerkiksi kuviosta 6 voidaan nähdä, että kun jokaisessa koneistamon valaisimessa on kolme loisteputkea, niin 15 vuoden aikana tällainen valaistustapa maksaa yritykselle noin 276 000 € sähkön hinnan ollessa 0,15 € / kWh. Vastaavasti samanlainen valaistus led-putkilla maksaa yritykselle 15 vuodessa noin 144 000 € led-putkien ostohinnat mukaan lukien. Tällöin säästöä tulee noin 47 % loisteputkivalaistukseen verrattuna. Vastaavanlaisessa tilanteessa sähkön hinnan ollessa 0,05 € / kWh loisteputket maksavat yritykselle 15 vuodessa noin 94 000 € ja led-putket hieman alle 69 000 €, jolloin säästöä tulee noin 27 %.

Kuvioista nähdään myös led-valaistuksen takaisinmaksuaika, joka on käyrien kohtaamispisteessä. Kohtaamispisteessä loisteputkivalaistuksen kokonaiskustannukset ylittävät led-valaistuksesta aiheutuneet kokonaiskustannukset. Kuvioista 6, 7 ja 8 voidaan huomata, että valaisimien määrästä riippumatta led-valaistuksen takaisinmaksuaika ajoittuu 0,15 € / kWh sähkön hinnalla 3 ja 4 vuoden välille alkuinvestoinnista. Vastaavasti sähkön hinnan ollessa 0,05 € / kWh, takaisinmaksuaika asettuu 8 ja 10 vuoden välille.

Elinkaarilaskennassa huomioitiin myös tilanne, jossa kahden led-putken valovirrat eivät riitä korvaamaan kahden loisteputken valovirtoja ja valaisimeen asennetaan kolmas led-putki. Kuvioista 9 nähdään, että koneistamon valaiseminen kolmen 24 W / 3 190 lm led-putken valaisimilla maksaa 15 vuodessa noin 143 000 € sähkön hinnan ollessa 0,15 € / kWh. Vastaavasti samassa ajassa kahden 58 W / 5 000 lm loisteputken valaisimilla kustannukset ovat hieman yli 184 000 €. Tällöin led-valaistuksella saadaan säästöjä 15 vuodessa 22 % loisteputkivalaisuun verrattuna ja takaisinmaksuaika asettuu 6 ja 8 vuoden välille. Samassa tilanteessa sähkön hinnan ollessa 0,05 € / kWh led-putkivalaisun takaisinmaksuaika ylittää 15 vuoden tarkastelujakson ja sijoittuu laskelmien perusteella 18 ja 20 vuoden välille.

9 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia nykyistä koneistamon loisteputkivalaistusta ja tehdä takaisinmaksuaika-arvio vaihtoehtoiselle led-valaistukselle. Loisteputkivalaistuksesta tutkittiin valaistusvoimakkuuksien toteutumista kulkuväylällä ja työpisteellä ja sähkönlaatua valaistusta syöttävältä jakokeskukselta. Sähkönlaatumittauksissa tutkittiin jännitteen, virran ja tehon harmonisia yliaaltoja.

Loisteputkien valaistusvoimakkuuteen vaikuttaa putkien ikä ja sen myötä heikentynyt valontuotto. Valaistusvoimakkuusmittaustuloksista nähdään, että tietyillä lampuilla on suurempi valaistusvoimakkuus kuin toisilla. Lisäksi kulkuväylän lamppujen välistä otetuista mittaustuloksista nähdään, että taustavalon vaikutus kokonaisvalaistukseen on paikoin huomattava alueen isojen koneiden ja varastohyllyjen vuoksi. Valaistusvoimakkuusmittauksista saatujen tulosten ja standardin *SFS-EN 12464-1* määritysten perusteella kulkuväylien valaistusta voidaan pudottaa kolmannekseen nykyisestä valaistuksesta ja työpisteen valaistusta kolmanneksella nykyisestä valaistuksesta. Mikäli energiankulutusta halutaan pienemmäksi, tulisivat loisteputket vaihtaa sellaisiin putkiin, joissa valovirta säilyy samansuuruisena mutta tehonkulutus pienenee. Tällaisissa tapauksissa olisi suotavaa tutkia pienellä erällä uusia putkia, miten valaistusvoimakkuudet muuttuvat alueella. Mikäli putkilla päästään vähintään standardissa *SFS-EN 12464-1* määrittelemille tasoille eikä valaistusvoimakkuuksien muutos haittaa työviihtyvyyttä tai -tehokkuutta, voidaan putket uusia koko alueelle.

Koneistamon valaistuksesta mitatut harmoniset yliaallot ovat standardien *SFS-EN 50160* ja *SFS-EN 61000-3-2* mukaan hyväksyttävillä tasoilla, joten valaistus ei näin ollen heikennä koneistamon sähköverkon jännitteen tai virran laatua merkittävästi. Yliaaltojen suodatukselle ei tällöin ole standardien mukaan välttämätöntä tarvetta. Mikäli koneistamossa siirrytään led-valaistukseen, voidaan loisteputkivalaistuksesta saatuja mittaustuloksia käyttää referenssinä led-valaistuksen sähkönlaatumittauksissa, jolloin nähdään, vaikuttaako led-valaistus jännitteen suodatettavuuteen.

Elinkaarilaskennassa investointikustannukset on laskettu normaalia korkeammilla hinnoilla, koska todellisia laskennan parametreja on hankala arvioida ilman kilpailutusta ja valmistajien tarjouksia. Elinkaarilaskennan tuloksista voidaan todeta, että led-valaistus tulee yritykselle edullisemmaksi loisteputkivalaistukseen verrattuna ainoastaan sähkönkulutuksessa. Suuret investointikustannukset vaikuttavat merkittävästi led-valaistuksen takaisinmaksuaikaan, ja sähkön hinta lopulta määrittää kuinka iso ero led-valaistuksen ja loisteputkivalaistuksen kokonaiskustannuksiin syntyy. Mittaus- ja laskentatuloksien pohjalta voidaan arvioida, että standardien mukaisen valaistuksen toteuttaminen led-valaistuksella maksaa itsensä takaisin yritykselle 8 ja 10 vuoden välillä verrattuna nykyiseen loisteputkivalaistukseen. Nykyistä loisteputkivalaistusta tehostamalla voidaan energiakustannuksia pienentää ilman, että valaistusvoimakkuudet alittavat standardin minimivaatimukset. Tällöin led-valaistuksen takaisinmaksuaika kasvaa entisestään ja valaistuksen uusiminen muuttuu yritykselle kannattamattomaksi investoinniksi.

Yritykselle kannattavin tilanne nykyisten laskentaparametrien perusteella olisi se, että nykyistä valaistusta vähennettäisiin ja käytettäisiin takaisinmaksuaika-arvioiden perusteella vielä seuraavat viisi

vuotta, jonka jälkeen kilpailutettaisiin uudet led-putket, uudet valaisimet ja niihin liittyvät asennustyöt. Viiden vuoden odottelua puoltaa myös se, että OLED-teknologia on tullut kuluttajien tietoisuuteen vasta parin viime vuoden aikana, mikä oletettavasti kiihdyttää led-valaisimien hintojen putoamista entisestään. OLED-teknologian kehittyminen voi vastaavasti tarkoittaa myös sitä, että 5 vuoden päästä on saatavilla OLED-valaisimia, joissa on parempi valoteho kuin led-valaisimissa.

Opinnäytetyön mittaukset rajattiin koskemaan loisteputkivalaistusta. Mittauksia pystyttäisiin jatkamaan, jos yritys päättäisi uusia koneistamon loisteputket led-putkiin. Tällöin led-putkien valaistusvoimakkuuksia, sähkön laatua ja energiankulutusta pystyttäisiin vertaamaan suoraan loisteputkivalaistuksesta saatuihin tuloksiin. Lisäksi tutkimus voisi koskea esimerkiksi led-valaistuksen välkynnän vaikutusta työtehokkuuteen ja luonnonvalon vaikutusta koneistamon valaistusvoimakkuuksiin.

LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

ABOUT 2015. The History of Fluorescent Lights. [Viitattu 2015-08-24.] Saatavissa: http://inventors.about.com/library/inventors/bl_fluorescent.htm

ASSOCIATED POWER TECHONOLOGIES 2015. Total Harmonic Distortion and Effects in Electrical Power Systems. [Viitattu 2015-09-18.] Saatavissa: http://www.aptsources.com/resources/pdf/Total%20Harmonic%20Distortion.pdf

CARIITTI OY 2015. Led-tietopaketti. [Viitattu 2015-08-22.] Saatavissa: http://www.cariitti.fi/sivut/led-tietopaketti

COMSYS AB 2015. Power Quality. [Viitattu 2015-08-18.] Saatavissa: http://www.comsys.se/solutions/power-quality.html

EKOENERGO OY 2015. Sähköhuolto. [Viitattu 2015-09-28.] Saatavissa: http://www.energianet.fi/index.php?page=sahkohuolto&osa=7

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) 2014. Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase) (IEC 61000-3-2:2010). SFS-EN 61000-3-2. Vahvistettu 2014-09-22. SESKO ry. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

ENERGIAHALLINTAJÄRJESTELMÄT 2012. Vaatimukset ja käyttöohjeet. SFS-EN ISO 50001. Vahvistettu 2012-02-13. Metalliteollisuuden Standardisoimisyhdistys ry. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

ENSTO 2009. Luminanssi ja häikäisy. [Viitattu 2015-08-18.] Saatavissa: http://www2.amk.fi/Ensto/www.amk.fi/opintojaksot/0705016/1228387313247/1228397989485/1228398034451/1228398134018.html

ENSTO 2008a. Valovirta. [Viitattu 2015-08-17.] Saatavissa: http://www2.amk.fi/Ensto/www.amk.fi/opintojaksot/0705016/1228387313247/1228397989485/1228398034451/1228398095075.html

ENSTO 2008b. Valovoima. [Viitattu 2015-08-17.] Saatavissa: http://www2.amk.fi/Ensto/www.amk.fi/opintojaksot/0705016/1228387313247/1228397989485/1228398034451/1228398112158.html

FLUKE CORPORATION 2008. Fluke 434/435 Three Phase Power Quality Analyzer. Users Manual. [Viitattu 2015-09-14.] Saatavissa: http://assets.fluke.com/manuals/434_435_umeng0300.pdf

FLUKE CORPORATION 2008-09-16. Sähkön laadun analysaattorin kytkeminen 3-vaihe järjestelmään. Saatavissa: http://assets.fluke.com/manuals/434_435_umeng0300.pdf

FLUKE CORPORATION 2015. Virtapihdit i400s. [Viitattu: 2015-09-22.] Saatavissa: http://www.fluke.com/fluke/fifi/Lisavarusteet/Virtapihdit/i400s.htm?PID=56300

HISTORY OF LIGHTING 2015. History of LEDs – Light Emitting Diodes. [Viitattu 2015-08-25.] Saatavissa: http://www.historyoflighting.net/light-bulb-history/history-of-led/

HOWSTUFFWORKS 2015. How Fluorescent Lamp Work. [Viitattu 2015-08-21.] Saatavissa: http://home.howstuffworks.com/fluorescent-lamp2.htm

HOWSTUFFWORKS 2015. How Light Emitting Diodes Work. [Viitattu 2015-08-21.] Saatavissa: http://electronics.howstuffworks.com/led1.htm

JAMROZINSKI, Teemu 2015. Toimistorakennuksen energiatehokkuuden parantaminen valaistuksen avulla. Tampereen ammattikorkeakoulu. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 2015-08-18.] Saatavissa: http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201505127647

KATAJISTO, Tony 2015. LED-lamppujen vaikutukset sähkön laatuun. Satakunnan ammattikorkeakoulu. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 2015-08-25.] Saatavissa: http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2015052710745

KESKUSMITTAUKSET, FLUKE 435 2015-09-17 – 2015-10-01. [Ont-ohjaajan Jari Ijäksen kanssa käyty sähköpostikeskustelu]. Saatavissa: Helsinki: Petrus Pesosen kokoelmat.

KORPINEN, Leena, MIKKOLA, Marko, KEIKKO, Tommi, FALCK, Emil 2008. Yliaalto-opus. [Viitattu 2015-09-02.] Saatavissa: http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/yliaalto-opus.pdf

LAMP TECHNOLOGY 2015-08-31. Loisteputkilampun poikkileikkaus. [digikuva]. Saatavissa: http://www.lamptech.co.uk/Images/Illustrations/FL%20Construction.jpg

LAMPPUEXPRESS 2015. Philips S10 Sytytin 4-65W SIN. [Viitattu 2015-09-29.] Saatavissa: https://www.lamppuexpress.com/philips-s10-sytytin-4-65w-sin

LIMIC OY 2015. LED. [Viitattu 2015-08-15.] Saatavissa: http://www.limic.fi/html/led-tx.htm

MFZ-ANTRIEBE 2015. MFZOVITOR. [Viitattu 2015-08-18.] Saatavissa: http://www.mfz-antriebe.de/fi/mfzovitor.html

OVITOR OY 2015. Etusivu. [Viitattu 2015-08-18.] Saatavissa: http://www.ovitor.fi/fi/

OSRAM GMBH 2015a. Ledin historia. [Viitattu: 2015-08-26.] Saatavissa: http://www.osram.fi/osram_fi/uutiset--tiedot/led/ammattitietoa/led-perusteet/led-historia/index.jsp

OSRAM GMBH 2015b. Loistelamput. [Viitattu 2015-08-21.] Saatavissa: http://www.osram.fi/osram_fi/uutiset--tiedot/loistelamput/index.jsp

OSRAM GMBH 2015c. OSRAM-tietoa: led-valon värit. [Viitattu 2015-08-21.] Saatavissa: http://www.osram.fi/osram_fi/uutiset--tiedot/led/ammattitietoa/led-perusteet/valon-vaerit/index.jsp

OSRAM GMBH 2015d. Pienpainekaasupurkaus. [Viitattu 2015-08-21.] Saatavissa: http://www.osram.fi/osram_fi/uutiset--tiedot/loistelamput/ammattitietoa/pienpainekaasupurkaus/index.jsp

OSRAM GMBH 2015-08-21. Ledin poikkileikkaus. [digikuva]. Saatavissa: http://www.osram.fi/osram_fi/uutiset--tiedot/led/ammattitietoa/led-perusteet/perustietoa/index.jsp

PIRTTILAHTI, Lauri 2008. Omavalmisteisten osien materiaaliohjauksen kehittäminen. Metropolia-ammattikorkeakoulu. Kone- ja tuotantotekniikka. Opinnäytetyö. [Viitattu 2015-08-18.] Saatavissa: http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2010093013344

SMARTDRAW 2015-09-21. PDCA Cycle – 1. [digikuva]. Saatavissa: http://www.smartdraw.com/pdca/examples/pdca-cycle-1/

STAPLES FINLAND OY 2015. Tiesitkö tämän valaistuksesta? [Viitattu 2015-08-17.] Saatavissa: http://archive-fi.com/page/35577/2012-06-03/http://www.lindell.fi/tulosta.php?id=99

TUOMIMÄKI, Karri 2013. Valaistuskuormien verkkovaikutukset. Tampereen ammattikorkeakoulu. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 2015-08-31.] Saatavissa: http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2013080714633

TURVALLISUUS- JA KEMIKAALIVIRASTO 2014. LED-valoputket loisteputkien korvaajina [muistio]. [Viitattu: 2015-09-13.] Saatavissa: http://www.tukes.fi/Tiedostot/sahko_ja_hissit/ohjeet/LED_valoputket_loisteputkien_korvaajina.pdf

VALO JA VALAISTUS 2010. Työkohteiden valaistus. Osa 1: Sisätilojen työkohteiden valaistus. SFS-EN 12464-1. Vahvistettu 2010-10-10. SESKO ry. 2. painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

VALTAVALO OY 2015. Valtavalo G3+ LED-valoputket. [Viitattu 2015-09-28.] Saatavissa: http://valtavalo24.com/#led-valoputket

VALTAVALO 2015-10-05. Valtavalo G3 LED-valoputki -esite. Saatavissa: http://valtavalo.fi/wp/wp-content/uploads/2015/03/Valtavalo-G3-LED-tube-brochure-FIN-update-3.1.pdf

YLEISESTÄ JAKELUVERKOSTA SYÖTETYN SÄHKÖN JÄNNITEOMINAISUUDET 2010. SFS-EN 50160. Vahvistettu 2010-11-22. SESKO ry. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

ZAITSEVA, Katerina 2012. Aurinkosähköjärjestelmien, elektronisesti kommutoitujen tasavirtamoottoreiden ja LED-valaistuksen käytön vaikutus rakennusten sähkön laatuun. Aalto-yliopisto. Valaistustekniikka ja sähköinen talotekniikka. Diplomityö. [Viitattu 2015-08-25.] Saatavissa: https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/5177/master_zaitseva_katerina_2012.pdf?sequence=1

LIITE 1: TESTO 540-LUKSIMITTARI

Testo 540 luksimittari. (Pesonen 2015-09-06.)

LIITE 2: MITTAUSPÖYTÄKIRJA, VALAISTUSVOIMAKKUUDET

OVITOR OY OVIMAX OY

6.9.2015

Mittauspöytäkirja

	1. mittaus (3 lamppua)		2. mittaus (2 lamppua)	3. mittaus (1 lamppu)	
Mittaukset tehtävä 1 m korkeudelta lattiasta!					
1.	800	1 lamppu pal. hylly	610	510	
2.	1100		760	550	
3.	1190		825	550	
4.	1190		830	510	500 luksin välissä
5.	1030	kangetikristo	800	510	
6.	1030		833	520	
7.	1200		890	560	500 luksin välissä
8.	1240		840	560	
9.	1240		850	550	
10.	1210		850	530	
11.	1240		850	550	
12.	1250		865	550	
13.	1250		860	560	
14.	1200		810	535	
15.	1230		830	540	
16.	1160		810	530	
17.	1120		800	580	
18.	Kone alla		—	—	

Työpiste

1. mittaus (3 lamppua)	2. mittaus (2 lamppua)	3. mittaus (1 lamppu)
800 – 1030	530 – 760	340 – 500

Huom. kahden rivin väli (1 lamppu molemmissa) lamppujen kohdalta 550 luksia ja välistä 590 luksia.

LIITE 3: FLUKE 435 -SÄHKÖNLAADUN ANALYSAATTORI

Fluke 435 -sähkönlaadun analysaattori. (Pesonen 2015-09-18.)

LIITE 4: FLUKE 435 HARMONISTEN YLIAALTOJEN MITTAUSOMINAISUUDET

Harmonics	Measurement Range	Resolution	Accuracy
Harmonic order (n)	DC, 1..50 Grouping: Harmonic groups according to IEC 61000-4-7		
Inter-Harmonic order	Off, 1..49 Grouping: Harmonic and Interharmonic subgroups according to IEC 61000-4-7		
Filtering	When measuring harmonics with interharmonics off, harmonics group is used and a 1.5 s smoothing filter is active. When measuring harmonics with interharmonics on, harmonics subgroup and interharmonics centered subgroup are used and no filter is active.		
Vrms Relative (%f): Fluke 435 Absolute: Fluke 434 Absolute:	0.0 … 100.0% 0.0 … 1000 Vrms 0.0 … 1000 Vrms	0.1% 0.1 Vrms 0.1 Vrms	± 0.1% ± n x 0.1% (± 0.4% for %r) ± 0.05% of nominal voltage if < 1% of nominal voltage ± 5% if ≥ 1% of nominal voltage ± 5% ± 2 counts
Arms Relative (%f): Absolute:	0.0 … 100.0% 0.0 … 4000 mV x clamp scaling	0.1% 1 mVrms x clamp scaling	± 0.1% ± n x 0.1% (± 0.4% for %r) ± 5% ± 5 counts
Watts Relative: (Harmonics only) Watts Absolute: (Harmonics only)	0.0 … 100.0% depends on clamp and voltage scaling	0.1%	± n x 2% ± 5% ± n x 2% ± 10 counts
DC Relative: Fluke 435 Absolute V: Fluke 434 Absolute V: Absolute A: Absolute W:	0.0 … 100.0% 0.0 … 1000V 0.0 … 1000V 0.0 … 4000 mV x clamp scaling depends on clamp and voltage scaling	0.1% 0.1V 0.1V 1 mVrms x clamp scaling 0.1V depends on scaling	± 0.1% V and A (± 2% Watt) ± 0.2% of nominal voltage ± 5% ± 10 counts ± 5% ± 10 counts ± 5% ± 10 counts
$THD_{(n=40)}$ (relative %f or %r)	0.0 … 100.0 %	0.1%	± 2.5% V and A (± 5% Watt)
Hz	0 … 3500 Hz	1 Hz	± 1Hz
Phase angle Fluke 435 Fluke 434	 -360º ... +0º -360º ... +0º	 1º 1º	 ± n × 1º ([8]) ± n × 1.5º ([8])

Lähde: FLUKE CORPORATION 2008, 23-6. Fluke 434/435 Three Phase Power Quality Analyzer. Users Manual. [Viitattu 2015-09-14.] Saatavissa: http://assets.fluke.com/manuals/434_435_umeng0300.pdf

LIITE 5: FLUKE I400S-AC VIRTAPIHDIT

Fluke i400s-AC virtapihdit. (Pesonen 2015-09-30.)

LIITE 6: FLUKE I400S-AC VIRTAPIHTIEN TEKNISET TIEDOT

Tekniset tiedot	
Mittausalue:	40 A -alue 0,5 A - 40 A 400 A -alue 5 A - 400 A
Perustarkkuus:	40 A -alue 2 % + 0,015 A (45 - 400 Hz) 400 A -alue 2 % + 0,04 A (45 - 400 Hz)
Vaiheensiirto:	40 A -alue 0,5 - 1 A Ei määritetty 1 A...5 A 4° 5 A - 10 A 3° 10 A - 20 A 3° 20 A - 40 A 2° 40 A - 400 A EO 400 A -alue 0,5 - 1 A EO 1 A...5 A EO 5 A - 10 A Ei määritetty 10 A - 20 A 2° 20 A - 40 A 2° 40 A - 400 A 1,5°
Tyypillinen kaistanleveys:	40 A -alue 5 Hz - 10 kHz 400 A -alue 5 Hz - 10 kHz
Ulostulosignaali(t):	40 A -alue 10 mV/A 400 A -alue 1 mV/A
Huippu-kerroin:	40 A -alue ≤3 400 A -alue ≤3 - 300 A ≤2,5 - 400 A
Turvallisuustiedot	
Turvallisuus	CAT IV 600 V, CAT III, 1000 V
Suurin ei-tuhoava virta	1000 V AC
Mekaaniset ja yleiset tiedot	
Takuu	1 vuosi
Johtimen enimmäiskoko	32 mm
Liitäntäkaapelin pituus	2,5 m
BNC-adapteri	Kyllä
Mitat	150 x 70 x 30 mm
Paino	114 g

Lähde: FLUKE CORPORATION 2015. Fluke i400s-AC virtapihtien tekniset tiedot. [Viitattu 2015-10-06.] Saatavissa: http://www.fluke.com/fluke/fifi/Lisavarusteet/Virtapihdit/i400s.htm?PID=56300

LIITE 7: ELINKAARILASKENTATAULUKOT

Loisteputkivalaistus 3 putken valaisimilla							
Vuosi	Investointi- ja kunnossapitokustannukset €	Energiakustannukset		Kokonaiskustannukset €		Kumulatiiviset kustannukset €	
		Sähkön hinta 0,05 € / kWh	Sähkön hinta 0,15 € / kWh	Sähkön hinta 0,05 € / kWh	Sähkön hinta 0,15 € / kWh	Sähkön hinta 0,05 € / kWh	Sähkön hinta 0,15 € / kWh
0		0	0	0	0	0	0
1		5453	16360	5453	16360	5453	16360
2		5535	16605	5535	16605	10988	32965
3		5618	16854	5618	16854	16606	49819
4		5702	17107	5702	17107	22309	66926
5		5788	17364	5788	17364	28096	84289
6		5875	17624	5875	17624	33971	101914
7		5963	17888	5963	17888	39934	119802
8		6052	18157	6052	18157	45986	137959
9		6143	18429	6143	18429	52129	156388
10	3163	6235	18706	9398	21868	61527	178256
11		6329	18986	6329	18986	67856	197242
12		6424	19271	6424	19271	74279	216513
13		6520	19560	6520	19560	80799	236073
14		6618	19853	6618	19853	87417	255926
15		6717	20151	6717	20151	94134	276077
YHTEENSÄ:	**3163**	**90972**	**272915**	**94134**	**276077**	**94134**	**276077**

Loisteputkivalaistus 2 putken valaisimilla							
Vuosi	Investointi- ja kunnossapitokustannukset €	Energiakustannukset €		Kokonaiskustannukset €		Kumulatiiviset kustannukset €	
		Sähkön hinta 0,05 € / kWh	Sähkön hinta 0,15 € / kWh	Sähkön hinta 0,05 € / kWh	Sähkön hinta 0,15 € / kWh	Sähkön hinta 0,05 € / kWh	Sähkön hinta 0,15 € / kWh
0		0	0	0	0	0	0
1		3635	10906	3635	10906	3635	10906
2		3690	11070	3690	11070	7326	21977
3		3745	11236	3745	11236	11071	33213
4		3802	11405	3802	11405	14872	44617
5		3859	11576	3859	11576	18731	56193
6		3916	11749	3916	11749	22647	67942
7		3975	11926	3975	11926	26623	79868
8		4035	12104	4035	12104	30657	91972
9		4095	12286	4095	12286	34753	104258
10	2108	4157	12470	6265	14579	41018	118837
11		4219	12657	4219	12657	45237	131495
12		4282	12847	4282	12847	49520	144342
13		4347	13040	4347	13040	53866	157382
14		4412	13236	4412	13236	58278	170617
15		4478	13434	4478	13434	62756	184052
YHTEENSÄ:	**2108**	**60648**	**181943**	**62756**	**184052**	**62756**	**184052**

Loisteputkivalaistus 1 putken valaisimilla							
Vuosi	Investointi- ja kunnossapitokustannukset €	Energiakustannukset €		Kokonaiskustannukset €		Kumulatiiviset kustannukset €	
		Sähkön hinta 0,05 € / kWh	Sähkön hinta 0,15 € / kWh	Sähkön hinta 0,05 € / kWh	Sähkön hinta 0,15 € / kWh	Sähkön hinta 0,05 € / kWh	Sähkön hinta 0,15 € / kWh
0		0	0	0	0	0	0
1		1818	5453	1818	5453	1818	5453
2		1845	5535	1845	5535	3663	10988
3		1873	5618	1873	5618	5535	16606
4		1901	5702	1901	5702	7436	22309
5		1929	5788	1929	5788	9365	28096
6		1958	5875	1958	5875	11324	33971
7		1988	5963	1988	5963	13311	39934
8		2017	6052	2017	6052	15329	45986
9		2048	6143	2048	6143	17376	52129
10	1054	2078	6235	3133	7289	20509	59419
11		2110	6329	2110	6329	22619	65747
12		2141	6424	2141	6424	24760	72171
13		2173	6520	2173	6520	26933	78691
14		2206	6618	2206	6618	29139	85309
15		2239	6717	2239	6717	31378	92026
YHTEENSÄ:	**1054**	**30324**	**90972**	**31378**	**92026**	**31378**	**92026**

Led-valaistus 3 putken valaisimilla									
Vuosi	Investointi- ja kunnossapitokustannukset €	Energiakustannukset €		Kokonaiskustannukset €		Kumulatiiviset kustannukset €		Säästöt verrattuna loisteputkeen €	
		Sähkön hinta 0,05 € / kWh	Sähkön hinta 0,15 € / kWh	Sähkön hinta 0,05 € / kWh	Sähkön hinta 0,15 € / kWh	Sähkön hinta 0,05 € / kWh	Sähkön hinta 0,15 € / kWh	Sähkön hinta 0,05 € / kWh	Sähkön hinta 0,15 € / kWh
0	30826	0	0	30826	30826	30826	30826	-30826	-30826
1		2257	6770	2257	6770	33082	37595	-27629	-21236
2		2290	6871	2290	6871	35373	44466	-24385	-11502
3		2325	6974	2325	6974	37697	51441	-21091	-1622
4		2360	7079	2360	7079	40057	58519	-17748	8407
5		2395	7185	2395	7185	42452	65704	-14356	18585
6		2431	7293	2431	7293	44883	72997	-10912	28917
7		2467	7402	2467	7402	47350	80399	-7416	39403
8		2504	7513	2504	7513	49855	87912	-3868	50046
9		2542	7626	2542	7626	52397	95538	-267	60850
10		2580	7740	2580	7740	54977	103278	6583	75011
11		2619	7856	2619	7856	57595	111135	10293	86140
12		2658	7974	2658	7974	60254	119109	14059	97437
13		2698	8094	2698	8094	62951	127202	17881	108903
14		2738	8215	2738	8215	65690	135418	21760	120541
15		2779	8338	2779	8338	68469	143756	25698	132354
YHTEENSÄ:	**30826**	**37643**	**112930**	**68469**	**143756**	**68469**	**143756**	**25698**	**132354**

Led-valaistus 2 putken valaisimilla									
Vuosi	Investointi- ja kunnossapitokustannukset €	Energiakustannukset €		Kokonaiskustannukset €		Kumulatiiviset kustannukset €		Säästöt verrattuna loisteputkeen €	
		Sähkön hinta 0,05 € / kWh	Sähkön hinta 0,15 € / kWh	Sähkön hinta 0,05 € / kWh	Sähkön hinta 0,15 € / kWh	Sähkön hinta 0,05 € / kWh	Sähkön hinta 0,15 € / kWh	Sähkön hinta 0,05 € / kWh	Sähkön hinta 0,15 € / kWh
0	20551	0	0	20551	20551	20551	20551	-20551	-20551
1		1504	4513	1504	4513	22055	25064	-18419	-14157
2		1527	4581	1527	4581	23582	29644	-16256	-7668
3		1550	4649	1550	4649	25132	34294	-14061	-1081
4		1573	4719	1573	4719	26705	39013	-11832	5604
5		1597	4790	1597	4790	28301	43803	-9570	12390
6		1621	4862	1621	4862	29922	48665	-7275	19278
7		1645	4935	1645	4935	31567	53599	-4944	26269
8		1670	5009	1670	5009	33236	58608	-2579	33364
9		1695	5084	1695	5084	34931	63692	-178	40566
10		1720	5160	1720	5160	36651	68852	4389	50007
11		1746	5238	1746	5238	38397	74090	6862	57427
12		1772	5316	1772	5316	40169	79406	9373	64958
13		1799	5396	1799	5396	41968	84802	11921	72602
14		1826	5477	1826	5477	43793	90278	14507	80361
15		1853	5559	1853	5559	45646	95837	17132	88236
YHTEENSÄ:	**20551**	**25096**	**75287**	**45646**	**95837**	**45646**	**95837**	**17132**	**88236**

Led-valaistus 1 putken valaisimilla									
Vuosi	Investointi- ja kunnossapitokustannukset €	Energiakustannukset €		Kokonaiskustannukset €		Kumulatiiviset kustannukset €		Säästöt verrattuna loisteputkeen €	
		Sähkön hinta 0,05 € / kWh	Sähkön hinta 0,15 € / kWh	Sähkön hinta 0,05 € / kWh	Sähkön hinta 0,15 € / kWh	Sähkön hinta 0,05 € / kWh	Sähkön hinta 0,15 € / kWh	Sähkön hinta 0,05 € / kWh	Sähkön hinta 0,15 € / kWh
0	10275	0	0	10275	10275	10275	10275	-10275	-10275
1		752	2257	752	2257	11027	12532	-9210	-7079
2		763	2290	763	2290	11791	14822	-8128	-3834
3		775	2325	775	2325	12566	17147	-7030	-541
4		787	2360	787	2360	13352	19506	-5916	2802
5		798	2395	798	2395	14151	21901	-4785	6195
6		810	2431	810	2431	14961	24332	-3637	9639
7		822	2467	822	2467	15783	26800	-2472	13134
8		835	2504	835	2504	16618	29304	-1289	16682
9		847	2542	847	2542	17466	31846	-89	20283
10		860	2580	860	2580	18326	34426	2194	25004
11		873	2619	873	2619	19198	37045	3431	28713
12		886	2658	886	2658	20085	39703	4686	32479
13		899	2698	899	2698	20984	42401	5960	36301
14		913	2738	913	2738	21897	45139	7253	40180
15		926	2779	926	2779	22823	47919	8566	44118
YHTEENSÄ:	**10275**	**12548**	**37643**	**22823**	**47919**	**22823**	**47919**	**8566**	**44118**