

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Talotekniikan koulutusohjelma

Talotekniikka

Tutkintotyö

Tero Uusitupa

LÄMPÖKAMERAKUVAAMINEN JA KUVIEN ANALYSOINTI

Työn ohjaaja: Ins. Martti Honkiniemi

Työn teettäjä: Tampereen Vera OY, valvojana Ins. Janne Ketola

Tampere 2006

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Tekniikka ja metsätalous

Talotekniikka

Uusitupa Tero	Lämpökamerakuvaaminen ja kuvien analysointi
Tutkintotyö	32 sivua + 4 liitesivua
Työn ohjaaja	Ins. Martti Honkiniemi
Työn teettäjä	Tampereen Vera OY, valvojana ins. Janne Ketola
Maaliskuu 2007	
Hakusanat	lämpökamera, infrapuna, analysointi, emissio

TIIVISTELMÄ

Lämpökamera on oiva apuväline lähes kaikessa kunnossapidossa ja tarkastustoiminnassa. Lämpökameralla kuvaaminen ja kuvien analysointi vaatii suorittajaltaan tiettyjen termodynamiikan perusasioiden hallitsemista kuten käsityksen siitä, mitä kappaleen emissioeroin tarkoittaa.

Työn tarkoituksena on kertoa välttämättömät perusasiat lämpökuvaamiseen infrapuna-alueella sekä antaa ohjeita oikein tehtyyn lämpökuvaamiseen että kuvien tulkintaan. Työ on tehty lämpökuvaamisessa syntyvien virheiden minimoimiseksi. Virhearviointit aiheuttavat turhia ja joskus kalliitakin toimenpiteitä, ja jos kuvaa tulkitaan liian optimistisesti, voi jäädä huomioitta turvallisuuden tai toiminnan kannalta kriittisiä asioita. Lämpökuvaamisen ja lämmön mittaamisen rajapinta on usein varsin epäselvä. Molemmissa menetelmissä tulee huomioida omat toimintamallinsa kuvaamisen onnistumiseksi. Tässä työssä keskitytään lämpökuvaamiseen, mutta esitellään myös lämpökuvaamisen ja mittaamisen keskeiset erot.

Tähän työhön liittyvien kappaleiden emissiotaipumuksia on tutkittu Tampereen ammattikorkeakoulun laboratorioissa. Kuvissa ja kuvien tulkinnassa on käytetty muun muassa IR928- ja Fluken Ti20 -kameraa ohjelmistoineen. Lisäksi työssä tarkastellaan lämpökameran käyttöä sähköjärjestelmän kuntotutkimuksen apuvälineenä.

Tulokset opastavat oikein suoritettuun lämpökamerakuvaamiseen sekä antavat keinoja kuvien analysointiin ja tulkintaan sekä kuvaustilanteessa että myöhemmin niitä analysoitaessa.

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Tekniikka ja metsätalous

Talotekniikka

Uusitupa Tero Lämpökamerakuvaaminen ja kuvien analysointi

Engineering thesis 32 pages + 4 appendices

Thesis supervisor Ins. Martti Honkaniemi

Commissioning Company Tampereen Vera OY, supervisor Ins. Janne Ketola

March 2007

Keywords Thermo graphic camera, infrared, analysis, emissivity

ABSTRACT

A thermo graphic camera is an excellent accessory for almost all kinds of inspections and maintenance. To use a thermo graphic camera and analyze its images, certain basic information such as the meaning of emissivity is required. The purpose of this engineering thesis is to give all the necessary information needed for thermal imaging and the analysis of thermographics. Miscalculations in thermal imaging can be an expensive mistake and as a result important security issues can be missed.

The barrier between infrared based thermal imaging and temperature measurement is quite confused. In both methods, care must be taken to ensure the right kind of results. This work mainly concentrates on thermal imaging. However, the most relevant difference between infrared based thermal imaging and infrared based temperature measurements are discussed. The results of this work will give the correct way to carry out thermal imaging and thermal image analysis.

ALKUSANAT

Talotekniikan eri osa-alueilla on lämpökamerakuvaus yleistymässä kovaa vauhtia. Erityisesti kunnossapidon ja tarkastusten sektoreille on kosketukseton vian ja kunnan määrittäminen otettu hyvin vastaan. Tämä työ sai kuitenkin alkunsa Tampereen ammattikorkeakoulun sähköjärjestelmien kuntotutkimuksessa, jonka yhteydessä käytettiin lämpökameraa mm. löysien liitosten, viallisten laitteiden ja laitteiden ja siirtoteiden ylimenovastusten määrittämiseen. Haluan lausua kiitokseni kaikille tutkimustani inspiroineille ja edesauttaneille henkilöille: Tampereen sähköverkko Oy:n asiakaspalveluinsinööri Reino Seesvuorelle sekä asentajille, Hannu Vuorelle ja Reijo Nännimäiselle, jotka loivat pohjaa varsinaiselle tutkintotyölle. Lisäksi erityinen kiitos Tampereen Vera Oyj:n Janne Ketolalle ja Tampereen ammattikorkeakoulun Martti Honkiniemelle, jotka osaltaan tekivät paljon työn teknisen toteutuksen ja ideoinnin puolesta. Lopuksi vielä kiitos laboratoriotöiden työparilleni, laboratorioinsinööri Pasi Arvelalle.

Turussa 25.huhtikuuta 2007

Tero Uusitupa

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO	5
1 JOHDANTO.....	6
2 LÄMPÖKAMERAN KÄYTTÖKOHTEET	6
3 LÄMPÖKAMERAKUVAAMISEEN LIITTYVÄ TEORIA	7
3.1 Infrapunasaäteily	7
3.2 Emissio.....	8
4 KEINOJA OIKEAAN KUVAAMISEEN.....	10
4.1 Kameran kalibrointi, etäisyys ja väliaineet	10
4.2 Infrapunakameran ja Infrapunamittarin keskeiset erot	12
4.3 Lämpötila-alueen ja väripaletin vaikutus.....	13
4.4 Emissiokertoimen määrittäminen.....	15
4.5 Emissiokertoimen manipulointi.....	15
4.6 Heijastumien eliminointi.....	16
4.7 Ympäristön huomioiminen kuvaamisessa.....	17
5 KUVIEN ANALYSOINTI	17
5.1 Emissiivisyyden huomioiminen analysoinnissa	18
5.2 Heijastuminen	18
5.3 Poikkeaman löytäminen vertaamalla	20
5.4 Vikapaikan määrittäminen.	21
5.5 Vian kriittisyyden arviointi	21
5.6 Suurien kohteiden analysointi	22
6 LÄMPÖKAMERAKUVAUS OSANA SÄHKÖJÄRJESTELMIEN KUNTOTUTKIMUSTA	24
6.1 Virtateiden lämpenemiseen vaikuttavat sähköiset suureet	24
6.2 Työn eteneminen	25
6.3 T2 ja PK 2 väliset mittaukset	26
6.4 PK2:lta lähtevien B-talon jakokeskuksien sekä A- ja C- talon nousukeskuksien syöttöjen mittaukset ----	26
6.5 PK2:n ja NKC001:n välisen syötön lämpenemisen syiden analysointi	27
6.6 Yhteenveto sähköjärjestelmän kuntotutkimuksesta	29
7 YHTEENVETO.....	30
LÄHTEET.....	32

LIITTEET

1 Toimintamalli kuvaamiseen

2 Kuvaus pöytäkirja

3 Emissiokerroin taulukko

4 Sähköjärjestelmien kuntotutkimuksen pääkaavio

1 JOHDANTO

Lämpökamera on tarkoitettu kappaleesta luonnostaan lähtevän lämpösäteilyn mittaamiseen. Lämpökamerassa ilmaisin muuttaa kuvattavan kohteen lämpösäteilyn voimakkuuden lämpötilatiedoksi, josta saadaan digitaalisesti muodostettua lämpökuvaa. Lämpökuvaa muodostuu reaaliajassa.

Työn tarkoituksena on löytää keinoja oikein tapahtuvaan lämpökamerakuvaamiseen sekä lämpökamerakuvien oikeaan tulkintaan. Vielä toistaiseksi lämpökamerakuvausta ei ole voitu tehdä täysin automaattiseksi, vaan käyttäjän tulee tuntee termodynamiikan perusteita sekä ymmärtää siihen liittyviä eri materiaaleilla olevia ominaisuuksia. Lisäksi kuvaajan tulee ottaa huomioon muita kuvaamiseen vaikuttavia seikkoja kuten tuuli, auringon säteily, etäisyys, valaistus, ilmanvaihto sekä muut lämpösäteilyä aiheuttavat ja siihen vaikuttavat tekijät. Tämän työn varsinainen tarkoitus on selkeyttää kuvaamiseen vaadittuja taustatietoja ja löytää tilannekohtaisia ohjeita tyypillisiin kuvaustilanteisiin. Lopuksi keskitytään kuvien oikeaan ja luotettavaan tulkintaan.

2 LÄMPÖKAMERAN KÄYTTÖKOHTEET

Lämpökamerat eivät ole olleet käytössä vielä kovin pitkään laboratorioden ulkopuolella. Tekniikan kehittyttyä ja hintojen laskettua on kameroita vähitellen voitu ottaa käyttöön myös pienemmissä yrityksissä. Nykyaikaiset lämpökamerat (kuva 1) ovatkin tärkeitä apuvälineitä niin rakennusten kuin koneiden kunnossapidossa.



Kuva 1. Nykyaikainen lämpökamera. Kuvassa vasemmalla oleva kamera on Fluke Ti 20 /8/ ja oikealla IR928- lämpökamera /9/

Monet yritykset ovat ottaneet lämpökameran osaksi laadun valvontaa. Esimerkiksi kiinteistöjen rakennus- ja saneerauskohteissa voidaan kameralla tarkastaa eristyksiä ja hakea niistä vuotopaikkoja tai kylmäsiltoja. Lisäksi kameralla voidaan paikantaa rakenteellisia vikoja, kosteusongelmia ja ilmanvaihdon ja ilmastoinnin ongelmia.

Sähkötekniikan osa-alueella liiallinen lämmön nousu kertoo usein ylikuormituksesta tai löysästä liitoksesta. Myös kylmät kohdat väärässä paikassa voivat olla viite viasta, kuten ylivirtasuojan toimimisesta, katkenneesta johtimesta, palaneesta käämistä tai vastuksesta.

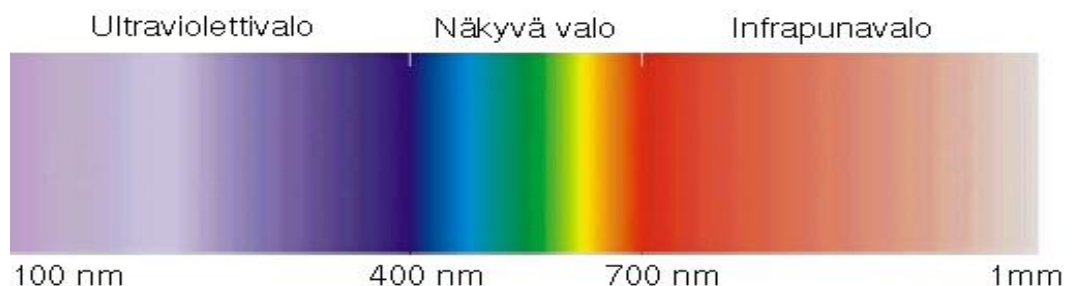
Luonnollisesti myös teollisuuden puolelta löytyy lukuisia kohteita, joissa lämpökamerakuvaamisen avulla voidaan ennaltaehkäistä joskus jopa hyvinkin suuria vahinkoja, jotka voivat aiheuttaa pahimmassa tapauksessa koko tuotannon pysähtymisen. Teollisuudessa lämpökamerakuvauksella voidaan seurata esimerkiksi pumppujen käämitysten, laakereiden, kuljettimien ja kiilahihnojen kuntoa sekä erilaisten säiliöiden tiiviyyttä ja sakkamäärää. Lyhyesti lämpökamerakuvausta voidaan hyödyntää lähes kaikkialla, missä syntyy lämpötilaeroja.

3 LÄMPÖKAMERAKUVAAMISEEN LIITTYVÄ TEORIA

Kuvauskohteiden ja sen ympäristön ominaisuudet tulee huomioida sekä lämpökamerakuvaamisessa ja kuvien tulkinnassa. Tämän vuoksi ennen kuvaamista onkin syytä tutustua lämpökameroihin liittyvään teoriaan, kuten infrapunasäteilyyn ja emissiivisyyteen. Lisäksi ympäristön aiheuttamien lämpövaikutusten eliminoimiseksi tulee ymmärtää termodynamiikan perusteita kuten lämmön säteileminen. Vaikka lämpökamerat eivät varsinaisesti havaitse näkyvää valoa, tulee kuvaajan kuitenkin ymmärtää valon värilämpötilan muodostuminen ja siten myös sen mahdollisesti aiheuttamat vääristymät kuvaustuloksissa.

3.1 Infrapunasäteily

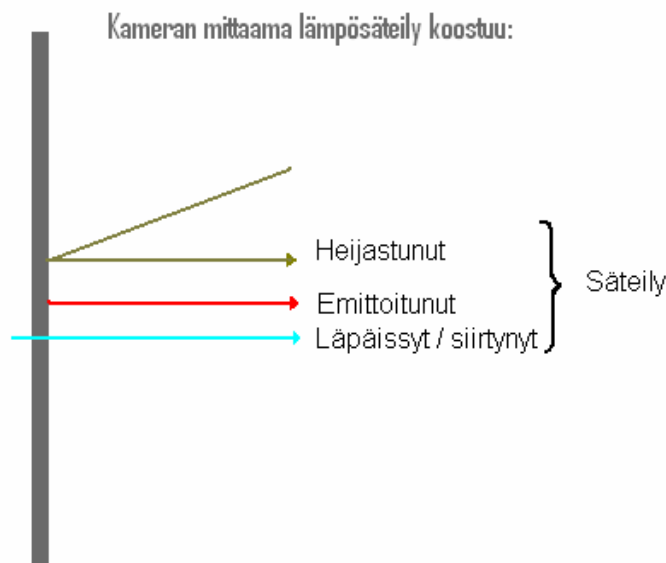
Infrapunalämpökameran toiminta perustuu nimensä mukaan infrapuna-alueella olevan säteilyn mittaamiseen. Infrapunasäteilyä käytetään myös nimeä lämpösäteily. Lämpösäteily johtuu atomien ja molekyylien värähtelystä kappaleessa, toisin sanoen lämpöliikkeestä. Kaikki kappaleet säteilevät lämpöä, kun sen lämpötila on kohonnut absoluuttisen nollapisteen yläpuolelle (> 0 Kelviniä eli $-273,15^{\circ}\text{C}$). Tämä johtuu kappaleiden tarpeesta päästä eroon energiastaan. Infrapunasäteilyn aallonpituus on ihmiselle näkyvän valon ($0,35 \mu\text{m} - 0,7 \mu\text{m}$) aallonpituuden yläpuolella ($0,7 \mu\text{m} - 1000 \mu\text{m}$) (kuva 2). Infrapunakameroiden käyttämät aallonpituusalueet ovat yleisimmin $2 - 5 \mu\text{m}$ ja $8 - 14 \mu\text{m}$. /3/



Kuva 2. Infrapuna-alue sähkömagneettisessa spektrissä. /10/

3.2 Emissio

Eri kappaleilla on erilainen taipumus emittoida lämpösäteilyä. Tätä kutsutaan emissiokertoimeksi. Emissiokertoimesta käytetään symbolia ε (epsilon). Emissiivisyys tarkoittaa kappaleen kykyä luovuttaa säteilyä tietyssä lämpötilassa suhteessa samassa lämpötilassa olevaan mustaan kappaleeseen. Ympäristönsä kanssa termisessä tasapainossa olevan kappaleen täytyy emittoida yhtä paljon energiaa kuin se sitä absorboi. Mikäli tämä emissio ja absorptio keskinäinen suhde muuttuu, alkaa kappale joko jäähtyä tai lämpenemään. Kappale siis absorboi ja emittoi samassa ajassa säteilyenergiaa yhtä paljon. Käytännössä osa kappaleeseen tulevasta lämpösäteilystä heijastuu aina. Lisäksi kappale voi päästää lävitseen sähkömagneettista säteilyä, josta vain kappaleeseen imeytyvä osa aiheuttaa lämpenemistä. Absorboitumista, läpäisyä ja heijastumista kuvaavien suhdelukujen summa on yksi. Lämpökameroissa emissiokertoimen avulla pyritään korjaamaan tätä suhdetta niin, että mitataan vain kuvattavan kappaleen lämpötilaa eikä esimerkiksi heijastunutta komponenttia (kuva 3). /1/

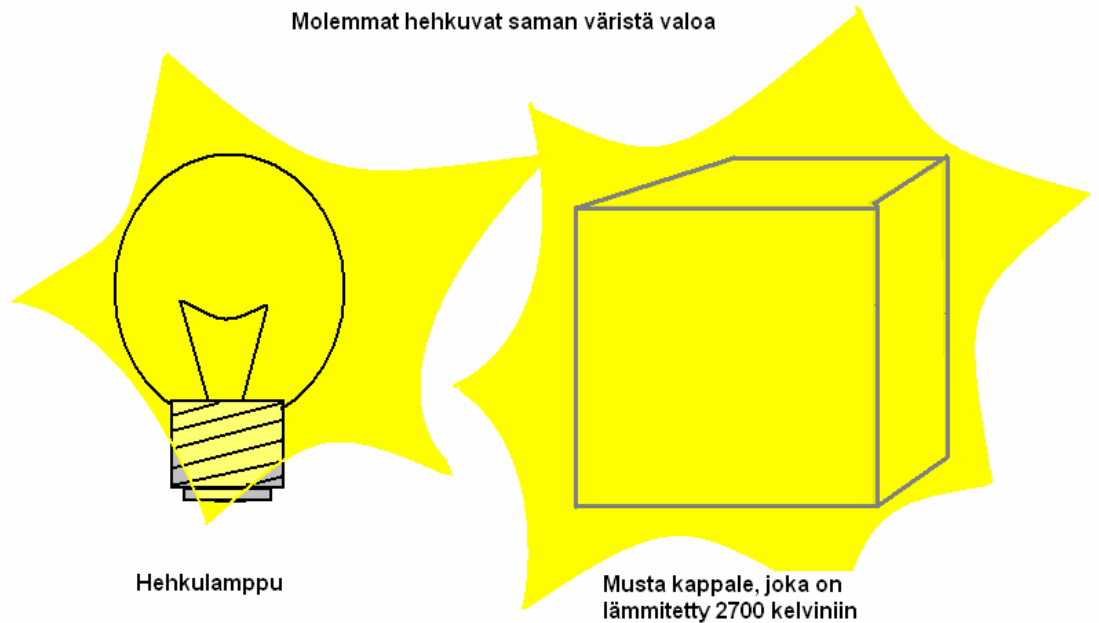


Kuva 3. Pinnasta mitattavan lämpötilan muodostuminen, mikäli säteilytehoa ei korjata emissiokertoimella.

On hankalaa erottaa, onko kappaleesta mitattu arvo sen oma lämpötila vai onko osittain kysymyksessä ulkopuolisesta säteilystä johtuva heijastus. Mittaustilanteessa tätä suhdetta pyritään korjaamaan muuttamalla kappaleen emissiokertoimeksi annettua arvoa. Kun pystytään määrittämään kappaleen emissiokerroin, voidaan myös eliminoida lämpötilalokista vääristäviä tekijöitä. Emissiokertoimen arvo voi vaihdella välillä $0 \rightarrow 1$. Kun kappaleen emissiokerroin on lähellä yhtä, kutsutaan sitä *mustaksi kappaleeksi*. Tällainen kappale ei heijasta säteilyä lainkaan vaan absorboi kaiken itseensä kohdistuvan säteilyn kaikilla aallonpituuksilla. Kun mustan kappaleen säteilylämpötila ylittää 525°C (977°F), ihmissilmä ei

havaitse sitä enää mustana. Kappale muuttuu kuumentuessaan ensin punahehkuseksi ja siitä lämpötilan yhä noustessa oranssista keltaiseksi. Tästä muodostuu kappaleen väriämpötilan määritelmä: Väriämpötila on se lämpötila, johon musta kappale tulee lämmittää, jotta saavutetaan sama näkyvän valon aallonpituus kuin tarkasteltavalla kohteella (kuva 4).

/1/



Kuva 4. Väriämpötilan muodostuminen. Mustaa kappaletta lämmitetään, kunnes se hehkuu samanväristä valoa kuin vertailtava kappale. Tämä mustan kappaleen absoluuttinen lämpötila määrittelee vertailtavan kappaleen väriämpötilan.

Mitattava suure lämpökameroilla on säteilyteho:

$$Q = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4 \quad (1)$$

jossa: Q = kappaleen säteilemä teho $\frac{W}{m^2}$

$$\sigma = \text{Stefan-Boltzmannin vakio, } 5,6705 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

ε = emissio kerroin

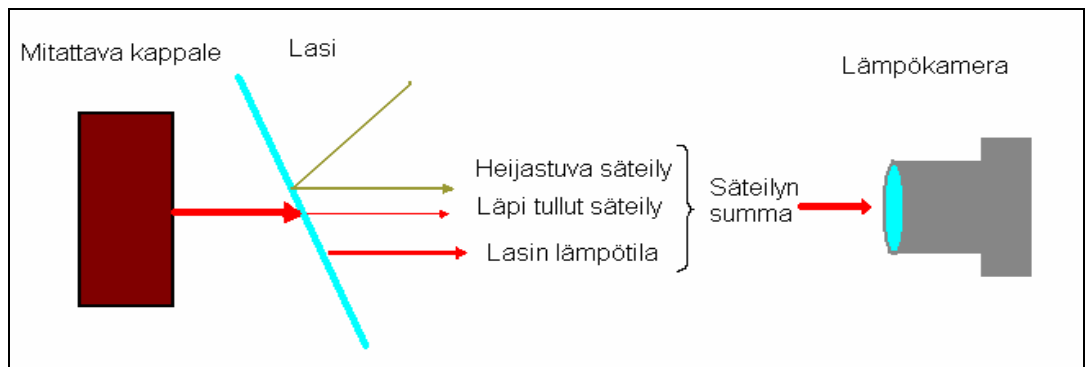
T^4 = absoluuttinen lämpötila neljänteen potenssiin

Kyseessä on Stefan-Boltzmannin kaava (Josef Stefan, 1835–1893, ja Ludwig Boltzmann 1844–1906). Kaavan mukaan mustan kappaleen kokonaissäteilyteho kasvaa verrannollisesti absoluuttisen lämpötilan neljänteen potenssiin. Siten musta kappale, jonka pinta-ala on 1 cm^2 , säteilee lämpötilassa 1000 K suunnilleen teholla 5,7 W. Tämänhetkisillä lämpökameroilla voidaan havaita jopa $0,02^\circ\text{C}$ lämpötilaero ja kuvaa voidaan tallettaa kameran muistin lisäksi myös videolle tai erillisille muistikorteille. /5/

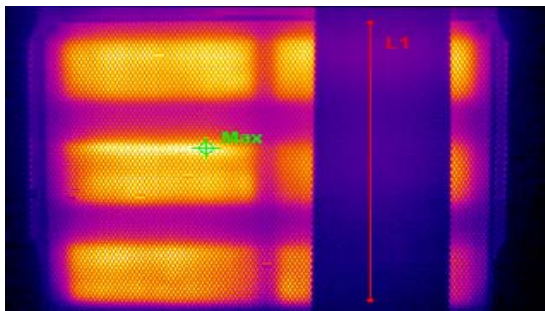
4 KEINOJA OIKEAAN KUVAAMISEEN

4.1 Kameran kalibrointi, etäisyys ja väliaineet

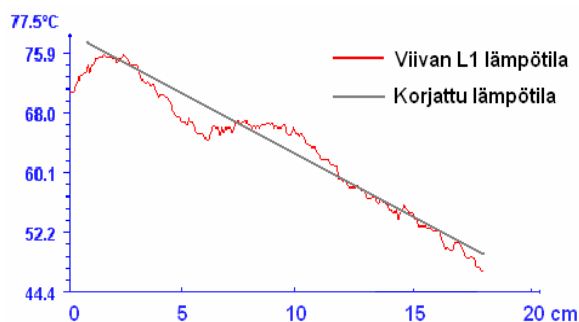
Onnistuneen kuvaustuloksen lähtökohta on se, että kamera on termisessä tasapainossa ympäristön kanssa. Tämän vuoksi kuvausympäristön lämpötilan muuttuessa tulee kameran lämpötilan antaa tasoittua noin 10 minuuttia ennen kuvaamisen aloittamista. Jos tilojen lämpötilaero on pieni, vain joitakin asteita, riittää kameran kalibrointi siinä olevalla kalibrointipainikkeella. Esteet kuvattavan kohteen ja kameran välistä tulee poistaa, koska kuvattava kohde määrytyy sen pinnan mukaan, joka on lähinnä kameraa. Esimerkkinä on tilanne, jossa kameran ja kuvattavan kohteen välissä on lasi. (Kuva 5 ja 6.) Lisäksi kuvaustulokseen vaikuttaa kuvattavan kappaleen ja lämpökameran välissä olevan lasin etäisyys kappaleesta sekä niiden välinen kulma (kuva 7). /6/



Kuva 5. Periaatekuva tilanteesta, kun kuvauskohteen ja kameran välissä on lasi.



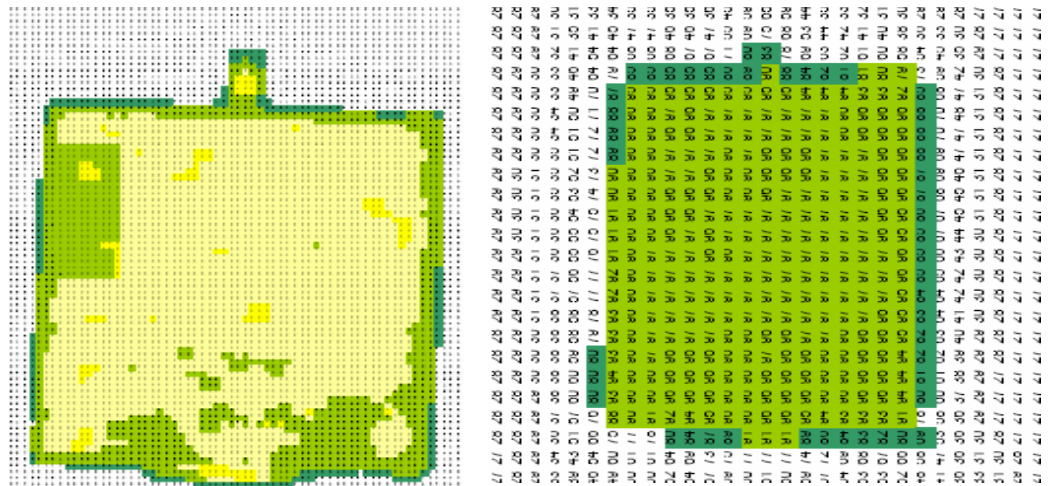
Kuva 6. Kuvaustulos kun kuvattavan säteilynlähteen ja lämpökameran välissä on 4mm paksu lasi, joka on aseteltu vinoon kuvan 5 mukaisesti. Kuvassa olevan viivan L1 lämpötilan käyttäytymistä etäisyyden funktiona voi tarkastella kuvasta 7.



Kuva 7. Lasista mitattu lämpötila etäisyyden funktiona.

Kuvattaessa tulisi aina pyrkiä mahdollisimman lähelle kuvauskohdetta, jotta ympäristön aiheuttamat häiriöt kuten ilman epäpuhtaudet, kosteus sekä kameran optiikan asettamat rajoitukset saadaan minimoitua (kuva 8). Kuten kuvasta voidaan havaita, kaukaa kuvattaessa osa tiedosta menetetään. Läheltä kuvattaessa saadaan kuvausalue pienemmäksi, jolloin turhan informaation, kuten taustan osuus, kuvassa pienenee. Kuva tarkennetaan aina mahdollisimman hyvin kohteeseen, jotta saadaan

- tarkemmat lämpötilamittaukset
- tarkempi diagnosointi
- terävä kuva
- kuva, jota kuka tahansa pystyy analysoimaan (asiakas tyytyväisyys).



Kuva 8. Kohde on kuvattu vasemmalla olevassa kuvassa 1,5 metrin etäisyydeltä ja oikean puoleisessa kuvassa noin 5 metrin etäisyydeltä. Kuvat on otettu lämpökameralla, jonka jälkeen ne on muutettu Excel-formaattiin. Jokaista kuvan pixeliä vastaa oma ruutu, joka sisältää kyseisen pixelin lämpötilan. Näin kuvista saadaan muodostettua lämpötilakartta. Kartasta voidaan havaita, että läheltä kuvattaessa saavutetaan suurempi tarkkuus: enemmän mittaustuloksia kuvauskohteesta ja laajempi lämpötila-alue. Lämpötilakartta on väritetty seuraavasti: tummanvihreä kuvaa lämpötila-aluetta 80– 89 °C, vaaleanvihreä 90– 99 °C, vaalean keltainen 100 °C ja kirkkaan keltainen yli 100 °C. Alle 80 °C:n lämpötiloja ei ole väritetty. Läheltä kuvattaessa saatiin korkeimmaksi lämpötilaksi 107 °C, kun taas kaukaa kuvatussa korkein lämpötila oli vain 97 °C.

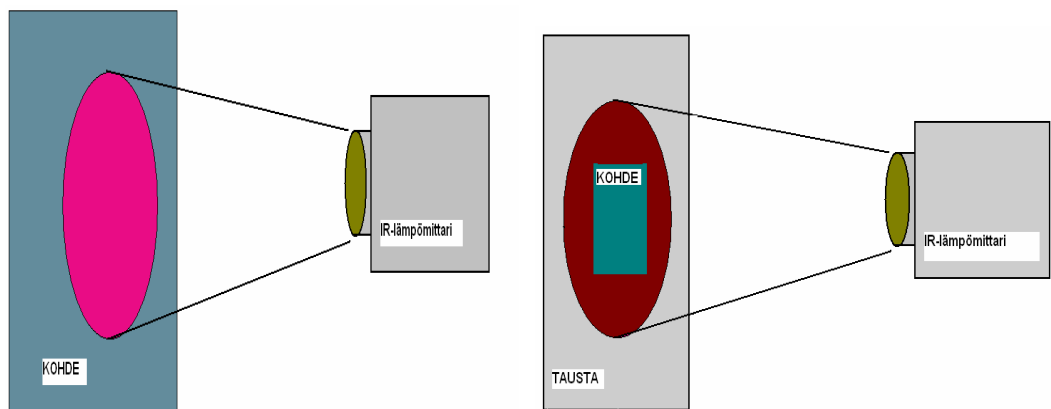
4.2 Infrapunakameran ja Infrapunamittarin keskeiset erot

Kuten kuvasta 8 voidaan havaita, lämpökamerakuva koostuu useista pixeleistä. Lämpökamerat mittaavat lämpötilan kuvausalueen jokaisesta pixelistä erikseen, joten kameraan asetettava emissiokerroin tulee määrittellä juuri sen pisteen tai alueen perusteella, jota kuvataan. Kuvattavan kohteen ympärillä olevista muista pinnoista ei tällä kuvauskerralla saada luotettavaa absoluuttista lämpötilatietoa, koska niiden emissiivisyyskerroin voi olla väärä.

Edullisemmat ja yleisemmin käytössä olevat infrapunalämpömittarit (kuva 9) mittaavat koko keilansa keskimääräistä lämpötilaa. Infrapunamittareissa ei ole optiikkaa, jolla voisi erottaa kohteesta eri lämpötila-alueita tai muodostaa kuvaa. Infrapunamittareita käytettäessä on aina syytä varmistua, että kuvattava pinta on laajempi kuin mittarin keila. Mittari ilmoittaa koko keilan keskimääräisen lämpötilan huolimatta siitä, täyttääkö kuvattava kohde keilan kokonaan (kuva 10).



Kuva 9. Infrapunalämpömittari, jossa myös kosketuslämpömittaus. Dual thermo AR-6501.



Kuva 10. Vasemmanpuoleisessa kuvassa infrapunalämpömittarin keila on pienempi kuin mitattava pinta-ala. Oikeanpuoleisessa kuvassa kohde on pienempi kuin mittausalueen koko, joten kuvaus alueen keskimääräinen lämpötila muodostuu kappaleen lämpötilan ja

taustan lämpötilan keskiarvosta pinta-alojen suhteessa. Kameran ilmoittama keskimääräinen lämpötila voidaan laskea kaavalla 2:

$$\text{mittaustulos} = \frac{A_K t_k + (A_Y - A_K) t_Y}{A_Y} \quad (2)$$

jossa,

$$A_Y = \pi \cdot r^2$$

r

$$A_K = a \cdot b$$

a

b

t_k

t_Y

mittauskeilan pinta-ala

mittauskeilan säde

kappaleen pinta-ala

kappaleen tai kohteen sivu

kappaleen tai kohteen toinen sivu

mitattavan kohteen lämpötila

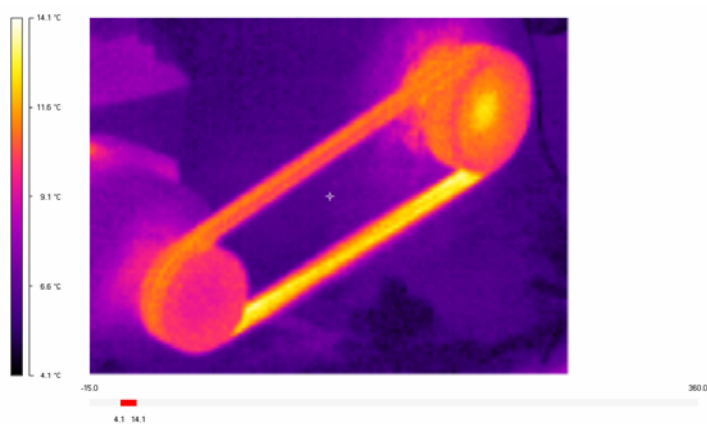
taustan lämpötila

Esimerkiksi jos kappaleen pinta-ala on 10 cm² ja sen lämpötila on 90 °C ja infrapunamittarin keilan pinta-ala on 30 cm² ja taustan lämpötila 24 °C, antaa mittari lämpötila-arvoksi 46 °C.

Infrapunamittarilla voidaan toteuttaa osittain samoja mittauksia kuin infrapunakameralla. Koska infrapunamittari mittaa koko keilansa keskimääräistä lämpötilaa ja antaa vain yhden lämpötila-arvon kuvauskertaa kohden, joudutaan mittauksia toistamaan useammasta kohdasta lämpötilaerojen havaitsemiseksi. Tämän vuoksi suurien pintojen tarkasteluun on lämpökamera tarkoituksenmukaisempi vaihtoehto.

4.3 Lämpötila-alueen ja väripaletin vaikutus

Infrapunakameralla kuvattaessa on syytä huomioida, että kuvattavan kappaleen lämpötilan ollessa lähellä ympäristön lämpötilaa ovat ympäristön häiriötekijät kriittisiä, koska kappaleen emittoima säteilyä on vaikea erottaa ympäristöstä aiheutuvasta säteilystä. Pieniä lämpötilaeroja mitattaessa on syytä pyrkiä arvioimaan mahdollisimman hyvin lämpötila-alueen laajuus ja asettaa se kameraan. Tällä tavoin saadaan kameran koko väripaletti käyttöön (kuvat 11 ja 12). Nykyaikaiset kamerat pystyvät suoriutumaan melko hyvin automaattisesta lämpötila-alueen määrittämisestä, mutta jos kuvattavassa kohteessa on hyvin kylmiä tai kuumia kohtia, voi ongelmia esiintyä. /6/

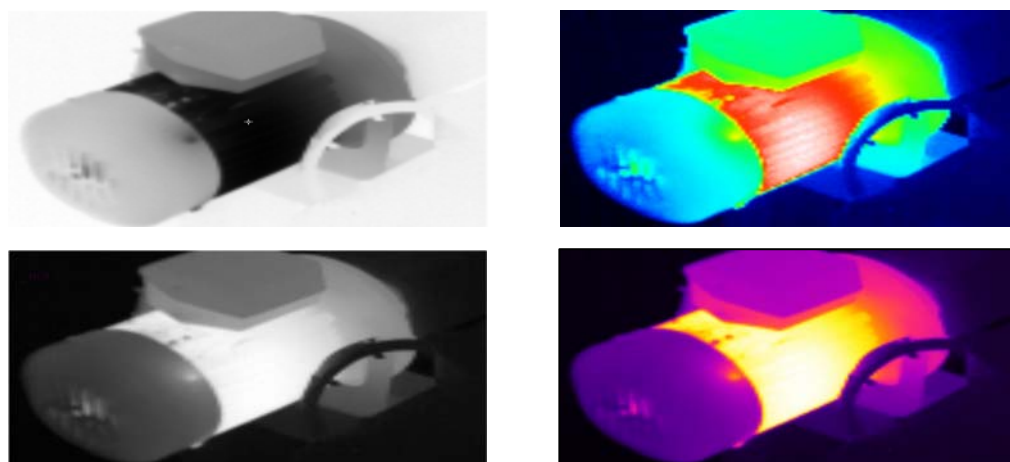


Kuva 11. Kuvassa lämpötila-alue on asetettu. /11/



Kuva 12. Kuvassa lämpötila-alue on liian laaja. /11/

Oikean väripaletin valinta helpottaa kuvaustilanteessa kriittisten pisteiden löytämistä. Nykyaikaisien kameroiden mukana tulevilla kuvien tarkasteluohjelmissa on ominaisuus, jolla voidaan kuvan väripaletti muuttaa tarpeen mukaan myös jälkikäteen (kuva 13).



Kuva 13. Flukun Ti20 -kameran eri väripaleteilla otettuja kuvia. Tulosteissa on käytetty seuraavia väripaletteja vasemmalta oikealle lueteltaessa: Grey reverse, Rainbow, gray ja Ironbow. Flukun Ti-20 -mallissa on valittavissa 4 väripalettiä ja IR928 -mallissa vaihtoehtoja on 8.

4.4 Emissiokertoimen määrittäminen

Koska emissiivisyyden määrittäminen voi olla toisinaan vaikeaa, voidaan apuna käyttää esimerkiksi seuraavanlaisia tapoja:

Tapa 1

- Mitattavaan kappaleeseen kinnitetään esimerkiksi teippi, jolla on suuri emissiivisyys ja annetaan sen lämpötilan tasaantua mitattavan kohteen mukaiseksi.
- Lämpökameralla mitataan lämpötila sekä teipin pinnasta että kohteesta, jonka emissiivisyys halutaan selvittää.
- Kameran emissiivisyysarvoa muutetaan kunnes kamera antaa saman lämpötila-arvon kuin teipattu pinta.
- Kappaleen emissiivisyys on se arvo, jolla kamera antaa saman lämpötila-arvon kuin teipin pinnasta mitattuna.

Tapa 2

Emissiivisyys voidaan määrittää myös kohteesta, josta tiedetään sen todellinen lämpötila.

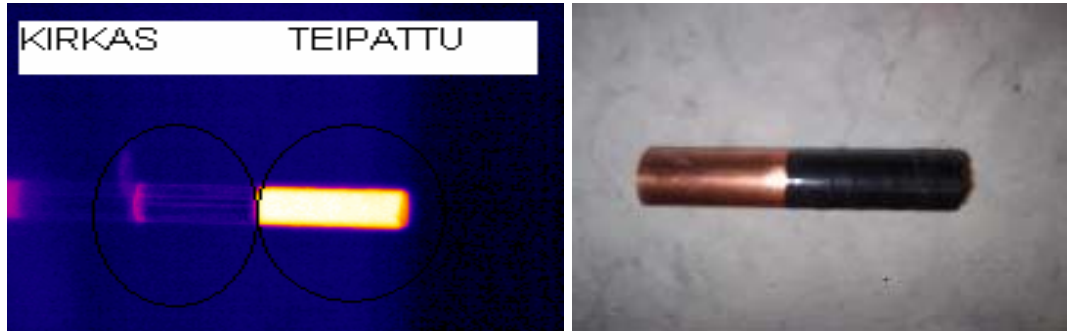
- Kappaleen pintalämpötila mitataan kosketuslämpömittarilla.
- Infrapunalämpökameralla otetaan kuva kohteesta ja muutetaan kuvan emissiivisyysarvoa kunnes kuvan lämpötila vastaa mitattua lämpötilaa.

Esimerkiksi teollisuusympäristössä emissiokertoimen määrittäminen kriittisistä kohteista, kuten säiliöistä tai moottoreista, olisi syytä tehdä laitteen tai prosessin osan käyttöönoton yhteydessä. Muussa tapauksessa menetetään infrapunalämpökameran ja -lämpömittarin suurin etu: kosketukseton lämpötilan mittaaminen. Emissiivisyyskerrointa on luonnollisesti turha määrittellä aivan kaikista pinnoista. Kertoimet kannattaa määrittellä ensisijaisesti niistä kriittisistä kohteista, joissa lämpötilamuutoksen aiheuttama riski on suurin ja tarvitaan absoluuttista lämpötila-arvoa.

4.5 Emissiokertoimen manipulointi

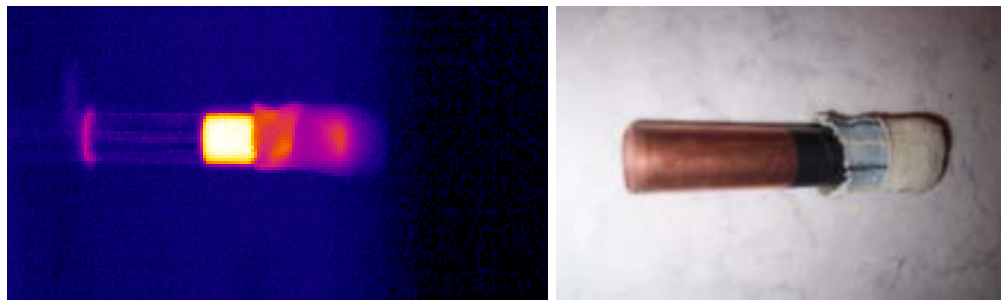
Vaikka lämpökamera ei varsinaisesti havaitse näkyvää valoa, se saattaa aiheuttaa lämpövaikutuksia kuvattavaan pintaan. Esimerkiksi jos kappaleen emissiivisyys on hyvin matala, saattaa näkyvä valo aiheuttaa heijastuksia, jotka kamera tulkitsee lämpösäteilyksi. Matala emissiivisyys kohteesta ($\varepsilon < 0,6$) voi mahdollisuuksien mukaan hakea esimerkiksi vahvasti korroosioistunutta pintaa, syvennyksiä, ruuveja, kumi- tai muovipintoja emissiokertoimen nostamiseksi. Tarpeen mukaan voidaan kuvattava kohde myös maalata, teipata tai päällystää muulla korkealla emissiivisellä aineella (kuva 14). Pintaa käsiteltäessä tulee uuden pinnan lämpötilan antaa tasoittua oikeaan lämpötilaan ennen

kuvaamista. Matala emissiivistä pintaa mitattaessa on todellinen lämpötila aina saatua lukemaa suurempi, mikäli kohde on suojattu ulkopuolelta tulevalta lämpösäteily aiheuttamilta heijastumilta. Jos emissiivisyyttä ei voida muuttaa tai on riski lämpösäteilyn heijastumisesta, on kohteesta syytä ottaa useampia kuvia eri kulmista, jotta saadaan kuvia analysoitaessa heijastumat karsittua pois./6/



Kuva 14. Kuvassa oleva kupariputki on kauttaaltaan saman lämpöinen, mutta sen oikea pää on teipattu mustalla muoviteipillä.

Pinnan esimissiivisyyttä muokattaessa on kuitenkin muistettava, ettei päällystä kohdetta eristävällä aineella, jolloin mittaustulokseksi saadaan kappaleen lämpötilan sijasta eristeen lämpötila (kuva 15). Lisäksi mittaukset tulee tehdä mahdollisimman kohtisuorassa pintaa kohden, jotta näennäinen emissiivisyys ei laske. Heijastumilta voidaan osittain välttyä kun käytetään suojia kuvattavan kohteen ympärillä.

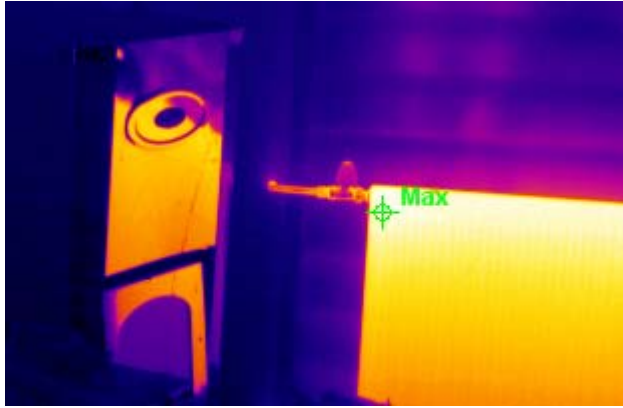


Kuva 15. Eristeen vaikutus kuvaustulokseen. Kuvassa on sama putki kuin kuvassa 14. Kupariputken teipattuun päähän on laitettu suojakäsineen sormiosa. Kuvan putki on kauttaaltaan saman lämpöinen.

4.6 Heijastumien eliminointi

Eryisesti matala emissiivistä tai hyvin sileää kohdetta kuvattaessa tulee kuvaustilanteessa huomioida kohteen suojaaminen lämpöheijastumilta. Varsinaisen kuvauskohteen ympäristössä olevat lämpimät pinnat kuten valaisimet ja lämmittimet, saattavat säteillä kuvattavan kohteen pintaan lämpösäteilyä, joka ei juuri lämmitä itse kohdetta, mutta saattaa vääristää lämpökuvaa oleellisesti (kuva 16). Mikäli säteilyn aiheuttajaa ei voida

poistaa, on kuvauskohte syytä suojata suoralta säteilyltä. Suojautuminen ympäriltä tulevalta säteilyltä tapahtuu parhaiten asettamalla kuvauskohteen ja säteilyn lähteen väliin eristävää materiaalia. Jos kuvattavaan kappaleeseen kohdistuva lämpösäteily on peräisin pääosin yhdestä suunnasta, voidaan sen aiheuttamia virheitä vähentää ottamalla kohteesta kuvia hieman eri suunnista.



Kuva 16. Kiuas heijastaa lämpöpatterista lähtevää lämpösäteilyä

4.7 Ympäristön huomioiminen kuvaamisessa

Erityisesti ulkona kuvattaessa tulee huomioida sellaiset ympäristön asettamat vaatimukset kuten ilmankosteus, epäpuhtaudet, etäisyys kohteesta ja auringonvalo. Runsas ilmankosteus ja epäpuhtaudet saattavat aiheuttaa jo lyhyilläkin välimatkoilla muutoksia lämpökameran mittaustuloksiin. Tämä johtuu siitä, että lämpösäteilyn törmätessä ilmassa olevaan vesimolekyylisiin tai hiukkaseen, lämpösäteily osittain siroaa ja osittain absorboituu siihen. /13/ Joissakin kameroissa ilmankosteus voidaan ottaa huomioon kameras kuvausasetuksissa kuten IR928- kamerassa asettamalla ilmankosteusprosentti arvioitua tai mitattuun arvoon. Yleensä pitäisi kuitenkin pyrkiä valitsemaan kuvausajankohta tai luomaan kuvausolosuhteet sen mukaiseksi, ettei ilmankosteudesta aiheudu merkittävää haittaa kuvaukselle. Likaisissa ja kosteissa olosuhteissa on erityisen tärkeää suorittaa kuvaaminen mahdollisimman läheltä. Aurinkoisella ilmalla mitattaessa tulee erityisesti matala emissiivisistä kohteesta ottaa vähintään kaksi kuvaa, jotta voidaan kuvia vertailemalla eliminoida niistä auringonsäteilyn aiheuttamat virheet.

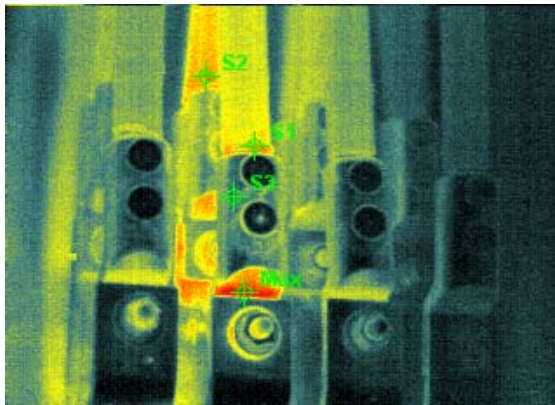
5 KUVIEN ANALYSOINTI

Lämpökuvien analysoinnin lopputulos riippuu käytetyistä kuvausmenetelmistä, käytettävissä olevasta lämpökamerakuvien lukumäärästä ja mahdollisista kohteesta otetuista valokuvista. Lämpökuvien analysointi on helpointa suorittaa kuvauspaikalla tai mikäli kohteesta on käytettävissä valokuvia. Lähtökohdana kuvien analysoinnissa on se, että kuvaushetkellä on otettu huomioon mahdolliset olosuhteiden aiheuttamat riskit virheisiin. Tämän lisäksi on oltava käsitys kuvauskohteen lämpökäyttäytymisestä ja emissiivisyy-

destä. Aina näin ei kuitenkaan ole. Esimerkiksi jos haetaan rakennusten ulkoseinistä lämpövuotoja, kuvattava ala on usein niin suuri, että siihen mahtuu mukaan emissiivisyydeltään erilaisia pintoja. Jos kameran emissiivisyys on asetettu edellä mainitussa tapauksessa esimerkiksi ulko-laudoituksen mukaan ja kuvasta halutaan tietää muutakin kuin ulkolaudoituksen lämpötila, tulee lämpötilan arvioinnissa huomioida emissiivisyyden vaikutus.

5.1 Emissiivisyyden huomioiminen analysoinnissa

Oikean informaation löytäminen vaatii kappaleen emissiivisyyden ymmärtämistä (ks. 2.2 ja 3.5). Kuvan 15 kupariputken teippaamaton pää näyttää olevan huomattavasti viileämpi kuin putken teipattu pää. Tämä kyseinen ilmiö tulee vastaan usein kuvauksia suorittaessa (kuva 17).



Taulukko 1. Kuvan 17 lämpötila-arvot

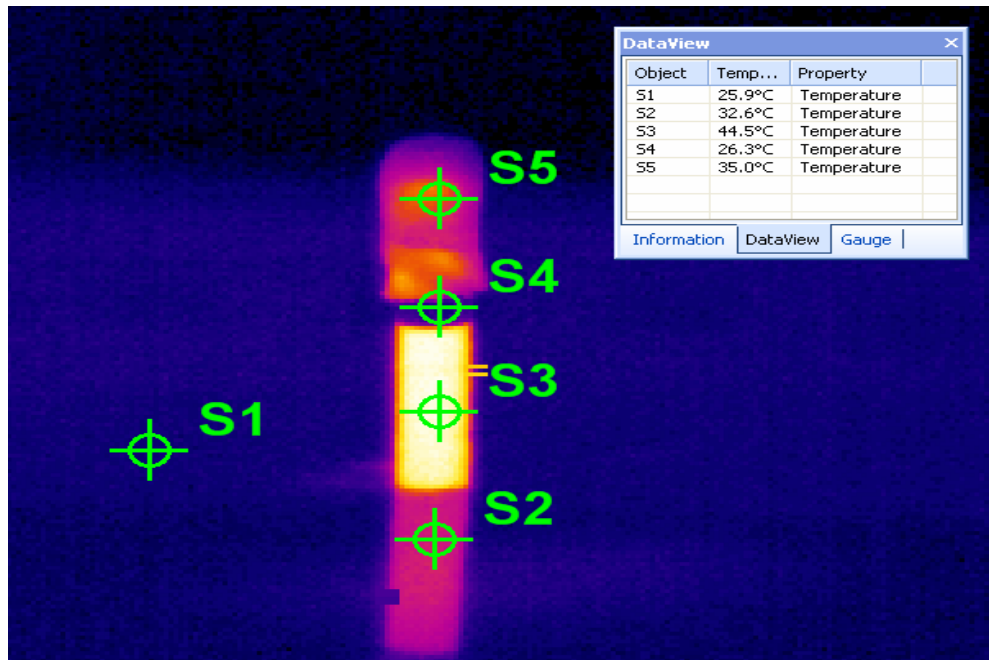
MAX	96	°C
S1	87	°C
S2	86,7	°C
S3	63,7	°C

Kuva 17. Emissiivisyyden vaikutus kuvauskohteessa

Kuvassa 17 olevat kaapelit ovat mustia ja kaapelikengät ovat mattapintaista alumiinia. Kuvasta nähdään, että kaapeleiden lämpötila on 86–96 °C ja kengän lämpötila on vain n. 64 °C. Todellisuudessa sekä kaapelit että kaapelikengät ovat likimain saman lämpöisiä, kun huomioidaan kaapelien ja kaapelikengien emissioerot.

5.2 Heijastuminen

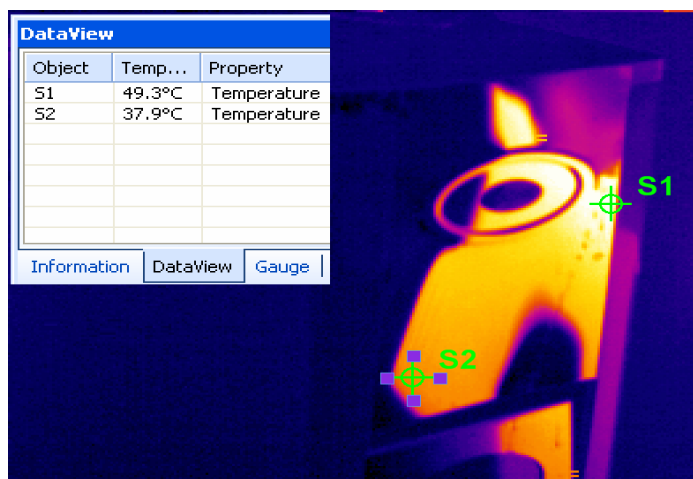
Infrapunakameralla otetuissa kuvissa heijastumisella tarkoitetaan tilannetta, jolloin kuvasta voidaan lukea lämpötila-arvo, joka ei ole kappaleen itsensä emittoimaa lämpösäteilyä vaan on peräisin jostakin ympäristössä olevasta säteilyn lähteestä (kuva 18). Vaikka kohteen emissiokerroin olisi määritelty oikein, voi kappaleen välittömässä läheisyydessä olevat heijastukset johtaa kuvien tulkitsijan harhaan. Tilanteen mukaan voi heijastuksia virheellisesti tulkita esimerkiksi lämpötilan johtumiseksi tai saada väärän käsityksen ympärillä olevan materiaalin lämpötilasta.



Kuva 18. Putken aiheuttama heijastuma

Kuvassa 18 on osittain eristetty putki. Putki on kauttaaltaan tasalämpöinen (vertaa kuvat 14 ja 15). Kuvasta voidaan havaita, että pöytä, jonka päälle putki on asetettu, näyttää lämmenneen (kohta S2). Kuvasta nähdään myös, miten eriste paljastaa putken olevan todellisuudessa kuuma myös toisesta päästään (kohta S5). Kohdassa S4 näkyvä alue on kirkasta kuparia, joka näyttää olevan lähellä ympäristön lämpötilaa alhaisen emmissiokertoimen vuoksi.

Heijastumat voi erottaa todellisesta lämpenemisestä usein heijastuman muodon perusteella. Kuvia analysoitaessa on tärkeää, että kuvaushetkellä on huomioitu mahdolliset ympäristön säteilyn lähteet. Lämpökamerakuvia tulkitsevan henkilön on tunnettava hyvin kuvauskohteen lämpökäyttäytyminen pystyäkseen arvioimaan, onko kohde voinut lämmetä jonkin prosessin seurauksena kuvan esittämällä tavalla vai onko kysymyksessä heijastunut komponentti. Heijastumien eliminointi on huomattavasti helpompaa, jos kohteesta on käytettävissä useampia lämpökamerakuvia, jotka on otettu eri kulmista (kuvat 19 ja 20). Erityisesti hankalissa tilanteissa voi kohteesta otettu valokuva olla ratkaisevassa asemassa oikeaan lämpökamerakuvan tulkintaan (kuva 21).



Kuva 19. Heijastumisesta aiheutuva virheellinen mittaustulos



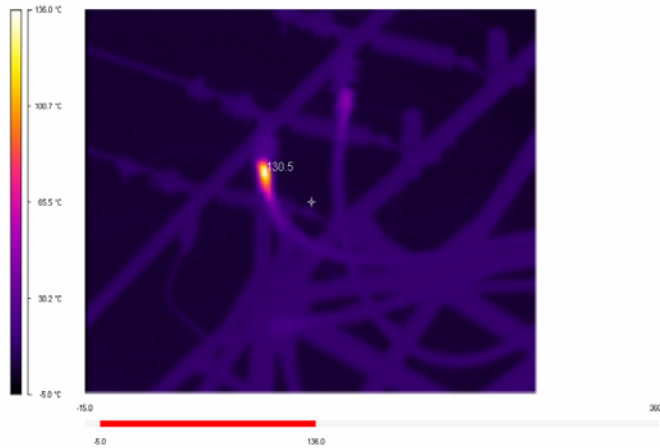
Kuva 20. Heijastavasta pinnasta otettu toinen kuva virheiden eliminoimiseksi



Kuva 21. Valokuva analysoitavasta kohteesta

5.3 Poikkeaman löytäminen vertaamalla

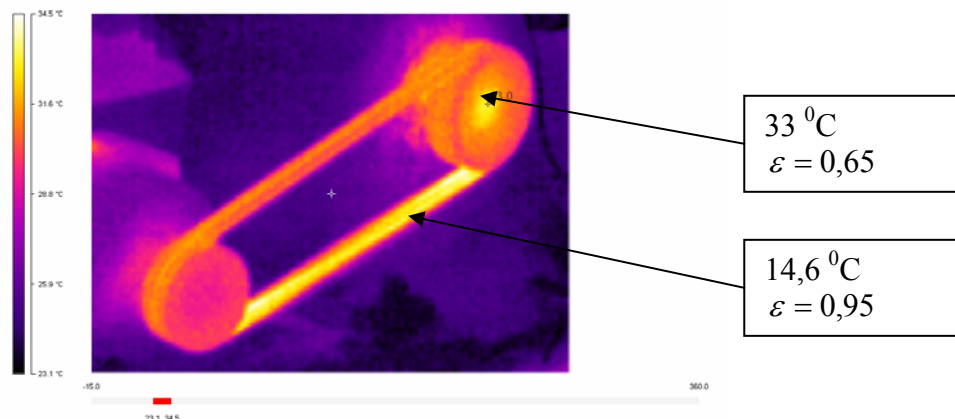
Yksinkertaisinta lämpökamerakuvien tulkinta on silloin, kun kuvasta voidaan lukea suoraan lämpötilaero täysin vastaavaan pintaan nähden. Tällaisissa tapauksissa ei tarvitse huomioida heijastumisia, emissiokertoimia tai ympäristön asettamia vaatimuksia. Riittää, että kuvauskohte ja vertailupiste ovat molemmat samassa asemassa heijastuksien ja muiden kuvaan vaikuttavien ominaisuuksien suhteen kuten kuvassa 22, joka on otettu melko kaukaa sähkölinjoista. Kuvan tapauksessa ei ole välttämätöntä tietää kuuman kohdan absoluuttista lämpötilaa, koska siitä on helposti havaittavissa, että muut täysin samanlaiset liitoskohdat ovat huomattavasti kylmempiä. Valitettavasti aina ei ole kuitenkaan mahdollista suorittaa vastaavaa vertailua samanlaisten pisteiden välillä.



Kuva 22. Lämpökamerakuvaaminen on helpointa jos kuvasta löytyy käyttökelpoinen vertailupiste eikä ole tarpeen tietää absoluuttista lämpötilaa.

5.4 Vikapaikan määrittäminen.

Automaattisella lämpötila-alueella kuvattaessa saadaan helposti kuvan 23 mukaisia kuvia. Tarkemmin kuvaa tutkimatta näyttää siltä, että kuvan kiilahihna on kuumentunut pahasti ja toimenpiteeksi suositeltaisiin kiilahihnan vaihtoa ja laippojen yhdenkeskisyyden tarkastamista toisiinsa nähden. Kiilahihnan emissiivisyys on noin 0,97. Kiilahihnan korkein lämpötila on 14,6 °C, mutta kun muutetaan mitattavan kohteen emissiivisyys vastaamaan kiilahihnan laippoja, jotka ovat hapettunutta alumiinia, annetaan arvoksi 0,65. Kuvasta voidaan havaita, että oikeanpuoleinen laippa kohdasta, johon systeemin akseli kiinnittyy, on kyseisellä emissioarvolla 33 °C. Toisella mittauksella mahdolliseksi vikapaikaksi näyttääkin muodostuvan oikeanpuoleisen systeemin akselin etupuolen laakerointi.



Kuva 23. Todellisen vikapaikan määrittäminen. /11/

5.5 Vian kriittisyyden arviointi

Automaattisella lämpötila-alueella kuvattaessa tulkitaan kohteen lämpenemä helposti kriittiseksi, koska kamera asettaa olemassa olevalle lämpötila alueelle kaikki käytössä

olevat värit. Tämän ansiosta kuvasta voidaan löytää helposti kuumat tai kylmät kohdat. Kuvaa tulkittaessa tulee kuitenkin muistaa, että kuumalta näyttävä kohta ei välttämättä ole kuuma, sillä kuvasta tulisikin aina tarkastaa, mitkä ovat sen suurin ja pienin lämpötila-arvo. Aivan kuten kuvassa 23, näyttää ensi katsomalla siltä, että toimenpiteitä tarvitaan, mutta kun huomioidaan kuvassa olevat lämpötilat, ei kyseiseen tulokseen mahdollisesti enää päädytäkään. Kuvassa ympäristön lämpötila on n. 6 °C. Kiilahihnasta mitattu maksimi lämpötila on 14,6 °C ja laipoista maksimiarvo on 33 °C. Normaalin lämpötila-alueen rajaarvot määritellään huomioimalla se, mitä kiilahihna pyörittää ja sen mukaan, millaisesta systeemistä on kysymys. Jos lämpötilan ylärajaksi on määritelty esimerkiksi 50 °C, näyttää kuva vähemmän hälyttävältä. (Kuva 24).



Kuva 24. Mittausalueen alaraja on määritelty ympäristönlämpötilan mukaan 5 °C sekä arvioitu kriittisyyspiste eli tässä tapauksessa 50 °C /10/.

5.6 Suurien kohteiden analysointi

Suuria kohteita, kuten talojen seiniä mitattaessa on huomioitava samat seikat kuin pienempiäkin kohteita mitattaessa, mutta tässäkin tapauksessa tulee muistaa määritellä emissiokerroin sen pinnan mukaan, josta halutaan saada absoluuttiset mittaustulokset. Suuria pintoja kuvattaessa onkin järkevää verrata samassa kuvassa olevia eri pisteitä toisiinsa, kuten kuvassa 25 talon seinän keskiosa ja ikkuna alaosa. Kuvasta voidaan havaita että talon eristyksenä oleva sahanpuru on saattanut painua ikkunoiden alta. Tässäkin tapauksessa ei välttämättä tarvita absoluuttisia lämpötilaarvoja, vaan kuvaamisella haettu lopputulos on saavutettu, kun on löydetty mahdolliset riskipaikat. Mikäli kuvasta halutaan kuitenkin määrittää talon pinnan todellinen lämpötila esimerkiksi kastepisteen kohdan määrittämiseksi, toistetaan kuvaaminen ongelmakohdista aiemmin esitettyjen ohjeiden mukaan mm. siirtymällä lähemmäs kohdetta ja asettamalla emissiokerroin kuvattavan pinnan mukaiseksi. Edellä mainittujen ohjeiden mukaisesti voidaan esimerkiksi ikkunoita (ei lasiosia) vertailla keskenään mahdollisten

ongelmakohtien kartoittamiseksi ja absoluuttiset arvot saadaan jälleen muuttamalla emissiokerroin ikkunankarmien mukaiseksi.



Kuva 25. Talossa olevien ikkunoiden alareunat ovat lämpimämpiä kuin kuvan seinät keskimäärin. /5/

Ikkunoiden alapuolella olevat lämpimät paikat voivat olla merkki eristeen painumisesta tai kyseessä voi olla myös tavallinen tilanne: ikkunoiden alla olevat lämpöpatterit ovat olleet pitkään toiminnassa. Seinät ovat sisäpuolelta pattereiden kohdalta kuumempia kuin huoneilma, joten luonnollisesti suurempi määrä lämpövirtaa (kaava 3) läpäisee näiltä kohdin eristeitä.

$$\Phi = \frac{A(T_1 - T_2)}{\sum_{i=1}^N \frac{d_i}{\lambda_i}} \quad (3)$$

Kaavan merkkien selitykset:

Φ = Läpi tuleva lämpövirta (W)

A= Rakenneosan pinta-ala (m²)

T₁= Sisälämpötila (K)

T₂= Ulkolämpötila (K)

d_i= Eristeaineen paksuus (m)

λ = Materiaalin ainevakio, lämmönjohtavuus ($\frac{W}{m \cdot K}$)

Kaavasta voidaan havaita, että erotuksen T₁- T₂ kasvaessa myös lämpövirta suurenee. /1/

6 LÄMPÖKAMERAKUVAUS OSANA SÄHKÖJÄRJESTELMIEN KUNTOTUTKIMUSTA

Tampereen ammattikorkeakoulussa toteutettiin syksyn 2006 aikana sähköjärjestelmien kuntotutkimus, jonka tarkoituksena oli kartoittaa normaalissa käyttötilanteessa pääkeskus kahden, PK2, sähköinen tila. Sähköinen tila määritellään arvioimalla keskusalueen tehoja, virta- ja jänniteylijäältoja, N- ja PE -virtoja sekä loistehon kompensointilaitteistojen kuntoa ja soveltuvuutta. Työssä käytettiin Fluke 41 -tehoanalysointia sekä sähkölaatuanalysointilaitteita: Dranetz PP1 ja PX5. Lisäksi yhtenä työkaluna käytettiin IR928 -lämpökameraa. Seuraavissa luvuissassa kerrotaan työn eteneminen vaihe vaiheelta.

6.1 Virtateiden lämpenemiseen vaikuttavat sähköiset suureet

Resistanssilla R tarkoitetaan kappaleen kykyä vastustaa sähkövirran kulkua. Resistanssi aiheuttaa sähköjohtimissa tehohäviötä, joka näkyy suoraan johteen lämpötilan nousuna (kaava 4). Sähköjohteiden sähköjohtavuus heikkenee lämpötilan noustessa. Pienillä lämpötila-alueilla $\pm 100\text{ }^\circ\text{C}$ tätä ominaisuutta voidaan pitää lineaarisena. Kaavassa 5 lämpötilakerroin α kerrottuna lämpötilaerolla antaa suhteellisen resistiivisyyden ρ , joka on tyypillisesti aineella noin 40 % / $100\text{ }^\circ\text{C}$. Kaavassa on kuvattu kuparin resistiivisyyden nousua lämpötilan funktiona. /7/

$$P = \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R \quad (4)$$

Kaavassa: P= Teho [W]
 U=Jännite [V]
 R=Resistanssi [Ω]
 I=Virta [A]

$$\frac{\rho - \rho_o}{\rho_o} = 4 \cdot 10^{-3} / K \times 100K = 0,4 \approx 40\% \quad (5)$$

Kaavassa: ρ =Resistiivisyys lämpötilassa1 [$\Omega \cdot m$]
 ρ_o =Resistiivisyys vertailulämpötilassa [$\Omega \cdot m$]

Taulukko 2. Eri materiaalien resistiivisyysarvoja. /1/

Aine	ρ ($\cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$)	α ($\cdot 10^{-3} K^{-1}$)
Kupari	1,678	6,8
Alumiini	2,655	4,3
Messinki	7	14,5
Rauta	9,71	6,51

Metallien resistiivisyys muuttuu lämpötilan mukaan, joten se vaikuttaa myös sähkönsiirtoon tarkoitettujen kaapeleiden ja kiskojen ominaisuuksiin. Vaihtovirtajärjestelmissä on lisäksi huomioitava vaihtovirran aiheuttama impedanssi Z (kaava 7). Impedanssiin sisältyy resistanssin lisäksi induktiivinen reaktanssi X_L (kaava 8) sekä kapasitiivinen reaktanssi X_C (kaava 9), jotka muuttuvat taajuuden f funktiona. Impedanssin riippuvuus taajuudesta aiheuttaa sen, että kappaleen läpikulkevan virran yliaaltopitoisuus vaikuttaa myös kaapelin lämpenemiseen. Yliaaltopitoisuudella tarkoitetaan siirtoteillä kulkevan sähkönsisältämää muuta kuin nimellistaajuutta edustavaa virtaa. Yliaaltopitoisuus, THD Rms, ilmoitetaan usein prosentteina. Esimerkiksi jos virraksi I on mitattu 200 A ja yliaaltoprosentiksi THD Rms on saatu 10 %, on virrasta 20 A muuta kuin nimellistaajuudella olevaa virtaa. /2/

Kaavasta 6 voidaan todeta, että myös johteen läpi kulkeva virta vaikuttaa lineaarisesti sen lämpenemiseen. Sähkönsiirrossa nämä ominaisuudet huomioidaan siirtotien mitoituksessa. Siirtotiet mitoitetaan ympäristön lämpötilan sekä läpimenevän virran suuruuden mukaan siten ettei lämpenemistä tapahdu. Olosuhteiden tai kuormitusilanteiden muuttuessa nämä seikat saattavat kuitenkin jäädä huomioimatta. Juuri tämän tyyppisiä tilanteita haetaan sähköverkon kuntotutkimuksissa

$$\text{Impedanssi } Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = [\Omega] \quad (7)$$

$$\text{Induktiivinen reaktanssi: } X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot l = [\Omega] \quad (8)$$

$$\text{Kaavassa: } f = \text{taajuus } [Hz]$$

$$l = \text{induktanssi } [H]$$

$$\text{Kapasitiivinen reaktanssi: } X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = [\Omega] \quad (9)$$

$$\text{Kaavassa: } C = \text{kapasitanssi } [F]$$

6.2 Työn eteneminen

Työ päätettiin toteuttaa liitteen 4 mukaisesti. Ensin kuvattiin ja mitattiin muuntajan T2 syöttö keskukselle PK2. Tämän jälkeen tutkittiin PK2:lta lähteviä syöttöjä nousukeskuksille NK ja jakokeskuksille JK, joista edelleen tehtiin ryhmäkohtaisia mittauksia tarpeen vaatiessa.

6.3 T2 ja PK 2 väliset mittaukset

T2 ja PK2:n väliset virtakiskojen liitokset ja kuormitus olivat kunnossa, koska lämpökameralla ei havaittu lämpötilojen nousua kyseisissä paikoissa. Fluke 41 -mittarilla tehdyssä mittauksessa saatiin kuormitusarvoiksi keskimäärin 500 A ja virran yliaaltoprosentiksi THD Rms n. 12 %. Mittaustulokset ja lämpökameralla tehdyt kuvaukset tukevat toisiaan. Koska syöttö oli mitoitettu 1000 A:iin asti, ei kyseisellä 50 %:n kuormituksella lämpötilan nousua ilmene.

6.4 PK2:lta lähtevien B-talon jakokeskuksien sekä A- ja C- talon nousukeskuksien syöttöjen mittaukset

PK2:lta keskuksille lähtevissä sähkösyötöissä ei havaittu lämpökamerakuvauksissa yhtä lähtöä lukuun ottamatta (NKC001) lämpötilojen muutoksia. Kyseisen lähdön lämpenemisen syitä analysoidaan tarkemmin luvussa 5.6. Kuormituksen mittauksessa kävi ilmi, että kaikki jako- ja nousukeskuksien syötöt oli mitoitettu siten, että kuormitus normaalissa käyttötilanteissa oli vain noin 50 % tai alle. Sähkön laatumittauksissa saaduista tuloksista kävi ilmi, että osassa syötöistä virran yliaaltopitoisuudet olivat korkeat. Taulukosta 4 selviää nousukohtaisen mittausraportin sisältö tarkemmin. Suurin virran yliaaltopitoisuus löytyi JK_B_Hissit1 ja PK2:en välisestä nousukaapelista, jossa virran yliaallon osuus liikkui 20 % ja 70 % välissä.

Kaikki keskusten väliset syötöt mitattiin ja sähkökeskuksista, joiden syötöissä havaittiin suuria yliaaltopitoisuuksia, tehtiin tarkempia mittauksia, joissa selvitettiin yliaaltojen lähde aina ryhmänumero tasolle asti. Suuret, kolmella jaolliset yliaaltopitoisuudet, aiheuttavat sähköverkkoon häiriöitä ja ne lisäävät kuormitusta sähköjärjestelmien nollajohtimissa. JK_B_Hissit1 tapauksessa virran mitoitusarvosta 50 A oli käytössä vain noin 2–20 % vaiheen mukaan ja lisäksi käyttö oli luonteeltaan satunnaista, joten lämpökameralla ei kyseisestä tapauksesta saada informaatiota.

Taulukko 4. Esimerkki nousukohtaisesta mittausraportista.

PK 2 ; NK C001

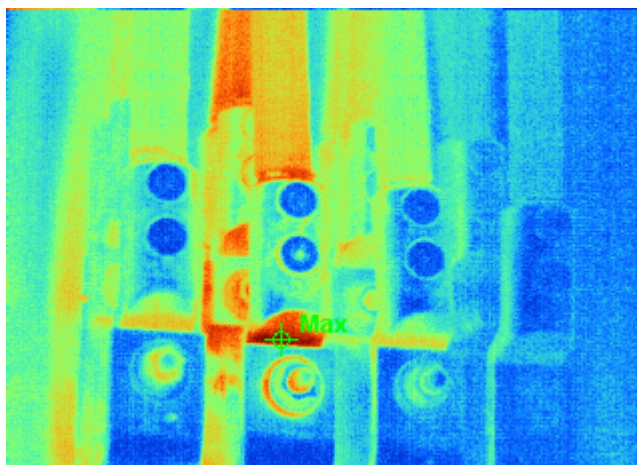
600 A

Teho	L1	L2	L3	Jännite	L1	L2	L3
KW	61,8	56,4	38,6	RMS	232,6	233,6	234,2
KVA	64,2	58,4	40,4	Peak	321,6	324,7	327
KVAR	0,8	0,8	3,4	DC Offset	-0,1	-0,2	-0,2
Peak KW	163,6	144,6	105,6	Crest	1,38	1,39	1,4
Phase	1° lag	1° lead	5° lag	THD Rms	2,62	2,66	2,25
Total PF	0,96	0,97	0,96	THD Fund	2,62	2,67	2,25
DPF	1	1	1	HRMS	6,1	6,2	5,3

Virta	L1	L2	L3	N	PE
RMS	276,4	249,6	172,88	193,24	2,36
Peak	507,6	446,8	324,94	369,66	4,76
DC Offset	-5,4	-4,6	-0,64	-0,48	-0,04
Crest	1,84	1,79	1,88	1,91	2,02
THD Rms	26,31	25	28,71	88,37	74,78
THD Fund	27,27	25,82	29,97	188,82	112,62
HRMS	72,6	62,4	49,62	170,6	1,76
KFactor	2,26	2,15	2,6	**OL**	**OL**

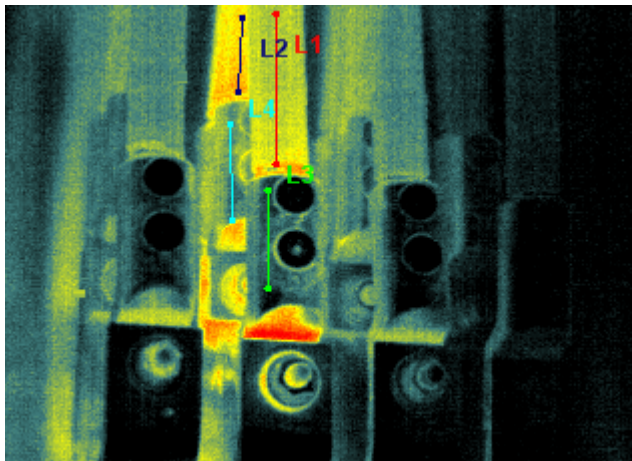
6.5 PK2:n ja NKC001:n välisen syötön lämpenemisen syiden analysointi

Kun liitteen 1 mukaiset kuvaamiseen liittyvät alkutoimenpiteet on suoritettu ja tarvittavat lämpökamerakuvat on otettu, voidaan siirtyä kuvien analysoimiseen. Lämpökameroiden mukana tulevan ohjelmiston ominaisuuksien avulla voidaan kuvia tulkita helposti. Varsinaiseen ohjelman asentamiseen ei tässä työssä oteta kantaa. Lämpökamerakuvien analysoinnissa voisi seuraavanlainen toimintajärjestys tulla kyseeseen: tutkitaan NKC001:n lämpökamera kuvaa (kuva 20).



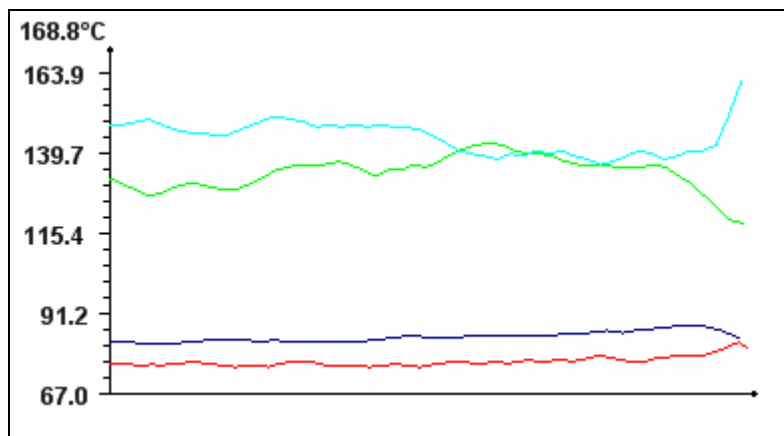
Kuva 20. Analysoitava lämpökuva

- a. Avataan kuva siihen soveltuvalle analysointiohjelmalle. Tässä tapauksessa IrAnalyser 1.4 -ohjelmalla.
- b. Suurennetaan kuva riittävän isoksi suurennuslasi-työkalun avulla.
- c. Valitaan sopiva väripaletti. Tässä tapauksessa valitaan paletti numero 5.
- d. Muokataan kuvan lämpötila-alueita. Image → Gauge settings. Nostetaan alalämpötilaa hieman, jotta saadaan karsittua kuvasta turhaa informaatiota pois. Tässä tapauksessa alalämpötilaa nostettiin 47,6 °C:sta 54,1 °C:een.
- e. Asetetaan kuvaan neljä viivaa line-työkalulla seuraavasti: valitaan line-työkalu, painetaan hiiren vasenta nappia viivan alkamiskohdassa ja pidetään se pohjassa samalla kun vietään hiiri kohtaan jossa viivan halutaan päättyvän. Tämä toistetaan, kunnes haluttu määrä viivoja on piirretty (kuva 21). Viivoja voidaan muokata painamalla hiiren oikeanpuoleista painiketta ja valitsemalla 'property'. Avautuvasta ikkunasta voidaan muuttaa viivakohtaisia asetuksia kuten väriä, lämpötilojen näyttöä ja emissiivisyyttä. Viivaan voidaan myös tarttua, jotta sen pituutta ja sijaintia voidaan muuttaa. Tässä tapauksessa muutettiin kaikkien viivojen värit ja lisäksi viivojen 3 ja 4 emissiivisyysarvot lähemmäs totuutta. Liitteen 3 mukaan tämä arvo on 0,31.



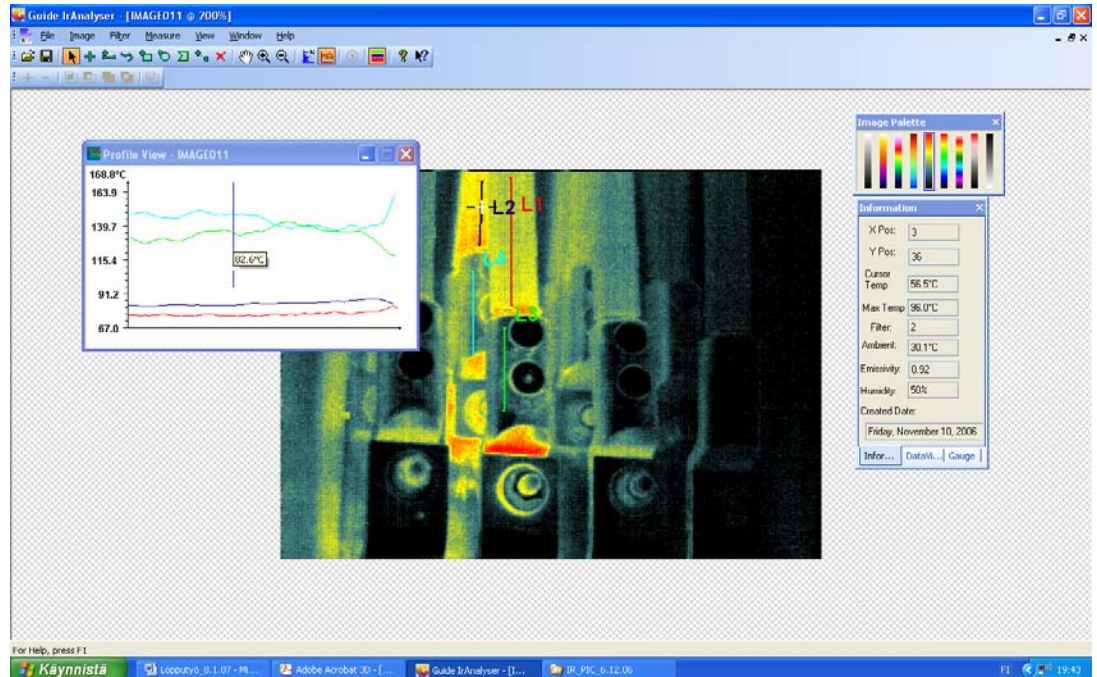
Kuva 21. Lämpökamerakuva muokkaamisen jälkeen

- f. Valitaan profile view-työkalu, jolloin avautuu kuvan 22 mukainen ikkuna.



Kuva 22. Profile view -ikkuna. Kuvassa näkyy kuvan 21 viivojen lämpötilakäyrät

Profile view -kuvasta voidaan nähdä kuvaan 21 piirettyjen viivojen lämpötilat. Profile view -kuvasta voidaan valita viiva, jonka lämpötilaa halutaan tarkemmin seurata. Valinta tapahtuu painamalla kuvan päällä hiiren oikeanpuoleista nappia -> settings -> valitaan avautuvasta valikosta 'select line' haluttu viiva. Liikuttamalla hiirtä profile view -ikkunan päällä vasemmalta oikealle, voidaan taustalla olevasta lämpökuvasta lukea kukin hiiren osoittimen alla olevan lämpötilan sijainti (kuva 23).



Kuva 23. Screen shot IrAnalyser työskentelyikkunasta

- g. Kuvasta voidaan nyt tehdä tarkempia johtopäätöksiä. Vaikuttaa siltä, että keskimäiset johtimet ovat lämmenneet, koska taaempi keskimäisen syötön johtimista on löysällä. Tähän tulokseen päädyttiin, koska taaempi johdin on kauttaaltaan yli 10 °C lämpimämpi kuin etummainen johdin. Mikäli johtimien lämpötilat olisivat samat, voitaisiin päätellä, että kyse on ylikuormituksesta. Asia voidaan varmistaa tekemällä johtimille mittauksia, jotka kertovat niiden kuormitustilanteesta. Tällaisia ovat esimerkiksi virran ja harmonisten yliaaltojen mittaukset. Mikäli muita mittauksia ei tehdä asian varmentamiseksi, saa työn tilaaja käsiinsä keskeneräisiä johtopäätöksiä vian laadusta ja mitoittaa korjaustoimet väärin, mikä voi pahimmassa tapauksessa aiheuttaa suuria taloudellisia menetyksiä.

6.6 Yhteenveto sähköjärjestelmän kuntotutkimuksesta

Usein laitteiden tai laitekokonaisuuksien kuntoa tutkittaessa ei riitä, että mittaukset tehdään ainoastaan lämpökameralla, vaan lisäksi tarvitaan myös muita tarkentavia mittauksia. Vaikka Tampereen ammattikorkeakoulun sähköjärjestelmien kuntotutkimuksessa pääasiallisena työkaluina olivat erilaiset sähkön laadun analysaattorit, osoittautui lämpökamera

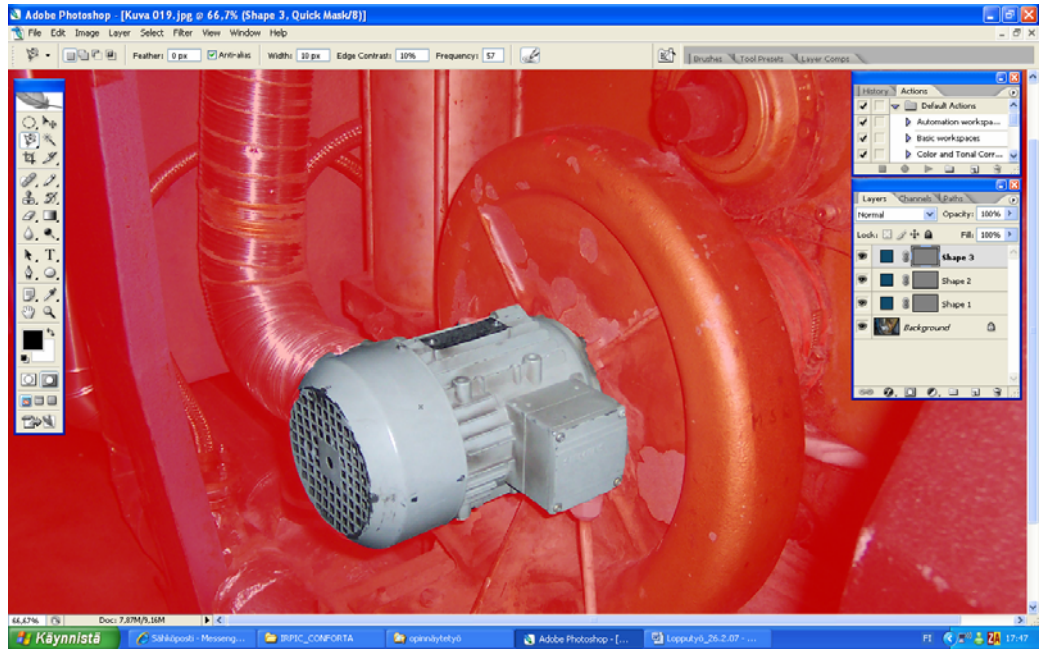
varsin hyödylliseksi apuvälineeksi. Lähdön NKC001 tapauksessa ei verkkoanalysointorit antaneet poikkeavia tuloksia vaiheen L2 kohdalla (taulukko 3), vaan vika huomattiin vasta lämpökamerakuvasta. Jotta kyseinen vika olisi näkynyt verkkoanalysointoreissa, olisi vian pitänyt olla vielä vakavampi. Esimerkiksi liitoksen olisi pitänyt olla niin löysä, että se olisi aiheuttanut valokaaren. Toisaalta ilman verkkoanalysointorin tuloksia olisi ollut hyvin vaikeaa olla varma vian laadusta pelkästään lämpökamerakuvien avulla.

7 YHTEENVETO

Tähän työhön on kerätty keskeisimmät asiat, jotka tulee huomioida lämpökameralla kuvattaessa. Keinoja oikeaan kuvaamiseen -osiosta on tehty myös pääpiirteinen toimintakartta (liite 1), joka on tarkoitettu tarkastuslistaksi lämpökamera kuvauksiin. Lisäksi työn edetessä katsottiin tarpeelliseksi luoda lämpökamerakuvaus pöytäkirja (liite 2), joka on niin ikään tarkoitettu otettavaksi mukaan kuvauskohteisiin. Lämpökamerakuvauspöytäkirja on tehty helpottamaan kuvauksiin liittyvien tietojen hallintaa. Liitteenä 3 olevaan emissioerointaulukkoon on kerätty kahdesta eri lähteestä, Fluke Ti20 -ohjeesta sekä IR928-ohjeesta, peräisin olevia emissioerointeja. Lisäksi taulukkoon on liitetty emissioerointeja, joita saatiin tulokseksi tutkittaessa Tampereen ammattikorkeakoulun laboratorioissa kappaleiden emissioerointeja ja emissioerointien manipulointia Dual thermo 6500 -infrapunalämpömittarilla ja IR928 -lämpökameralla.

Kameralaukusta tulisi aina löytyä emissioerointien muuttamiseen sopivaa materiaalia. Olisi hyvä pyrkiä käyttämään aina samaa materiaalia emissioerointia muutettaessa, jotta tulokset olisivat jatkossa keskenään vertailukelpoisia. Mitatut emissioerointisarvot kannattaa tallettaa omaan tietokantaan tulevaa käyttöä varten.

Työn edetessä ilmeni joitakin asioita, joita lämpökamerakuvaamisessa voisi tulevaisuudessa kehittää. Seuraava askel lämpökamerakuvien analysoinnissa voisi olla se, että analysointiohjelmaan sisällytettäisiin ominaisuus, jonka avulla lämpökamerakuvassa oleville eri alueille voitaisiin määrittellä kullekin oma emissioerointi. Alueen määrittäminen voisi toimia esimerkiksi muista kuvankäsittely-ohjelmista tutuilla työkaluilla kuten lasso tool tai magnetig lasso tool- työkaluilla (kuva 24). Emissioerointien määrittelyn jälkeen lämpökamerakuvassa olevan värimaailman tulisi myös muuttua todellisuutta vastaavaksi, mikä ei nykyaikaisilla ohjelmilla toteudu.



Kuva 24. Adobe photoshop- ohjelmassa valittu alue magnetic lasso tool- työkalua apuna käyttäen.

Lämpökameralla kuvattuun videomateriaalin analysointiin ei tässä työssä otettu kantaa, mutta silläkin alueella tutkittavaa riittää, esimerkiksi suuren kohteen, kuten koulun tai tehtaan pääkeskuksen virtojen tai harmonisten yliaaltojen aiheuttamien lämpövaikutusten pidempiaikainen seuraaminen.

Koska lämpökamerakuvauksista usein laaditaan raportti tilaajalle, olisi analysointiohjelmiin syytä saada myös suomenkielisiä, kattavia ja eri ympäristöihin soveltuvia raportointipohjia. Nykyiset analysointiohjelmat sisältävät pääsääntöisesti vain yhden raporttipohjan, joka sekin on englanninkielinen.

LÄHTEET

Painetut lähteet

1. Inkinen Pentti; Manninen Reijo; Tuohi Jukka. *Momentti 1. Insinöörifysiikka* Otava 2003 ISBN 951-1-16598-4
2. Inkinen Pentti; Manninen Reijo; Tuohi Jukka. *Momentti 2. Insinöörifysiikka* Otava 2003 ISBN 951-1-18457-1

Sähköiset lähteet

3. Wikipedia, vapaatietosanakirja: Sähkömagneettinen spektri. Luettu 09.10.2006. Saatavilla: http://fi.wikipedia.org/wiki/S%C3%A4hk%C3%B6magneettinen_spektri#Infrapuna
4. Wikipedia, vapaatietosanakirja: Infrapuna. Luettu 09.10.2006. Saatavilla: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Infrapuna>
5. Infradex OY, Lämpökuvaustratkaisut. Luettu 12.11.2006. Saatavilla: <http://www.infradex.com/pdf/teoria.pdf>

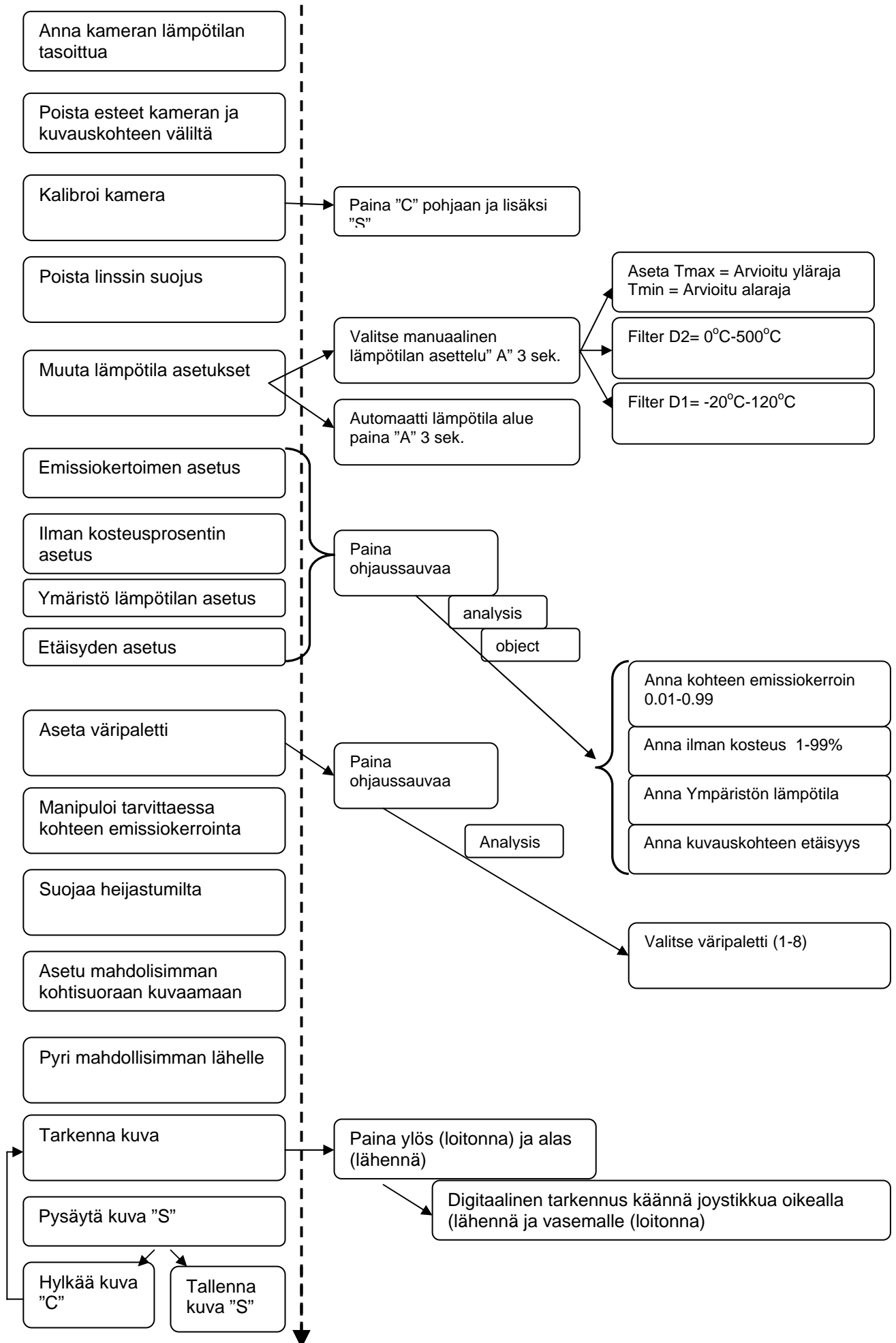
Painamattomat lähteet

6. Fluke Finland Oy, Fluke Ti 20 Käyttökoulutusmateriaali, Mika Hietanen
7. Risto jokikorpela Oulun yliopisto, Erikoistyö :Lämpökuvien mittaus ja kuva-analyysi 2002. saatavilla: http://spectral.joensuu.fi/publications/risto_jokikorpela.pdf

Kuvat ja taulukot

8. Fluke Finland OY: Lämpökamera Ti 20. Luettu 19.01.2007 saatavilla: http://www.fluke.fi/comx/show_product.aspx?pid=35578&locale=fifi&product=THG
9. Novotek Finland OY: Lämpökamera IR928. Luettu 1.12.2006. Saatavilla: http://www.novotek.fi/HTML/ajankohtaista/info/e-Info/7-2004/e-info7-2004_files/IR928.jpg
10. Ilmatieteenlaitos, Valo ja Spektri. Luettu 1.12.2006. Saatavilla: <http://www.ava.fmi.fi/oppimateriaali/envisat/valonsade/spektri.html>
11. Fluke Finland OY: Esimerkkikuva Inside IR - ohjelmasta. Luettu 19.01.2007

Liite 1 Lämpökamerakuvaamisen perusasiat vaiheittain. Vasemmalla yleiset ohjeet ja oikealla ohjeet tarkemmin IR928 infrapuna lämpökameraa varten.



Kuvauspöytäkirja

Sivu _____ / _____

Kohdetiedot

Kohde	_____	Päivämäärä	_____
Osoite	_____		
Postinumero	_____	Sähköposti os.	_____
Puhelinnumero	_____		
Kuvaaja	_____	Yritys	_____
Osoite	_____	Postinumero	_____
Puhelinnumero	_____	Sähköposti os.	_____

Kameran kalibrointi

Kuva _____ / _____

Ilman kosteusprosentti _____ %

Ympäristön lämpötila _____ °C

Muut ympäristön olosuhteet _____

esim. ilmavirtaukset, tuuli, pöly, lämpösäteilijät

Kuvauskohteen materiaali

Emissio kerroin _____ Tiedossa Arvioitu

Pinnan heijastuskerroin _____

Kohteen etäisyys _____ m

valokuva nro _____

Ympärillä olevat materiaalit _____

Huomautettavaa _____

Kuvien tallennuspaikka _____

Muut kohteessa soritetut mittaukset _____

Muiden mittausten tallennuspaikka _____

Kuvauspöytäkirjan lisäosa

Kohde

Kuvauskohteen materiaali _____

Emissio kerroin: _____

Tiedossa Arvioitu

Pinnan heijastuskerroin _____

Kohteen etäisyys _____

m

valokuva nro _____

Ympärillä olevat materiaalit _____

Huomautettavaa _____

Kuvien tallennuspaikka _____

Muut kohteessa soritetut mittaukset _____

Muiden mittausten tallennuspaikka _____

Kohde

Kuvauskohteen materiaali _____

Emissio kerroin: _____

Tiedossa Arvioitu

Pinnan heijastuskerroin _____

Kohteen etäisyys _____

m

valokuva nro _____

Ympärillä olevat materiaalit _____

Huomautettavaa _____

Kuvien tallennuspaikka _____

Muut kohteessa soritetut mittaukset _____

Muiden mittausten tallennuspaikka _____

Materiaali	Fluke Ti20 manual	Guide Ir928 manual	Dual Thermo AR6500
Alumiini		0.05	
Hapettunut	0.2-0.4	0.30	
Hapettunut	0.3		
Karhennettu	0.1-0.3		
Hopea		0.03	
Messinki			
Kiilloitettu	0.3	0.10	0.22
Hapettunut	0.5	0.61	
Kupari			0.21
Hapettunut	0.4-0.8		0.32
Erityisen hapettunut			0.85
Sähköliittimet (terminal bloks)	0.6		
Kupari, malattu tussilla			0.57
pohjamaalattu kupari, harmaa			0.59
maalattu kupari, kirkas musta			0.4
Kulta		0.02	
Haynes Alloy	0.3-0.8		
Inconel			
Hapettunut	0.7-0.95		
Karhennettu	0.3-0.6		
Elektrolyysikiilloitettu	0.15		
Rauta			
Hapettunut	0.5-0.9	0.18	
Ruostunut	0.5-0.7	0.85	
Rauta valu			
Hapettunut	0.6-0.95		
Hapettumaton	0.2		
Kromi		0.15	
Koboltti		0.18	
Sinkki		0.05	
hapettunut		0.11	
Takorauta			
Himmeä	0.9		
Lyijy			
Karhea	0.4	0.16	
Hapettunut	0.2-0.6	0.63	
Magnesium		0.12	
Nikkeli			
Hapettunut	0.2-0.5	0.15	
Platina musta	0.9	0.10	
Tina		0.09	
Titaani		0.03	
hapettunut	0.5-0.6		

Teräs			
Kylmävalssattu tai hapettunut	0.7-0.9		
Hiottu levy	0.4-0.6		
Kiillotettu levy	0.1		
Ruostumaton	0.1-0.8		
Volframi		0.13	
Asbesti	0.95		
Asfaltti	0.95	0.90	
Basaltti	0.7		
Hilli			
Hapettumaton	0.8-0.9	0.90	
Grafiitti	0.7-0.8	0.85	
Karborundum	0.9		
Keramiikka	0.95		
Punatiili		0.93	
Savi	0.95		
Betoni	0.95	0.90	
Vaate	0.95	0.85	
Lasi levy	0.85		
Sora/sepeli	0.95		
Kipsi	0.8-0.95		
Jää	0.98		
Maali (non-al)	0.9-0.95		
Noki		0.95	
Paperi (mikä väri tahansa)	0.95		
Muovi			
Läpinäkymätön yli 20mm paksu	0.95		
PVC-Kaapelikuori, musta			0.84
Riviliitin, sininen			0.9
Kontaktori			0.96
Automaattisulake			0.85
Teippi "sähkömiehen", musta			0.76
Kumi	0.95		
Hiekka	0.9		
Lumi	0.9		
Maaperä tai multa	0.9-0.98		
Vesi	0.93		
Puu (käsittelemätön)			0.74
Puu maalattu			0.98

