

PIENTALON RAKENTEIDEN PINTALÄMPÖTILAT
LÄMPÖKAMERALLA JA COMSOL MULTIPHYSICS

-OHJELMISTOLLA

Petri Niemelä
Opinnäytetyö
25.2.2011
Rakennustekniikan koulutusohjelma

Koulutusohjelma	Opinnäytetyö	Sivuja	+	Liitteitä
Rakennustekniikka	Insinööriyö	38	+	13
Suuntautumisvaihtoehto	Aika			
Talo- ja korjausrakentaminen	25.2.2011			
Työn tilaaja	Työn tekijä			
Petri Niemelä	Petri Niemelä			
Työn nimi	Pientalon rakenteiden pintalämpötilat lämpökameralla ja Comsol multiphysic -ohjelmalla			
Avainsanat	Lämpökamera, pintalämpötila, Comsol Multiphysics			

Insinööriyön tavoitteena oli tutkia, miten pientalon rakenteiden pintalämpötilat eroavat verrattuna rakenteiden ympäröivään ilmanlämpötilaan. Tuloksia vertailtiin lämpökameran ja Comsol Multiphysics -ohjelmiston kesken. Työ keskittyi kentällä tehtyihin lämpökamerakuvauksiin ja mittauksiin.

Pientalon rakentamisen yhteydessä rakennuksen rakenteisiin laitettiin lämpötilanturit, joiden avulla saatiin tarkat lämpötilat tietoon koko edellisen vuorokauden ajalta. Rakenteet kuvattiin normaalipaineessa lämpökameralla ja saadut lämpökamerakuvat käsiteltiin tietokoneella ja tutkittiin pintalämpötilat.

Rakenteet mallinnettiin 3D-kuviksi Comsol Multiphysic -ohjelmistolla. Ohjelmaan syötettiin lämpötilat tunnin välein mitattuina koko edellisen vuorokauden ajalta, materiaalien U-arvot sekä pintavastukset. Ohjelma laski mallinnetun rakenteen pintalämpötilat automaattisesti tietojen mukaan.

Lämpökameran ja Comsol-ohjelmiston mukaan rakenteiden pintalämpötilat ovat 0,5–1,0 °C alhaisempia kuin rakennuksen sisälämpötila. Ulkoapäin tutkittaessa eroa on noin 0,5–1,0 °C ulkolämpötilaan verrattuna. Lämpökameran ja Comsol-ohjelmiston keskinäisissä tuloksissa huomattiin pieniä, noin 0,5–1,8 °C:n eroja keskenään.

Degree programme	Thesis	Number of pages	+	appendices
Civil engineering	B.Sc.	38	+	13
Line	Date			
Housebuilding and Renovation	25 February 2011			
Commissioned by	Author			
Petri Niemelä	Petri Niemelä			
Thesis title				
Surface temperatures on the structures of detached house with infrared camera and Comsol Multiphysics Software				
Keywords				
Infrared camera, Surface temperature, Comsol Multi-physics				

The aim of this thesis was to study how the surface temperatures on the detached house differ from the ambient temperature surrounding the house. The results were compared between infrared camera and Comsol Multiphysics Software. Project focused on the measurements and thermal images taken in the field.

During the construction of detached house, thermal sensors were placed in the structures. These sensors provided accurate thermal information from previous 24 hours. Structures were photographed using thermal imaging camera. Pictures were processed with computer and surface temperatures were observed from those images.

The structures were modeled to 3-dimensional images by using Comsol Multiphysics software. Software was uploaded with thermal data from the building of thermal sensors, taken every hour from the past 24 hours. Software calculated surface temperatures of the modeled structures automatically using the uploaded thermal data from the sensors.

According to infrared camera and Comsol Multiphysics the surface temperatures were 0,5-1,0 °C lower than the air temperature inside the building. When studied from the outside the difference was approximately 0,5-1,0 °C compared to ambient air temperature. Comparing the results given by the infrared camera and Comsol multiphysics software a difference of 0,5–1,8 °C was observed.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
1 JOHDANTO	6
2 LÄMPÖKUVAUS.....	7
2.1 Lämpökamera	7
2.1.1 Virhemahdollisuudet ja kalibrointi.....	8
2.1.2 Mittausolosuhteet.....	9
2.2 Asuintilojen vaadittavat lämpöolosuhteet	9
2.2.1 Lämpötilaindeksi	10
2.2.2 Paine- erot	11
2.2.3 Korjausluokka	13
2.2.4 Pintalämpötilat	14
2.2.4 Pintavastus	14
2.2.5 U-arvo	15
3 RAKENTEIDEN PINTALÄMPÖTILOJEN TUTKIMINEN.....	17
3.1 Kentällä tehtävät lämpökamerakuvaukset.....	17
3.2 Lämpökamerat.....	17
3.3 Lämpötila-anturit	19
3.4 Lämpökameraraportin tekeminen	21
3.5 Comsol Multiphysics -ohjelmisto ja sen käyttäminen	21
4 RAKENTEIDEN PINTALÄMPÖTILAT.....	23
4.1.1 Pintalämpötilat lämpökameralla	23
4.1.2 Pintalämpötilat Comsol Multiphysics -ohjelmistolla	24
5 PINTALÄMPÖTILOJEN EROAVAISUUDET.....	30
6 YHTEENVETO.....	35
LÄHTEET	37
LIITTEET	38

1 JOHDANTO

Rakennuksien pintalämpötilojen tutkiminen on korostunut viime vuosina, sillä rakennuksilta vaaditaan yhä parempia tiiveyksiä ja lämpöviihtyvyyksiä. Tämän seurauksena lämpötilojen tutkimiseen on kehitelty uusia menetelmiä ja laitteita tutkimuksia varten. Harvemmin kuitenkaan on tutkittu, saadaanko tietokoneohjelmilla samanlaisia tuloksia kuin kentällä tehtävissä mittauksissa.

Tässä opinnäytetyössä havainnollistetaan, kuinka paljon eroavaisuuksia on kentällä tehtyjen lämpökamerakuvausten ja tietokoneelle asennettavan Comsol Multiphysics -ohjelmiston laskennallisten tulosten kesken. Työssä tutkitaan myös, kuinka pientalon rakenteiden pintalämpötilojen arvot eroavat verrattuna rakenteen ympäröivään ilmanlämpötilaan.

Tutkimuskohteena on vuonna 2010 valmistunut puolitoistakerroksinen talo Rintämäki Oulun Metsokankaalla. Talo on puurunkorakenteinen ja rakennuksen kerrosala on noin 150 m². Talon lämmityksenä toimii vesikiertoinen lattialämmitys ja rakennuksessa on varaava takka. Koneellinen ilmanvaihto pitää rakennuksen sisäilman hyvänä ja luo viihtyvät asuinolosuhteet. Rakennuksen ulkokuora on vielä jäänyt tekemättä, joten kohteeseen voi suorittaa lämpökuvauksia myös ulkopuolelta.

Kohteeseen suoritettiin mittauksia 9.4.2010 sekä 23.4.2010. Kenttämittauksia tehtiin lämpökameran ja lämpötila-antureiden avulla. Lämpötila-anturit on laitettu talon seinärakenteisiin rakentamisen yhteydessä ja osa jälkikäteen. Nämä anturit tallentavat lämpötilat määräaikaaisesti ja tarkasti. Tämä työ keskittyy kentällä tehtäviin lämpökamerakuvauksiin ja sen menetelmiin.

2 LÄMPÖKUVAUS

Pintalämpötilojen mittaus lämpökuvauksella perustuu pintojen lähettämään eli emittoimaan lämpösäteilyyn. Kaikki pinnat lähettävät säteilyä, jonka voimakkuus riippuu pintalämpötilasta ja pinnan emissiokertoimesta eli kyvystä lähettää lämpösäteilyä. Lämpökamerat mittaavat tutkittavasta pinnasta tullutta infrapuna-alueen kokonaissäteilyä, johon sisältyvät pinnasta heijastunut säteily sekä joissakin tapauksissa myös pinnan läpi tullut säteily. (1, s.16.)

Materiaalin emissiokerroin voi olla 0–1. Luku tarkoittaa pinnan kykyä säteillä infrapunaenergiaa suhteessa säteilijään eli mustakappaleeseen, jonka emissiokerroin on yleisesti 1. Emissiivisyyden ollessa alhainen (0–0,5) pinta on kiiltävä ja heijastava. Tällaisen pinnan todellista lämpötilaa on vaikea mitata lämpökameralla. Kun pinnan emissiokerroin on lähellä 1:tä, heijastuksen osuus on erittäin pieni ja suurin osa lämpökameran vastaanottavasta lämpösäteilystä on kohteen itsensä lähettämää. Rakennuksen emissiokertoimet ovat yleensä lähellä arvoa 1, yleisesti 0,85–0,95. Tällöin Suomen olosuhteissa saadaan kuvattua riittävän tarkkoja pintalämpötiloja. Yleisesti emissiivisyyteen vaikuttavat säteilyn aallonpituus, pintalämpötila, materiaali ja kuvauskulma. Käytännössä rakennusten lämpökuvaukseen vaikuttavat kuvattavan kohteen pintamateriaalit ja kuvauskulma. Kuvausetäisyys vaikuttaa siten, että mitä kauempaa kohdetta kuvataan sen suurempaa aluetta yksi kuvauspiste edustaa. (1, s. 16-17.)

2.1 Lämpökamera

Lämpökamera on lämpösäteilyn vastaanotin, joka mittaa kuvauskohteen pinnasta luonnollisesti lähtevää lämpösäteilyä. Sen kameran ilmaisin muuttaa kohteen lämpösäteilyvoimakkuuden lämpötilatiedoksi, josta lämpökuva muodostetaan digitaalisesti reaaliajassa. (1, s. 15.)

Rakennusten lämpökuvauksessa käytettävän lämpökameran tulee olla mittava, tasapainotettu ja kuvantava mittalaite. Tämä tarkoittaa sitä, että kamera muodostaa kuvattavasta kohteesta lämpökuvan, joka esittää kohteen pintaläm-

pötilajakauman, kameran rungon ja ulkoisten olosuhteiden aiheuttamat lämpötilavaihtelut eivät vaikuta itse mittaustulokseen ja kameralla voidaan mitata suoraan pintalämpötiloja. Lämpökamerassa tulee olla myös kuvien tallennusmahdollisuus raportointia, tulosten jälkikäsitteilyä ja analysointia varten. Useissa kameroissa on myös puhetallennusominaisuus. Sellaista lämpökameraa missä ei ole lämpökuvien jälkikäsitteily- ja analysointiominaisuutta, voidaan käyttää esimerkiksi rakennustyön laadunvalvontaan. (2, s. 3.)

2.1.1 Virhemahdollisuudet ja kalibrointi

Lämpökuvaajan velvollisuus on huolehtia mittalaitteiden kalibroinnista. Lämpökameran kalibroinnin tarkastus tehdään ennen ja jälkeen kuvauksien. Tällöin kameran mittamaa lämpötilaa vertaillaan samasta pisteestä pintakosketusanturilla otettuun lämpötilaan. Lämpökamera pitää kalibroida vähintään kahden vuoden välein valmistajalla, maahantuojalla tai kalibrointiin valtuutetulla yrityksellä. (1, s. 19.)

Lämpökameroiden erotteluerkkyys on todella hyvä, jopa alle 0,08 °C. Silti todelliseksi mittaustarkkuudeksi voidaan antaa käytännön tilanteissa vain ± 2 °C. Tämä tarkoittaa sitä, että riitatapauksissa tulee aina tehdä tarkistusmittauksia kameran virherajojen selvittämiseksi. Todellisuudessa kameran mittaustarkkuus sisätiloissa ± 20 °C lämpötilassa tehtävässä kuvauksessa on noin ± 1 °C. (1, s. 19.)

Lämpökamerakuvaus tulee aina pyrkiä suorittamaan mahdollisimman suoraan tutkittavaa pintaa vastaan. Aina tämä ei kuitenkaan ole mahdollista, vaan osa pinnoista joudutaan kuvaamaan vinosta suunnasta. Kuvauskulman ollessa alle 30° kohtisuorasta kuvauskulmaa nähden on mittaustarkkuus alle 1°C. Kuvauskulman ollessa tätä jyrkempi mittausrvirhe olla jopa yli 2 °C. (1, s. 20.)

Kameran asetuksilla voi myös olla vaikutusta tuloksiin. Näitä asetuksia ovat esimerkiksi kuvattavan pinnan emissiokerroin, kuvausetäisyys, ympäristön lämpötila, ilman lämpötila ja ilman suhteellinen kosteus. (1, s. 20- 21.)

2.1.2 Mittausolosuhteet

Valmiiden rakenteiden lämpötekniistä ominaisuutta tarkastettaessa edellytetään tiettyjä olosuhteita. Kevyissä rakenteissa (kuten normaali puurunkorakenne) 12 tunnin aikana ennen lämpökamerakuvauksen suorittamista ei ulkoilman lämpötila saa poiketa enempää kuin ± 10 °C kuvauksen aloittamisajan lämpötilasta. Massiivirakenteissa (kuten betoni-villa- betonirakenteet) 24 tunnin aikana ulkoilman lämpötila ei saa poiketa enempää kuin ± 10 °C kuvauksen aloittamisajan lämpötilasta. Ilman lämpötilaero sisällä sekä ulkona ei saa olla alle 15 °C. Lämpökamerakuvauksen aikana ei ulkoilman lämpötila saa poiketa enempää kuin ± 5 °C eikä sisälämpötilan tulisi poiketa enempää kuin ± 2 °C kuvauksen aloittamisajankohdasta. Kuvattavan rakenteen ei tulisi olla alttiina auringon säteilylle 12 tunnin aikana ennen kuvauksia.

(2, s. 48-49.)

Valmiiden rakenteiden lämpökuvausta ei tule suorittaa poikkeuksellisen tuulisissa ja kylmissä olosuhteissa. Tällöin tuulen nopeus on yli 10 m/s ja ulkolämpötila alle paikkakunnan mitoitukslämpötilan. Lämpötilaindeksiä käyttämällä pystytään rakenteiden toimivuus arvioimaan ilman, että tarvitsee odottaa erittäin kylmiä olosuhteita. (2, s. 49.)

Tutkittaessa rakenteen lämpötekniistä toimintaa tulee ilmanvaihdon ja lämmityksen olla normaalissa käyttötilanteessa. Rakennuksen tulee myös olla alipaineinen ulkoilmaan nähden. Normaalisti asuttavan rakennuksen paine-ero on noin -5 Pa. Tarvittaessa tehdään kaksivaiheinen lämpökuvaus eli ensimmäisellä kerralla rakenteet kuvataan normaalissa käyttötilanteessa ja toisella kerralla kuvataan niin, että koko rakennuksen vaippa on alipaineinen ulkoilmaan nähden.

2.2 Asuintilojen vaadittavat olosuhteet

Vuonna 2003 Sosiaali- ja terveysministeriö julkaisi Asumisterveysohjeen, jossa määritetään asuintiloille vaadittavat lämpöolosuhteet. Yleisesti määriteltynä ovat vaadittavat lämpötilaindeksit, seinän- ja lattian pintalämpötilat sekä hu-

neilman lämpötilat. Taulukosta 1 ilmenevät nämä vaadittavat ilmanlämpötilat ja pintalämpötilat sekä lämpötilaindeksit. Ohjearvot perustuvat mittausolosuhteisiin, joissa ulkoilmanlämpötila on -5 °C ja sisäilmanlämpötila 21 °C.

TAULUKKO 1. Lämpötilojen ohjeellisia arvoja (6)

Asunto ja muu oleskelutila	Välttävä taso	TI (%)	Hyvä taso	TI (%)
Huoneilman lämpötila (°C)	18	-	21	-
Operatiivinen lämpötila (°C)	18	-	20	-
Seinän lämpötila (°C)	16	81	18	87
Lattian lämpötila (°C)	16	87	20	97
Pistemäinen pintalämpötila (°C)	11	61	12	65

2.2.1 Lämpötilaindeksi

Lämpötilaindeksillä pystytään arvioimaan vaipan lämpöteknistä toimivuutta. Lattian ja seinän pintalämpötiloja arvioidaan lämpötilaindeksia käyttämällä silloin, kun lämpötilojen mittauksia ei voida tehdä -5 °C ± 1 °C:n ulkolämpötilassa eli, jos ulkolämpötila on alle -5 °C tai yli -5 °C (maks. +5 °C) ottaen huomioon mitaustoleranssin. (1, s. 45.)

Lämpötilaindeksi lasketaan kaavalla 1 (1, s.45).

$$TI = (T_{sp} - T_o) / (T_i - T_o) * 100 [\%]$$

KAAVA 1

jossa

TI = Lämpötilaindeksi

T_{sp} = Sisäpinnan lämpötila, °C

T_i = Sisäilman lämpötila, °C

T_o = Ulkoilman lämpötila, °C

Seinän hyvän tason lämpötilaindeksi on ≥ 87 % ja välttävän tason lämpötilaindeksi on ≥ 81 %, kun taas lattian välttävän tason lämpötilaindeksi on ≥ 87 % ja hyvän tason lämpötilaindeksi on ≥ 97 %. Läpivientien, seinän ja ulkovaipan liitoskohtien pistemäistä lämpötilaa kuvaava välttävän tason lämpötilaindeksi on ≥ 61 % ja hyvän tason ≥ 65 %. Kun sijoitetaan mitatut suureet edellä mainittuun kaavaan ja ratkaistaan siitä lämpötilaindeksi, saadaan seinän lämpöteknillinen kunto arvioitua lämpöviihtyvyyden ja terveyshaitan kannalta. Lämpötilaindeksit lasketaan sisätiloissa tehdyistä lämpökamerakuvien tuloksista. (6, s. 16.)

2.2.2 Paine-erot

Paine-eron vaikutuksesta ilmapuotojen ympärillä olevien pintojen lämpötiloihin ei ole vielä tehty juurikaan tarkkoja tutkimuksia. Myönnettävä kuitenkin on, että paine-erolla on suora yhteys ilman liikkeeseen ja siten ilmanvuotopaikan lämpötilaan. (1, s. 71.)

Kuvauksia tehtäessä on tärkeää, että tilassa vallitsevat normaalit painesuhteet eli tilan tulisi olla lievästi alipaineinen. Normaalisti rakennuksen paine-ero on noin -5 Pa, mutta jos ennen kuvauksia tehtävissä paine-eromittauksissa todetaan rakennuksen olevan liian alipaineinen (yli -15 Pa) tai alipaineinen (alle -1 Pa) on syytä tarkastella ja ehdottaa mahdollista ilmanvaihdon tasapainotusta. (1, s. 71.)

On huomattu, että 1 Pa:n muutos paine-eroon aiheuttaa suoraan indeksiin laskettuna yhden indeksin muutoksen. Tätä teoriaa voi hyödyntää indeksilaskennassa silloin, kun rakennuksen paine-ero on jotakin muuta kuin normaalin käyttötilanteen paine-ero. Lämpötilaindeksi voidaan silloin laskea ottaen huomioon paine-erot. Hyvä onkin muistaa ottaa paine-erot aina huomioon laskettaessa lämpötilaindeksejä, koska niillä on suurikin merkitys lopulliseen lämpötilaindeksiin. (1, s. 71.)

Paine-erojen vaikutus lämpötilaindeksiin lasketaan kaavalla 2 (1, s.71).

$$TI = (T_{sp} - T_o) / (T_i - T_o) * 100 [\%] - (Pa^m - Pa_s)$$

KAAVA 2

jossa

TI = Lämpötilaindeksi

T_{sp} = Sisäpinnan lämpötila, °C

T_i = Sisäilman lämpötila, °C

T_o = Ulkoilman lämpötila, °C

Pa^m = Mitattu paine- ero, Pa

Pa_s = suunniteltu Paine- ero, Yleensä -5 Pa

Laskentakaavaa ei voi yleistää, mutta sitä voi soveltaa joissakin tapauksissa. Varminta on kuitenkin käyttää tiiviysmittausta tai kaksivaiheista lämpökuvausta. Taulukossa 2 on laskettu paine-erojen vaikutuksia lämpötilaindeksiin. (1, s. 72.)

TAULUKKO 2. Esimerkkilaskelma, miten paine-ero vaikuttaa indeksiin ja sitä kautta korjausluokkaan (1)

Paine-ero (Pa)	Ulko-lämpötila (°C)	Sisälämpötila (°C)	Vikalämpötila (°C)	Lämpötilaindeksi (%)	Lämpötilaindeksi, jossa paine-ero otettu huomioon (%)	Korjausluokka
0	-5	21	11	62	57	1
-5	-5	21	11	62	62	1
-10	-5	21	11	62	67	2
-15	-5	21	11	62	72	3
-20	-5	21	11	62	77	3

2.2.3 Korjausluokka

Yleisesti tutkittaessa rakenteiden ilmapuotoja ilmoitetaan lämpökuvausraportissa korjausluokka. Korjausluokan arvioinnissa on pyrittävä ottamaan huomioon tilan käyttötarkoitus, mahdollisen poikkeaman laajuus ja sijainti tilassa. Oleellisesti luokitukseen vaikuttavat tilan käyttötarkoitus, rakentamiseen ja käyttöön liittyvät kriteerit (esimerkiksi sisäilmaluokituksen vaikutukset). (1, s. 65.)

Korjausluokat on jaettu neljään eri luokkaan seuraavasti (1, s. 66) :

1. Korjattava

- Pinnan lämpötila ei täytä sosiaali- ja terveysministeriön laatiman asumisterveysohjeen välttävää tasoa. Oleellisesti heikentää rakenteiden fysikaalista toimintaa.
- $TI < 61 \%$

2. Korjaustarve selvitettävä

- Korjaustarve on erikseen harkittava. Täyttää välttävän tason, mutta ei hyvää tasoa.
- $TI 61- 65 \%$

3. Lisätutkimuksia

- Täyttää asumisterveydelle asetetun hyvän tason vaatimukset, mutta tilassa piilee käyttötarkoitus huomioon ottaen kosteus ja lämpötekni- sen toiminnan riski. On tarkasteltava rakenteen kosteustekninen toi- minta sekä mahdollisesti tehdä lisätutkimuksia esim. kosteusmittaus.
- $TI > 65 \%$

4. Hyvä

- Täyttää hyvän tason vaatimukset. Ei vaadi korjaustoimenpiteitä
- $TI > 70 \%$

Ulkoapäin kuvattaessa korjausluokkia ei voida määrittellä, koska tällöin kuvissa ei näy ilmavuotoja eikä lämpöindeksiä voida laskea.

2.2.4 Pintalämpötilat

Rakennusten rakenteet eivät koskaan ole tasalämpöisiä, eivätkä kaikki tutkittujen pistelämpötilojen epätasaisuudet merkitse sitä, että rakenteissa tai eristeissä olisi vikaa tai puutteita. Rakenteissa on yleisesti kylmäsiltoja, jotka aiheuttavat pintalämpötilojen laskua. Yleensä tällaisia kohtia ovat ulkonurkat ja lattiaraajat. Rakenteiden liitoskohdissa on suoraa seinän osaa suurempi pintavastus, joka alentaa pintalämpötilaa. (1, s. 22-23.)

Sisäpuolelta kuvattaessa rakennuksen nurkat, läpiviennit ja liitokset ovat siten aina hieman ympäristöään kylmempiä. Pintalämpötilojen ollessa riittävästi ympäristöään matalampia, voidaan epäillä rakenteissa olevan puutteita. Ulkopuolelta mitattaessa kylmäsiltoja ja eristevirheet näkyvät ympäristöään lämpimämpinä. (1, s.22.)

Yleisimmät sisäpintalämpötiloihin vaikuttavat asiat ovat höyröyksen tiiviys, tuulensuojan kunto, lämmitysjärjestelmän kunto ja sen toiminta. Myös ilmanvaihtojärjestelmän toimivuus ja sisäiset lämmön- ja kosteuslähteet vaikuttavat pintalämpötiloihin. (1, s.43.)

2.2.5 Pintavastus

Pintavastus ilmoittaa rakennusosan pinnan ja sisä- tai ulkopuolisen ympäristön välisen rajakerroksen lämmönvastuksen (m^2K/W).

Rakententeiden U-arvon laskennassa käytetään pintavastuksina taulukon 3 mukaisia arvoja. Väliarvot 0°–90° saadaan lineaarisesti interpoloimalla.

TAULUKKO 3. Rakenteiden pintavastukset (3, s. 16)

SISÄ- JA ULKOPUOLINEN PINTAVASTUS R_{si} JA R_{se}					
Sisäpuolinen pintavastus			Ulkopuolinen pintavastus		
$R_{si}, (m^2K)/W$			$R_{se}, (m^2K)/W$		
Lämpövirran suunta					
vaakasuora	ylöspäin	alaspäin	vaakasuora	ylöspäin	alaspäin
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

2.2.6 U-arvo

U-arvo (U) eli lämmönläpäisykerroin (aikaisemmin k-arvo) kertoo lämpövuon eli lämpövirran, joka läpäisee rakenteen. Yksinkertaisesti muotoiltuna U-arvo kuvaa rakennuksen eri osien lämmöneristyskykyä. U-arvot on määritetty eri rakennusmateriaaleille. U-arvon yksikkö on $W/(K \cdot m^2)$, eli wattia kelviniä ja neliometriä kohden. Mitä pienempi arvo on, sitä tehokkaampi lämmöneristyskyky on. Rakennusmateriaalien U-arvot löytyvät Suomen rakentamismääräyskokoelmasta C4.

Lämmönläpäisykerroin (U) lasketaan kaavalla 3 (3, s.5).

$$U = 1 / R_t \quad \text{KAAVA 3}$$

R_t = rakennusosan kokonaislämmönvastus ympäristöstä ympäristöön.

Kun rakennusosan ainekerrokset ovat tasapaksuja, tasa-aineisia ja lämpö siirtyy ainekerrokseen nähden kohtisuoraan, lasketaan rakennusosan kokonaislämmönvastus R_t kaavalla 4 (3, s.5).

$$R_t = R_{si} + R_1 + R_2 + R_{se} \quad \text{KAAVA 4}$$

jossa

$$R_1 = d_1 / \lambda_1$$

$$R_2 = d_2 / \lambda_2$$

d_1 = ainekerroksen 1 paksuus, (m)

d_2 = ainekerroksen 2 paksuus, (m)

λ_1 = ainekerroksen 1 lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo

λ_2 = ainekerroksen 1 lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo

R_{si} = sisäpuolinen pintavastus

R_{se} = Ulkopuolinen pintavastus

Taulukossa 4 on esitetty rakenteiden U-arvojen vaatimukset ja muutokset eri vuosina.

TAULUKKO 4. Rakenteiden u-arvojen vaatimukset ja muutokset

U-arvot	minimi 2007-2009 [W/(K·m²)]	minimi 2010- [W/(K·m²)]
Ulkoseinä	0,24	0,17
Yläpohja	0,15	0,09
Alapohja	0,24	0,16
Ikkunat ja ovet	1,4	1,0

3 RAKENTEIDEN PINTALÄMPÖTILOJEN TUTKIMINEN

Rakenteiden pintalämpötiloja voidaan tutkia kentällä lämpökameralla sekä pintalämpömittareilla. Tässä työssä pintalämpötiloja tutkittiin lämpökameran sekä Comsol Multiphysics -ohjelmiston avulla. Rakenteita ympäröivän ilmanlämpötila saatiin lämpötila-antureiden avulla.

3.1 Kentällä tehtävät lämpökamerakuvaukset

Tässä työssä rakennuksen rakenteiden pintalämpötilojen eroja tarkastellaan lämpökameran antamien tulosten sekä Comsol Multiphysics -laskelmien avulla. Pintalämpötilojen tarkastelu kohdistuu talo Rintamäen rakenteista saatuihin tuloksiin. Tässä kohteessa käytiin kuvaamassa 9.4.2010 sekä 23.4.2010 eli yhteensä kaksi kertaa. Kohteen kuvaukset tehtiin kahdella eri kameralla, jotta tulokset olisivat monipuolisia, tarkkoja ja luotettavia.

Lämpökameralla saadut kuvat käsiteltiin Thermacam QuickReportilla ja saadut tulokset ovat liitteissä 1 ja 2. Kuvatun kohteen seinärakenne on kerrottu liitteessä 3. Näiden rakennetietojen avulla saatiin seinärakenne mallinnettua hyvin Comsol Multiphysics -ohjelmistolla. Comsol-ohjelmistolla saadut laskennalliset pintalämpötilakäyrät ja kuvat ovat liitteissä 4 ja 5. Kummankin kuvauskerran sisä- ja ulkolämpötilat vuorokauden ajalta on esitetty liitteessä 6.

3.2 Lämpökamerat

Rakenteet kuvattiin rakennuksen ulkoa ja sisältä yleensä kahdella eri kameralla. Tällöin saatiin tarpeeksi luotettavia tuloksia ja virheiden sattuessa ei tarvinnut käydä tekemässä kuvauksia uudestaan.

Yksi kameroista oli FLIR P660, jolla saatiin erittäin tarkkoja kuvia (kuva 1). Tässä kamerassa on äänikommentointi- ja tekstikommentointiominaisuus, joiden avulla kuvien jälkikäsittely on erittäin helppoa eivätkä kuvauskohteet mene sekaisin. Kamera ottaa lämpökuvan ja valokuvan samaan aikaan, joilloin ei tarvita

normaalia valokuvauskameraa mukaan laisinkaan. Valokuvat ovat 3,2 megapikseliä. Lämpökuvan resoluutio on 640*480 ja lämpötila-alue on -40–500 °C. Kuvat tallentuvat SD-muistikortille. (7)



KUVA 1. Lämpökamera FLIR P660 (7)

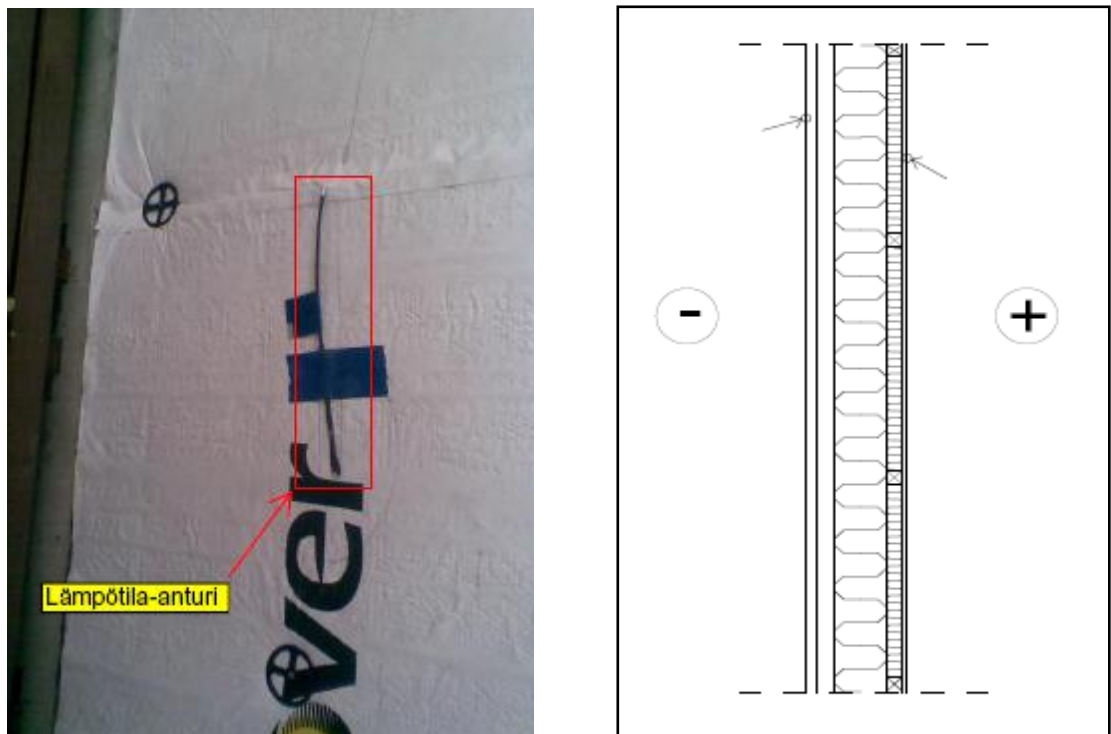
Toinen kameroista oli FLIR B400 (kuva 2). Tämän kameras lämpökuvan resoluutio on 320*240 ja valokuva 3,1 megapikseliä, joten sillä ei saa yhtä laadukkaita kuvia kuin P660-kameralla. Tässä kamerassa on äänikommentointi ominaisuus. Lämpötila-alue on pienempi kuin P660-kamerassa vain -2–120 °C. Myös tämän kameras kuvat tallentuvat SD-muistikortille.



KUVA 2. Lämpökamera FLIR B400 (7)

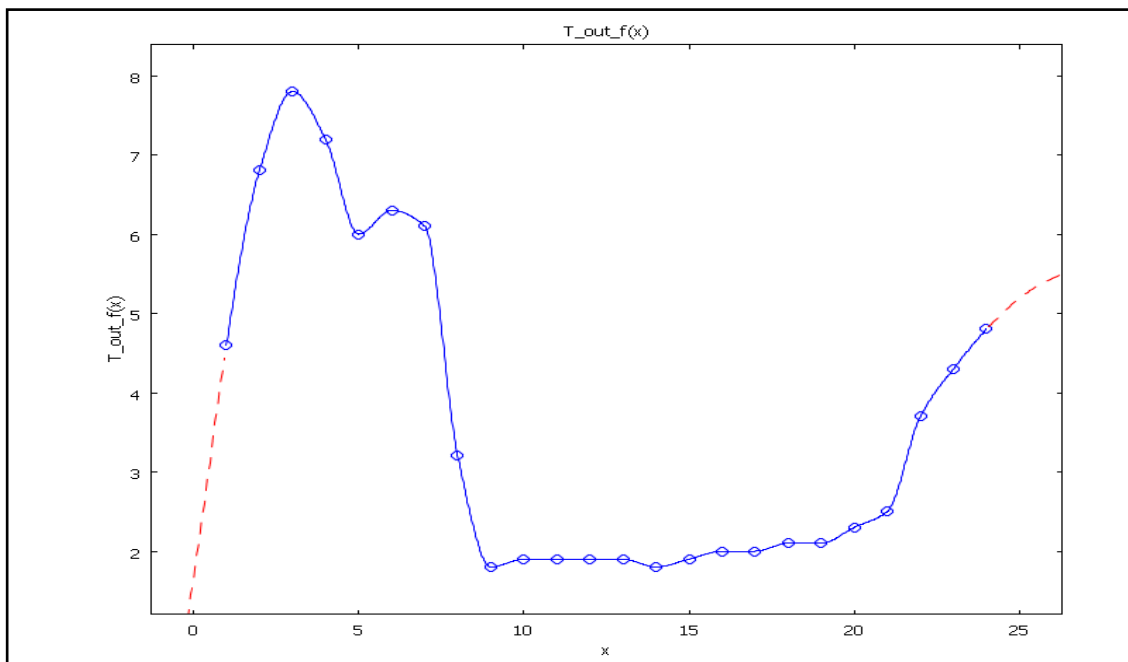
3.3 Lämpötila-anturit

Seinärakenteisiin (U -arvo $0,14 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$) oli talon rakentamisen yhteydessä laitettu lämpötila-antureita noin puolentoista metrin korkeuteen. Kuvassa 3 näkyvät antureiden paikat ja se, minkälaisia ne ovat todellisuudessa. Nämä anturat mittasivat lämpötiladataa säännöllisesti vuorokauden ajalta ja näiden tietojen avulla saatiin selville Comsol-mallinnukseen tarvittavat rakenteiden sisä- ja ulkolämpötilat. Lämpötilat otettiin edellisen vuorokauden ajalta. Lämpötilat tallentuivat tunnin välein tietokoneelle $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$:n tarkkuudella.

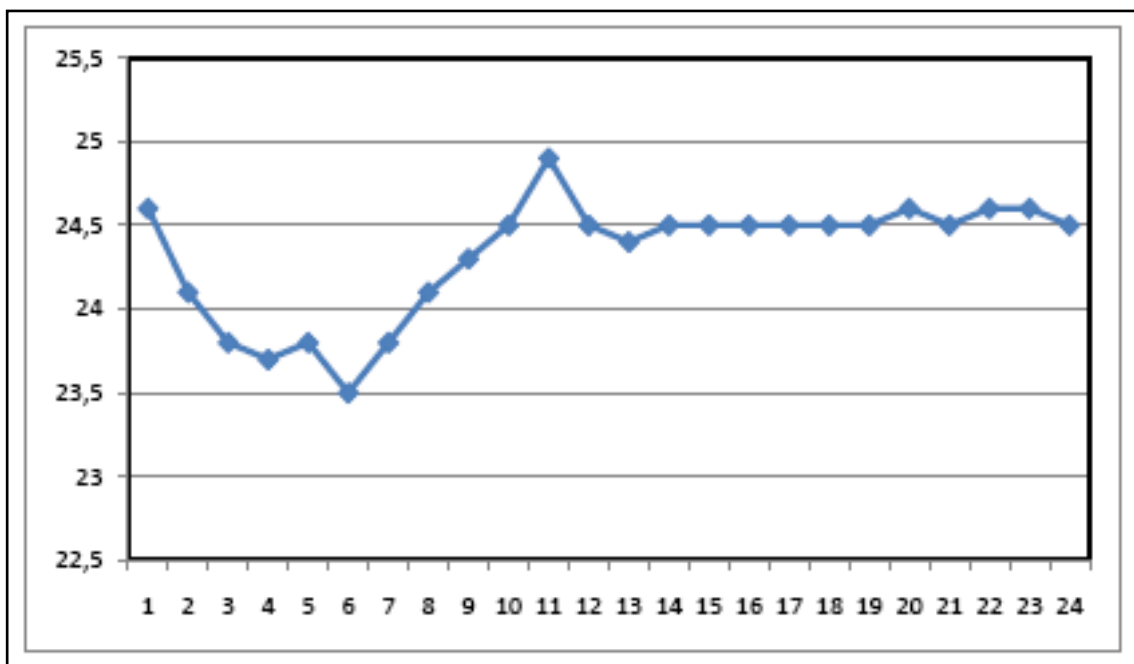


KUVA 3. Lämpötila-anturi rakenteessa, nuolet osoittavat antureiden paikat

Antureiden mittaama lämpötiladata tallentui tietokoneelle säännöllisesti tunnin välein, joista saatiin muodostettua lämpötilakäyrät vuorokauden ajalta. Kummankin kuvauskerran jälkeen tehtiin omat lämpötilakäyrät sisältä ja ulkoa. Kuvassa 4 näkyvät antureiden mitaamat lämpötilat ulkoa vuorokauden ajalta 9.4.2010. Kuvassa 5 näkyvät antureiden mitaamat sisälämpötilat 9.4.210. Saatut lämpötilat syötettiin Comsol Multiphysics -ohjelmistoon mallintamisen yhteydessä. Lämpötilakäyrät ovat liitteessä 6.



KUVA 4. Ulkolämpötilat tunnin välein mitattuina vuorokauden ajalta 9.4.2010 (x-akseli= aika h ja y-akseli= Lämpötila °C)



KUVA 5. Sisälämpötilat tunnin välein mitattuina vuorokauden ajalta 9.4.2010 (x-akseli= aika h ja y-akseli= Lämpötila °C)

3.4 Lämpökameraraportin tekeminen

Kuvattujen kohteiden kuvat käsiteltiin Thermacam QuickReportilla, joka on Microsoft Office Wordin lisäosa. Tämän ohjelman asentaminen koneelle mahdollisti lämpökamerakuvien käsittelyn ja raportin teon. Tällä ohjelmalla saadaan lämpökamerakuva ja normaali valokuva tuotua suoraan valmiiseen raporttipohjaan. Tämän jälkeen lämpökamerakuvaan pystyy laittamaan pisteitä tai alueita, joista halutaan tietää lämpötila. Näiden pisteiden avulla saadaan kuvan tietyn kohdan lämpötila 0,1 °C:n tarkkuudella. Kuvaan voidaan laittaa myös viiva, joka mittaa pintalämpötilan viivan osoittamalta alueelta. Myös kuvien väritystä ja kirkautta pystyy myös muuttamaan tämän ohjelman avulla. Tämän ohjelman käsittely on erittäin helppoa ja raporttien tekeminen on nopeaa. Tässä työssä kaikki lämpökamerakuvat on käsitelty kyseisellä ohjelmalla ja ne ovat liitteissä 1 ja 2.

3.5 Comsol Multiphysics -ohjelmisto ja sen käyttäminen

Comsol Multiphysics on elementtimenetelmään (Finite Element Method) perustuva osittaisdifferentiaaliyhtälöiden numeeriseen ratkaisemiseen tarkoitettu ohjelmisto. Se soveltuu mallinnus- ja simulointiympäristöksi monenlaisiin teknis-tieteellisiin sovellutuksiin, kuten sähkömagnetiikkaan, diffuusioilmiöihin, lämmönsiirtoon, virtausmekaniikkaan, rakenneanalyysiin. Ohjelmisto toimii Windows-, Sun-, Linux- ja Macintosh-käyttöjärjestelmillä.

Aiemmalta nimeltään ohjelmisto on Femlab. Femlabista on versiosta 3.2 alkaen tullut Comsol Multiphysics -niminen tuote. Tällä hetkellä uusien versio ohjelmistosta on 4.0a, jossa on runsaasti uusia piirteitä. Comsol 4.0:ssa on laskenta nopeutunut merkittävästi, muistin kulutuksessa on 10 % vähennys ja sovellusmoodit optimointiin. Mallinnusverkon rakentamiseen on tehty lukuisia parannuksia ja jälkikäsitteilyyn lisätty ominaisuuksia. Yleisesti ottaen kaikkiin moduuleihin on tehty parannuksia ja lisäyksiä. (4)

Comsol Multiphysics soveltuu erinomaisesti seuraaville aloille (5):

- aaltoyhtälöiden ratkaiseminen ja virtaustekniikka

- kemian tekniikka sekä klassinen- ja kvanttifysiikka
- lämmönsiirtoprosessit sekä ominaisarvoanalyysi
- optiikka, sähkömagnetiikka, akustiikka, biotieteet ja geofysiikka
- osittaisdifferentiaaliyhtälöt ja rakenteiden mekaniikka
- aineen- ja massansiirtoprosessit

Tämän työn kuvauskohteen rakenteet mallinnettiin tietokoneella Comsol Multiphysics -ohjelmalla. Lämpötila-antureiden tallentama säädädata oli oleellinen osa mallintamista. Rakenteet piirettiin Autocad-ohjelmalla ja tuotiin suoraan Comsoliin tai sitten piirrettiin itse Comsol Multiphysics -ohjelmalla. Kaikki 3D-kuvat piirrettiin Comsolilla, koska se oli helpompaa kuin autocadilla piirtäminen. Yleisesti ottaen piirtämällä kaikki rakenteet Comsolilla säästy paljon aikaa ja vaivaa.

Kun rakenne oli mallinnettu Comsol-ohjelmistolla, määriteltiin rakenteen eri rakennusosien U-arvot sekä pintavastukset. Jokaisella rakennusmateriaalilla on omat arvonsa ja nämä saatiin suoraan C4 Suomen rakentamismääräyskokoelmasta. Tämän jälkeen laitettiin lämpötilat tunnin välein mitattuna koko edellisen vuorokauden ajalta. Kun kaikki tämä oli tehty, laitettiin laskenta vain päälle ja tietokone laski automaattisesti rakenteen pintalämpötilat sisäpuolelle ja ulkopuolelle 0,1 °C:n tarkkuudella. Joskus Comsol-ohjelmisto ei anna oikeita tuloksia jatkuvuustilassa, kun lämpötiladataa on vain yhden vuorokauden ajalta. Jos näin käy täytyy, lämpötiladataa ilmoittaa useampien päivien ajalta.

Tämän ohjelman käyttäminen ei ole kovin helppoa. Onkin hyvä perehtyä hyvin ohjelman ominaisuuksiin ennen kuin rupeaa mallintamaan rakenteita. Tällöin vältetään suuremmilta ongelmilta ja saadut tulokset ovat oikeita sekä luotettavia.

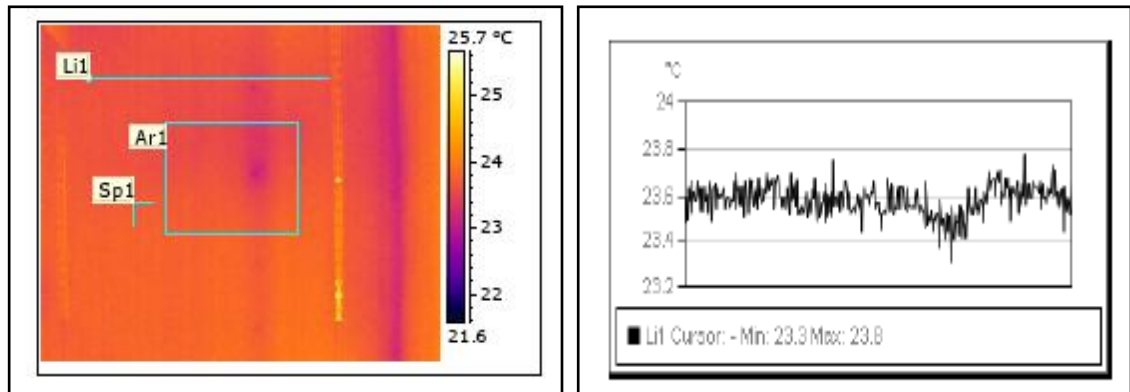
4 RAKENTEIDEN PINTALÄMPÖTILAT

Rakenteet eivät koskaan ole tasalämpöisiä, ja tutkittaessa pintalämpötiloja tämä asia tuli hyvin esille. Usein varsinkin rakenteiden nurkissa oli huomattavissa lämpötilaeroja verrattuna suoran seinän osaan. Tämän asian seurauksena lämpötiloja tutkittiin vain suoran seinän osalta, vaikka kuvauksia sekä Comsol-mallinuksia tehtiin myös nurkista. Huomioon otettiin myös mahdolliset kameran säätövirheet sekä sääolosuhteet.

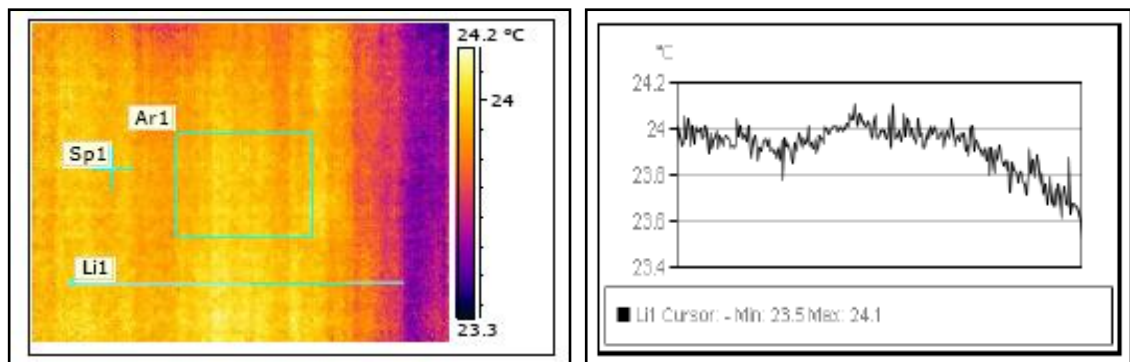
4.1 Pintalämpötilat lämpökameralla

Kun rakenteet kuvattiin rakennuksen sisäpuolelta kahdella eri kameralla, niiden väliset eroavaisuudet olivat keskimäärin vain 0,1–1,0 °C . Nämä erot johtuvat yleensä siitä, että P660-kamerassa on parempi kuvanlaatu ja se mittaa lämpötilaa pienemmältä alueelta kuin B400-kamera. Ensimmäisien kuvauksien aikana kuitenkin huomattiin, että P660-kameran tulokset olivat vääristyneitä. Kamera antoi aivan liian suuria lukemia ilmanlämpötilaan verrattuna. Kameran mukaan rakenteiden pintalämpötilat olivat jopa 3–5 °C korkeampia kuin rakenteen ympärillä ollut ilmanlämpötila. Tämän seurauksena kamera lähetettiin uudestaan kalibroitavaksi ja siihen vaihdettiin pari rikkoutunutta osaa uusin. Korjauksien jälkeen P660-kameralla saatiin jälleen hyviä tuloksia, mutta jossain määrin sen tuloksissa oli edelleen epäselvyyksiä. Tuloksista saatiin kuitenkin otettua muutama kuva raportteihin käsiteltäviksi ja tutkittavaksi. Tutkimuksissa luotettiin kuitenkin enemmän B400-kameran tuloksiin. Tämä osoitti sen, että kuvauksia tehtäessä onkin oltava tarkkana ja muistaa tehdä kameran kalibrointi säännöllisin välein.

Tutkimuskohteen rakenteiden kuvaustuloksissa näkyy hyvin, kuinka paljon eroa on kameroiden kesken kuvanlaadulla. Kuvasta 6 huomataan, että P660-kameran lämpökuvat ovat erittäin tarkkoja. Kuvasta 7 on hyvin todettavissa, että B400-kameran lämpökuvat ovat hieman epäselviä. Kummankin kameran ottamat normaalit valokuvat ovat sen sijaan tarkkoja ja niistä saa hyvin selvää. Tutkitun rakenteen kuvaustulokset ovat liitteissä 1 ja 2.



KUVA 6. Lämpökamerankuva P660-kameralla ja pintalämpötilakäyrä Li1 rakenteen sisäpinnasta 23.4.2010



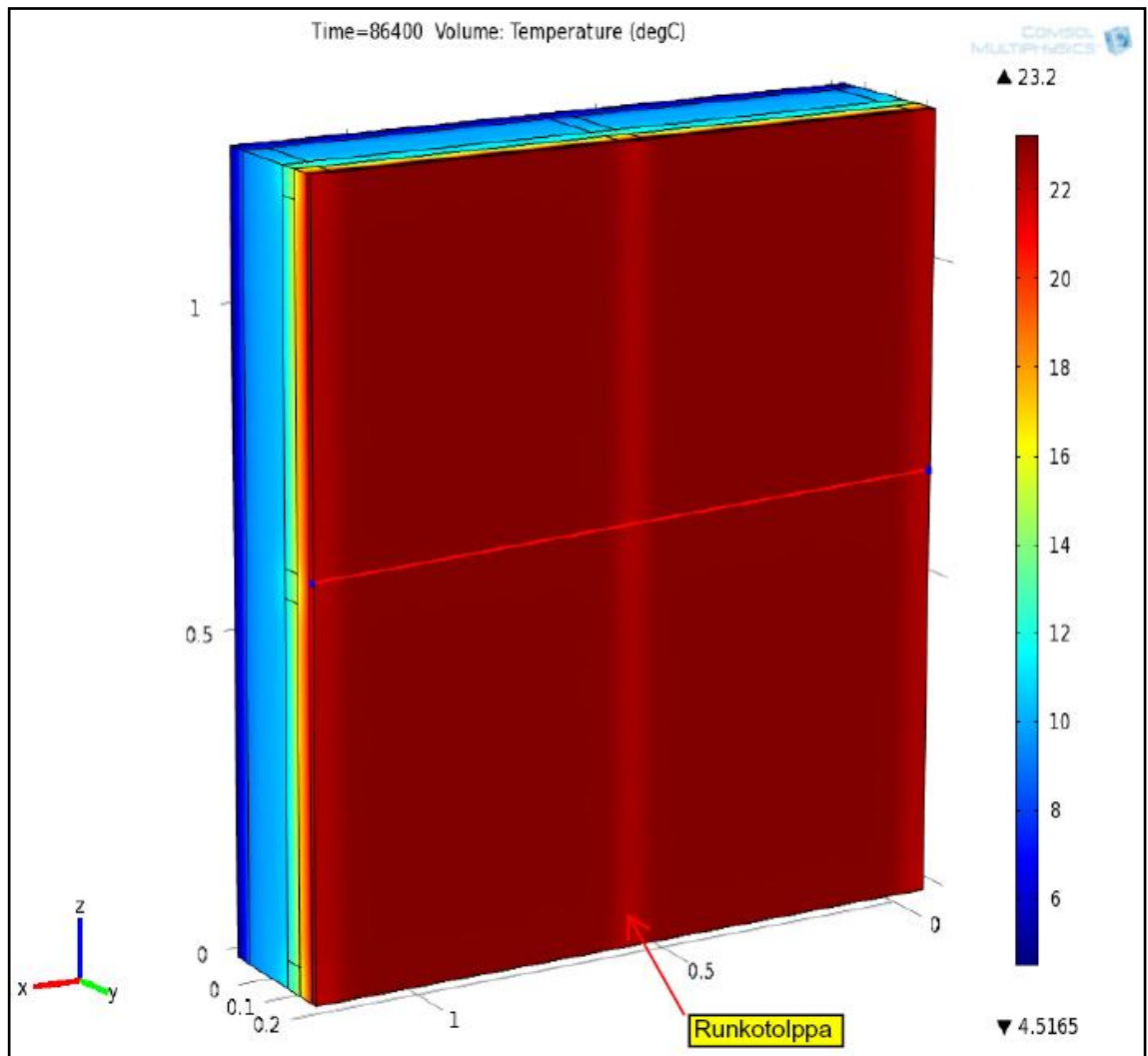
KUVA 7. Lämpökamerankuva B400-kameralla ja pintalämpötilakäyrä Li1 rakenteen sisäpinnasta 9.4.2010

Tutkittaessa lämpökamerakuvien tuloksia ja verrataillessa niitä rakenteiden ympärillä olleeseen ilmanlämpötilaan, huomattiin jonkin verran eroavaisuuksia. Sisäpuolelta kuvattaessa eroavaisuutta ilmanlämpötilaan verrattuna oli noin 0,5–1,5 °C, kun taas ulkopuolelta kuvattaessa eroavaisuutta oli keskimäärin 0,1–1,6 °C. Pintalämpötila onkin normaalisti 0,1–1,5 °C rakenteissa alhaisempi kuin ympärillä oleva ilmanlämpötila, varsinkin talvella.

4.2 Pintalämpötilat Comsol Multiphysics -ohjelmistolla

Talo Rintamäen rakenteet mallinnettiin erikseen kummankin kuvauskerran jälkeen Comsol Multiphysics -ohjelmistolla. Tässä työssä käytettiin versiota 4.0a, joka on uusin ohjelmiston versio. Comsol-ohjelmiston antamien tulosten mu-

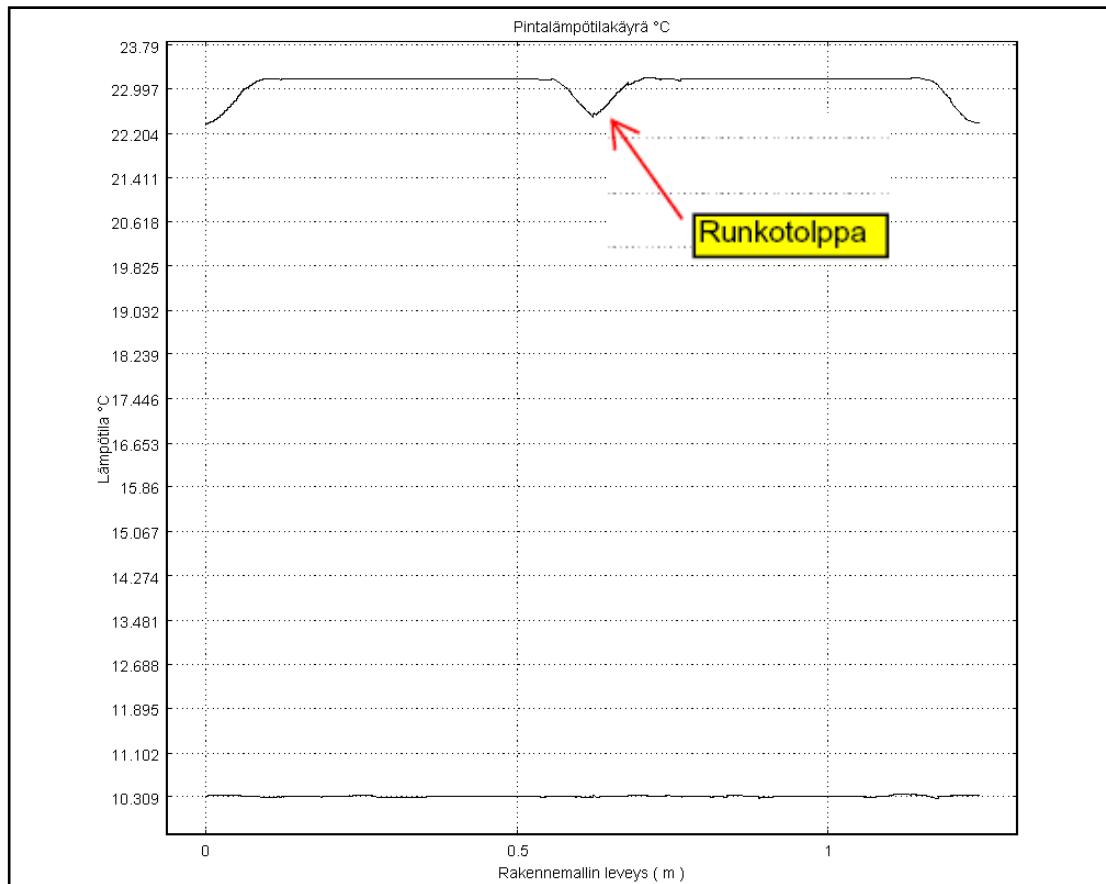
kaan lämpötilat erosivat rakenteiden ympäröivästä ilmasta keskimäärin 0,1–1,2 °C sisäkuvissa ja ulkokuvien mukaan 0,1–1,6 °C. Malleihin syötettiin Lämpötiladataa yhden vuorokauden ajalta. Ulkona lämpötilanvaihtelua oli runsaasti, mutta sisällä lämpötila pysyi samana koko vuorokauden ajan. Comsol Multiphysics -kuvissa kohta, josta pintalämpötilakäyrät on saatu, näkyy rakenteiden pinnassa punaisena viivana. Kuvassa 8 näkyy hyvin kohta, josta lämpötilakäyrä on otettu. Comsol Multiphysics -ohjelmistolla tehdyt mallit ja tulokset ovat liitteissä 4 ja 5.



KUVA 8. Comsol Multiphysics -kuva sisäpuolelta 9.4.2010

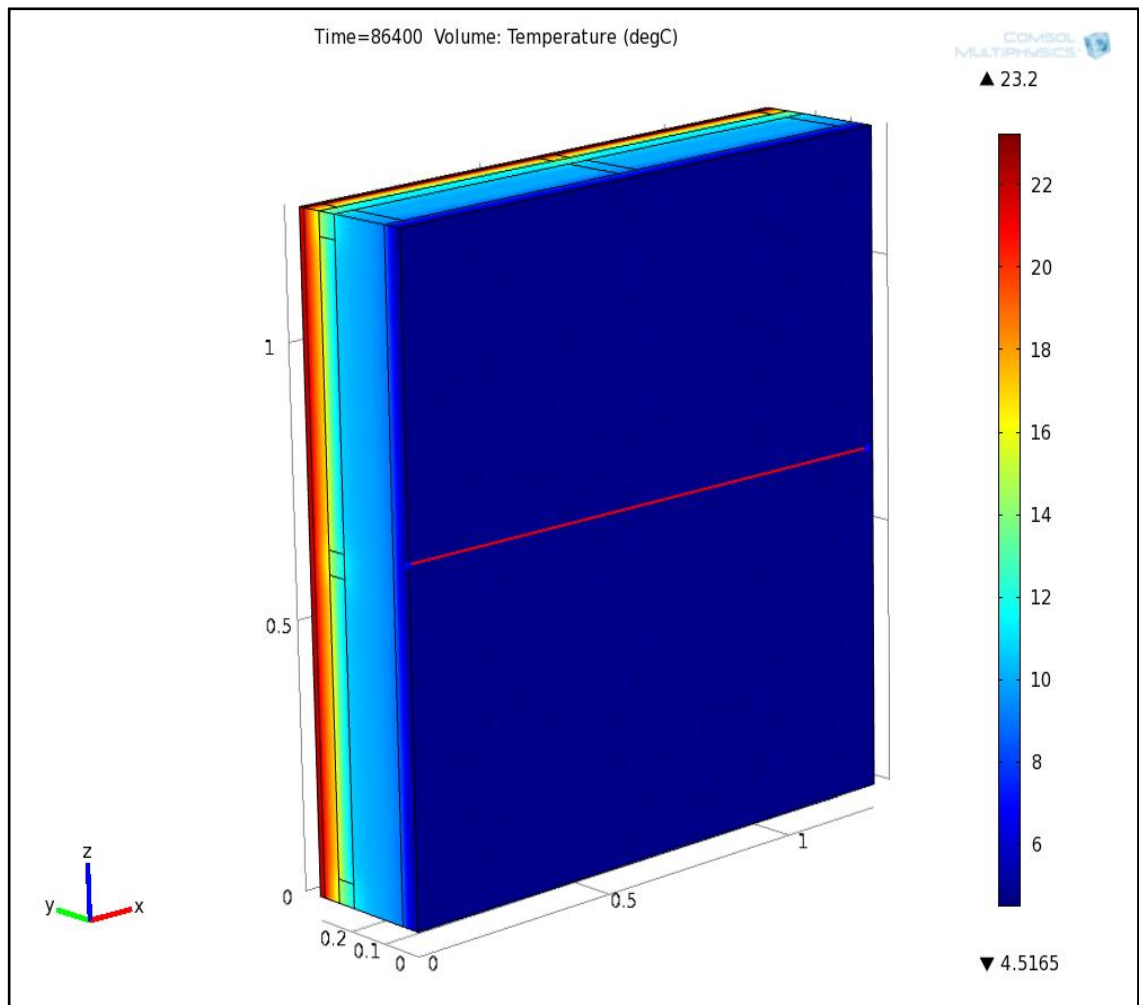
Kuvassa 9 näkyy Comsol-ohjelmistolla saatu pintalämpötilakäyrä rakenteen sisäpinnasta. Huomataan, että lämpötila on sen mukaan keskimäärin 23,2 °C rakenteen keskellä ja runkotolppien kohdalla 22,5 °C. Rakenteen ympärillä vallit-

seva lämpötila oli 24,5 °C 9.4.2010 kuvauskerran ja mallintamisen aikana. Huomattiinkin, että Comsol-ohjelmiston mukaan ulkolämpötilalla ei ollut vaikutusta pintalämpötiloihin rakenteen sisäpuolella sisälämpötilan pysyessä koko ajan vakiona.

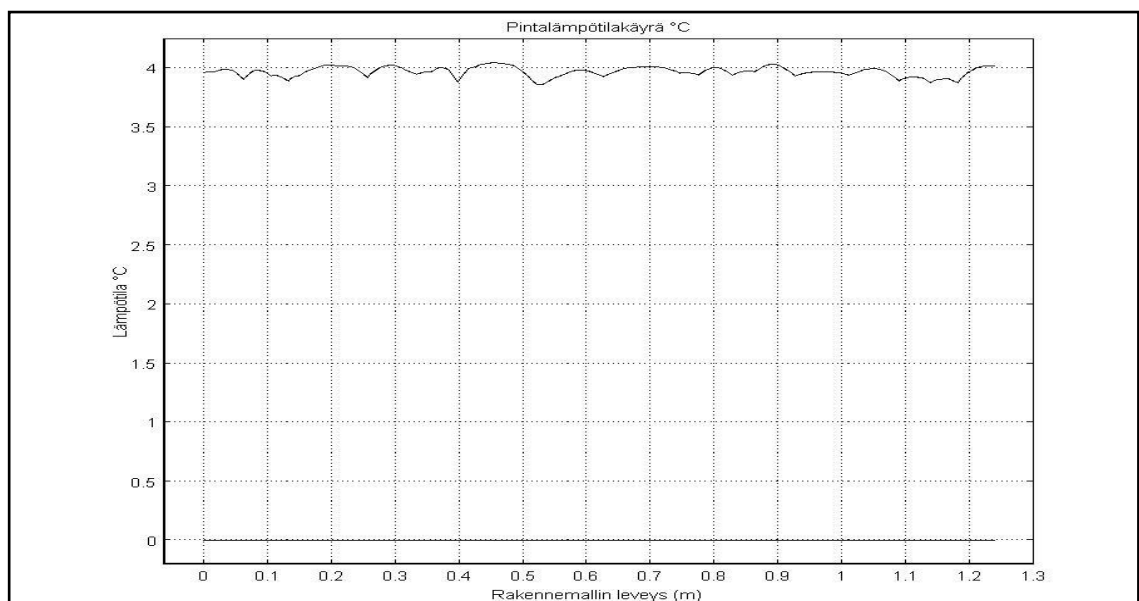


KUVA 9. Comsol Multiphysics -ohjelmistolla saatu pintalämpötilakäyrä 9.4.2010 rakenteen sisäpinnasta (lämpötila sisällä 24,5 °C)

Ulkopuolelta tehdyissä malleissa on keskenäisiä eroja runsaasti. Huomattiin, että lämpötilavaihtelut vaikuttavat paljon tuloksiin. 9.4.2010 tehtyjen mittauksien ja kuvauksien aikana ulkolämpötila oli 5,6 °C ja pysyi samana koko kuvauksen ajan. Comsol-ohjelmistolla saaduissa ulkotilakuvissa huomataan, että rakenteen pinnassa on sen mukaan 0,5–2,0 °C alhaisemmat lämpötilat kuin ulkoilma on. Kuvassa 10 näkyy punaisena viivana jälleen kohta, josta lämpötilakäyrä on saatu. Tämä saatu lämpötilankäyrä on kuvassa 11.

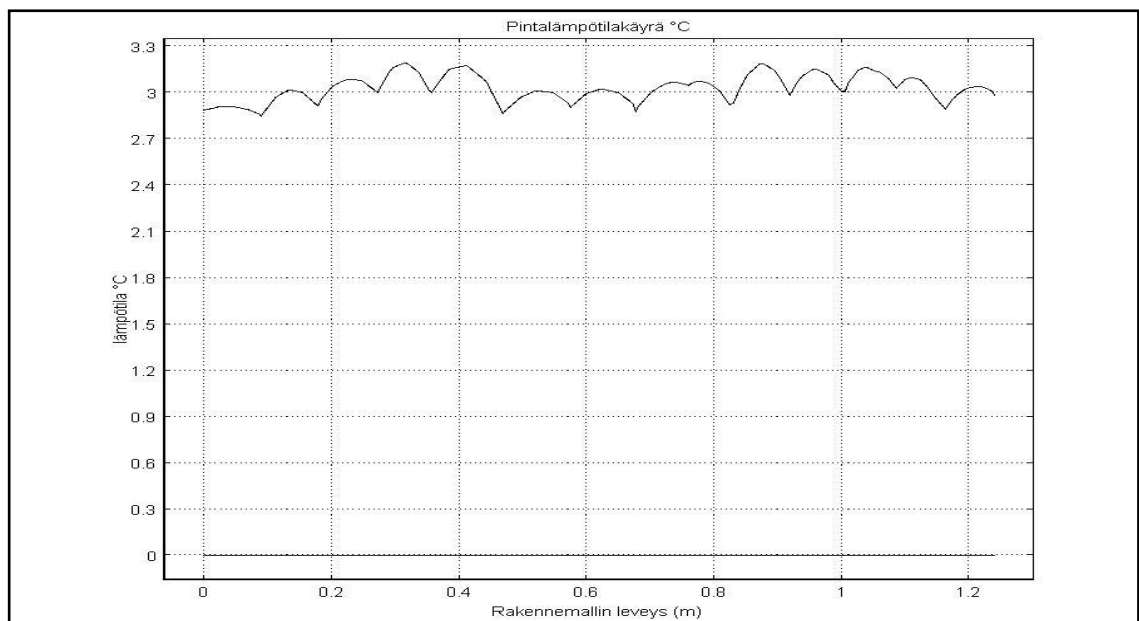


KUVA 10. Comsol Multiphysics -kuva 9.4.2010 ulkopuolelta



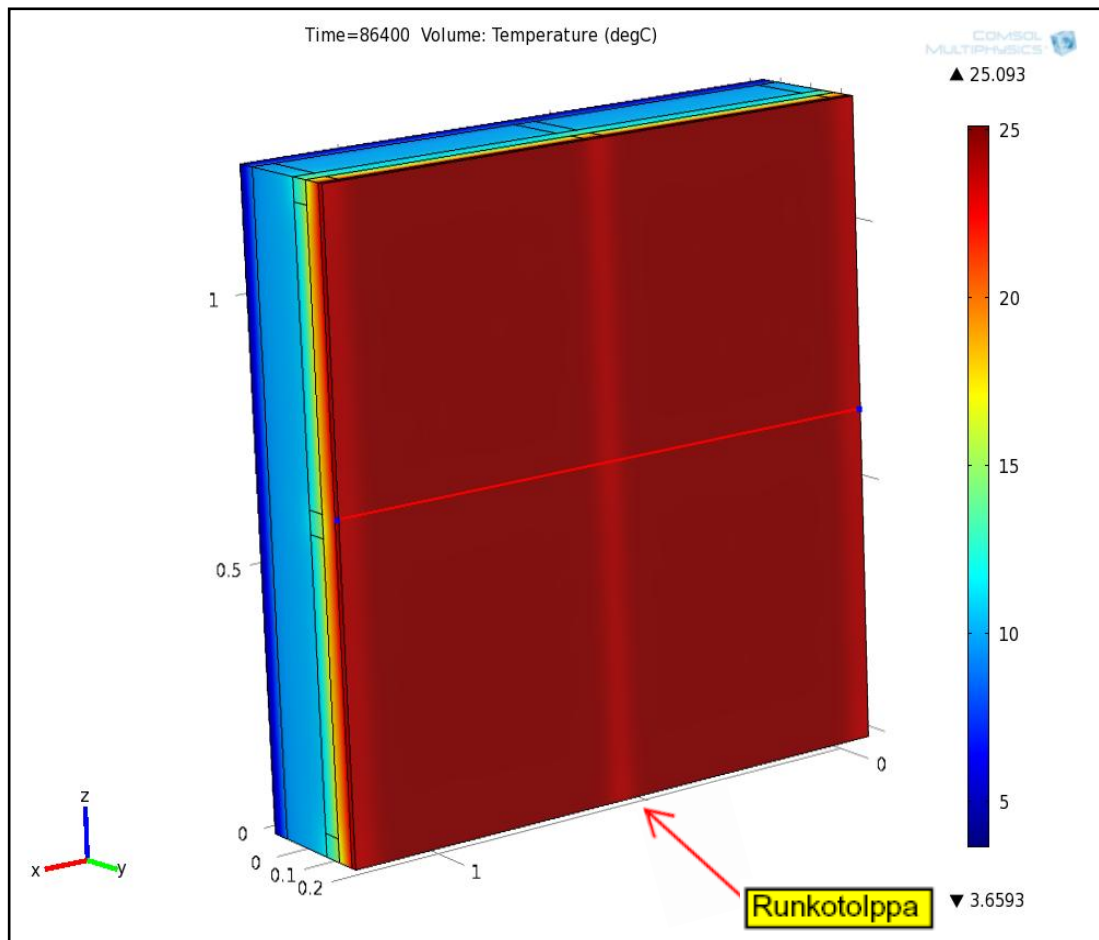
KUVA 11. Comsol Multiphysic -ohjelmistolla saatu pintalämpötiläkäyrä 9.4.2010 rakenteen ulkopinnasta

23.4.2010 tehtyjen mittausten aikana lämpötila ulkona oli 4,8 °C. Kuvasta 12 huomataan, että rakenteen pinnassa on Comsol-ohjelmiston mukaan 0,5–2,0 °C alhaisemmat lämpötilat kuin ulkoilma on. Eroa on siis saman verran kuin 9.4.2010 tehdyissä kuvauksissa. Tutkittaessa pintalämpötiloja ulkoa huomataan, että ilmanlämpötilanvaihtelut ilmenevät myös rakenteen pinnassa epätasaisina pintalämpötiloina Comsol-ohjelmiston malleissa.

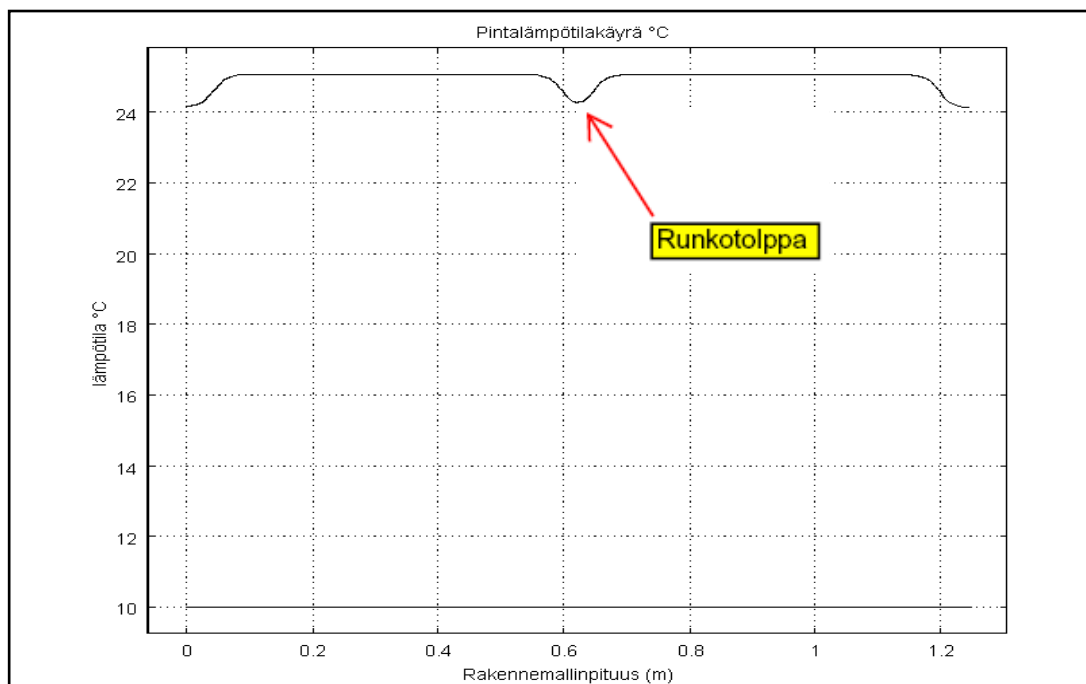


KUVA 12. Comsol Multiphysics -ohjelmistolla saatu pintalämpötilakäyrä rakenteen ulkopinnasta 23.4.2010

Lämpötila sisällä 23.4.2010 oli 25,5 °C. Comsol-ohjelmistolla saadun pintalämpötilakäyrän mukaan pintalämpötila rakenteen keskellä on noin 25,1 °C ja runkotolppien kohdalla 24,1 °C. Kuvassa 13 näkyy jälleen kohta, josta rakenteen pintalämpötilakäyrä on saatu 23.4.2010. Kuvassa 14 on tämä lämpötilakäyrä rakenteen pinnasta. Hyvin on huomattavissa jälleen se, että sisällä pintalämpötilat ovat Comsol-ohjelmiston mukaan tasaisena koko rakenteessa paitsi tunkotolppien kohdalla. Todellisuudessa rakenteet eivät ole näin tasalämpöisiä. Tämä asia ilmenee hyvin tehdyissä lämpökamerakuvauksissa.



KUVA 13. Comsol Multiphysics -kuva 23.4.2010 sisäpuolelta



KUVA 14. Comsol Multiphysics -ohjelmistolla saatu pintalämpötiläkäyrä rakenteen sisäpinnasta 23.4.2010

5 PINTALÄMPÖTILOJEN EROAVAISUUDET

Lämpökameran antamien kuvien ja Comsol-ohjelmiston välillä on vain pieniä eroavaisuuksia. Talo Rintamäen rakenteista 9.4.2010 tehdyssä kuvauksissa mitattu sisälämpötila oli noin 24,5 °C ja ulkolämpötila 5,6 °C. Tällä kuvauskerralla lämpökameralla saadussa kuvassa on seinän alueen maksimilämpötila sisällä 24,1 °C ja Comsol-ohjelmistolla saaduissa tuloksissa lämpötila oli ainoastaan 23,2 °C. Rakenteen ulkopuolelta kuvattaessa lämpökameralla saatu kuva näyttää 5,7 °C, kun taas Comsol-ohjelmistolla saaduissa tuloksissa lämpötila oli ainoastaan 4,38 °C. Minimilämpötila rakenteen pinnassa sisällä oli kameralla kuvattuna 23,5 °C ja Comsol-ohjelmistolla saaduissa tuloksissa lämpötila oli jälleen alhaisempi, vain 22,5 °C. Ulkona minimilämpötila lämpökameralla kuvattuna oli 5,1 °C ja Comsol-ohjelmistolla saaduissa tuloksissa lämpötila oli vain 3,7 °C. Tällä kuvauskerralla käytettiin kamerana FLIR B400 -kameraa.

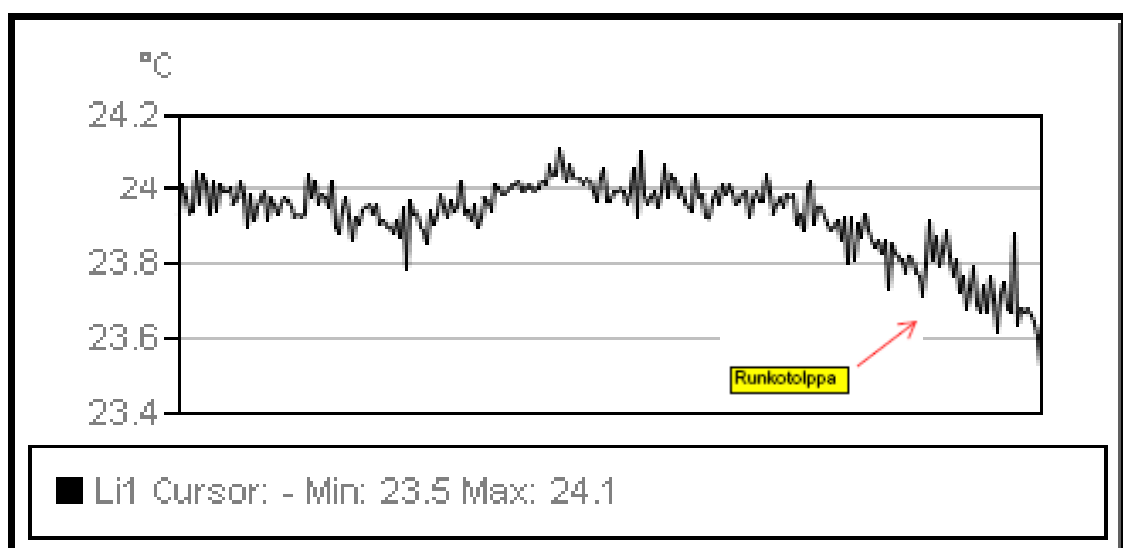
Toisella kuvauskerralla 23.4.2010 kohteen mitattu sisälämpötila oli 25,5 °C ja ulkolämpötila tämän kuvauskerran aikana 4,8 °C. Tällä kuvauskerralla lämpökamera näytti sisäseinän pintalämpötilaksi 23,8 °C, kun taas Comsol-ohjelmistolla saaduissa tuloksissa lämpötila oli peräti 25,09 °C. Ulkoapäin kuvattaessa lämpökamera näytti seinän lämpötilaksi 4,3 °C ja Comsol-ohjelmistolla saaduissa tuloksissa lämpötila oli vain 3,36 °C. Minimilämpötilat sisäseinän pinnassa olivat lämpökameran tuloksissa 22,7 °C ja Comsol-ohjelmistolla saaduissa tuloksissa lämpötila oli vain 24,2 °C. Ulkona minimilämpötilat rakenteen pinnassa lämpökameran kuvien mukaan oli 3,2 °C astetta ja Comsolilla 2,8 °C, eli Comsolin mukaan hieman kylmempää. Kuvaamisessa käytettiin FLIR P660 -kameraa ja voidaankin todeta, että B400-kameran tulokset olivat lähempänä Comsol-ohjelmiston saamien tulosten kanssa kuin P660-kamera.

Tutkimukset osoittavat, että mittausten välillä on jonkin verran pieniä eroavaisuuksia. Verrattaessa 9.4.2010 tehtyjen lämpökuvauksen tuloksia ja Comsol-ohjelmiston antamia laskennallisia tuloksia keskenään huomataan, että eroa on

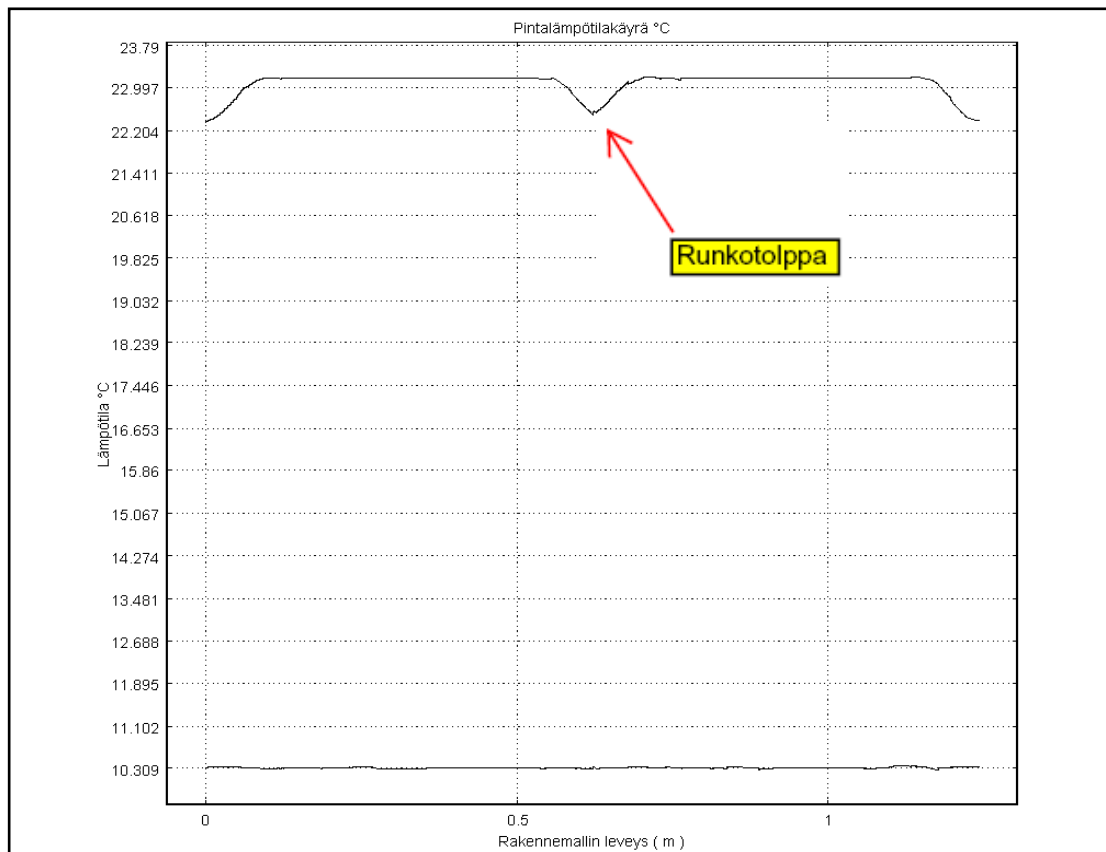
noin 0,9–1,5 °C sisäpintalämpötiloissa. Tällä kuvauskerralla lämpökameralla otettujen kuvien mukaan seinän pintalämpötila sisällä on maksimilämpötiloissa 0,9 °C suurempi kuin Comsol-ohjelmistolla saatujen tulosten mukaan. Samoissa mittauksissa minimilämpötiloja tutkittaessa lämpökamerakuvien mukaan rakenteen pintalämpötila on 1,0 °C suurempi kuin Comsol-ohjelmiston antamien tulosten.

Toisella kuvauskerralla 23.4.2010 mitattuja maksimilämpötiloja tutkittaessa huomataan, että lämpökameran mukaan seinän pintalämpötila on 1,3 °C alhaisempi kuin Comsol-ohjelmiston antamat tulokset. Tutkittaessa myös saman kuvauskerran minimilämpötiloja niin huomataan, että lämpökamerakuvien mukaan minimilämpötilat ovat alhaisempia 1,4 °C kuin Comsol-ohjelmiston antamiin tuloksien mukaan.

Huomattavissa on, että todellisuudessa rakenteen sisäpinnassakin tapahtuu lämpötilanvaihteluita. Tämä ilmenee hyvin siitä, että lämpökameralla saatujen pintalämpötilakäyrien mukaan vaihtelua on rakenteen sisäpinnassa tiheään (kuva 15). Tietokoneen Comsol-ohjelmistolla saatujen tulosten mukaan vain runkotolppien kohdalla lämpötila on eri kuin muualla rakenteen sisäpinnalla (kuva 16). Tämä sama asia huomattiin kummallakin kuvauskerralla.



*KUVA 15. Lämpökameralla saatu pintalämpötilakäyrä rakenteen sisäpinnasta
9.4.2010 (sisälämpötila 24,5 °C)*

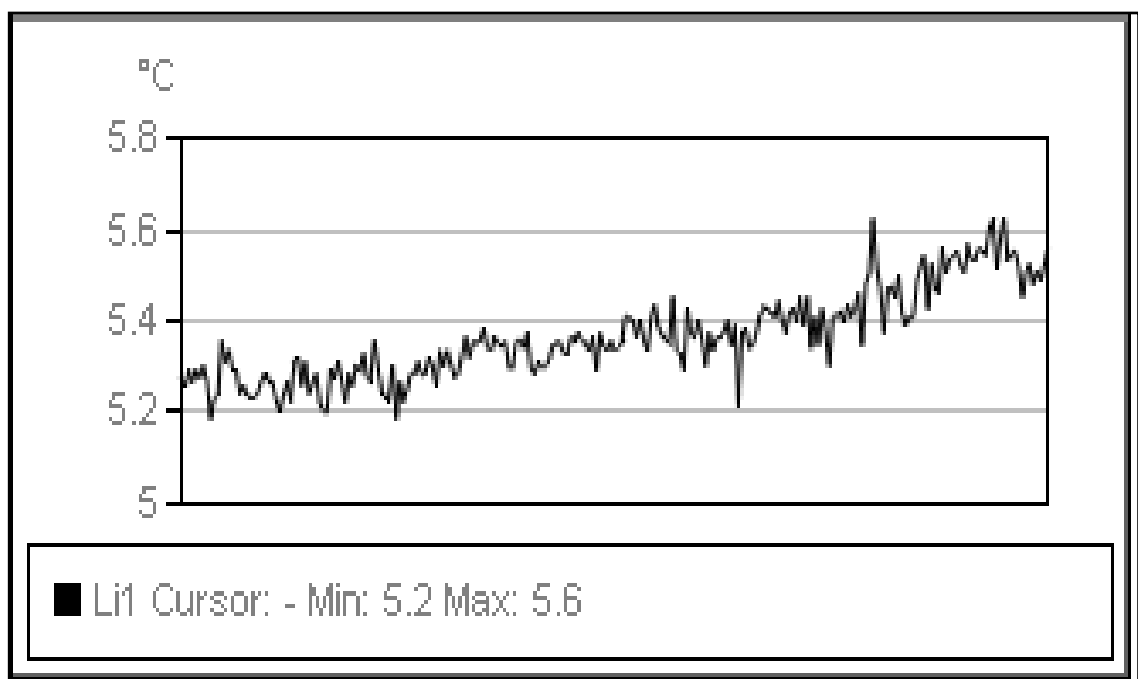


KUVA 16. Comsol Multiphysics -ohjelmistolla saatu pintalämpötilakäyrä rakenteen sisäpinnasta 9.4.2010

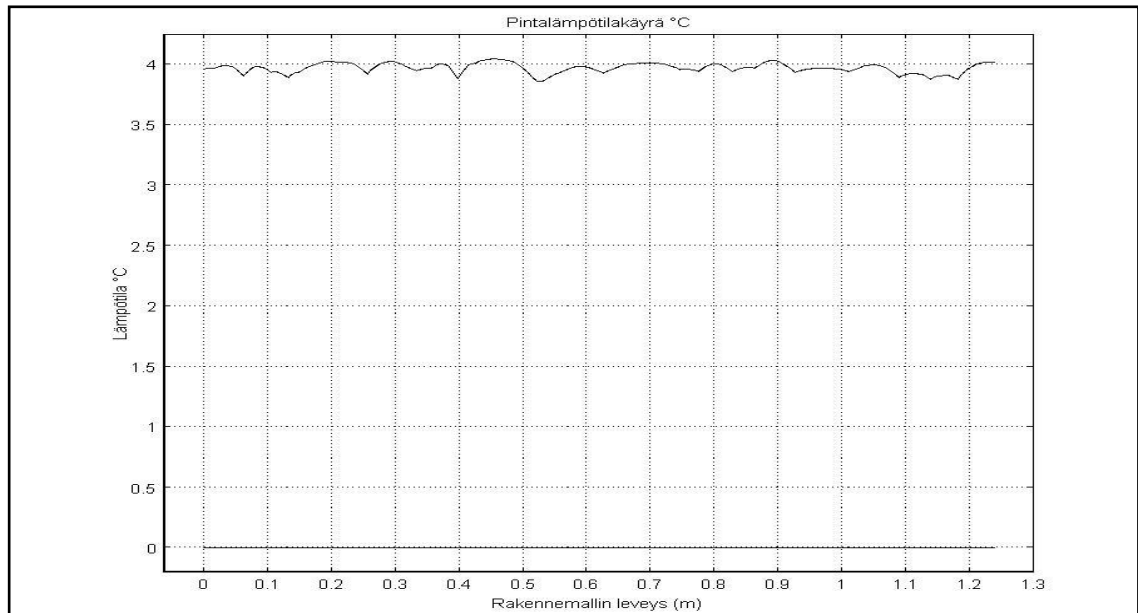
Vertailemalla rakenteen sisäpuolelta saatuja tuloksia keskenään, huomataan jonkin verran eroavaisuuksia. Ensimmäisellä kuvauskerralla 9.4.2010 kameran tulosten mukaan pintalämpötilat ovat korkeampia kuin Comsol-ohjelmiston mukaan on. 23.4.2010 tehdyissä mittauksissa Comsol-ohjelmiston mukaan lämpötilat taas ovat korkeampia kuin lämpökameran antamat tulokset. Tämä asia johtuneen siitä, että toisella kuvauskerralla käytettiin P660-kameraa, jonka kanssa oli ongelmia koko tutkimusten ajan. Myös se asia on vaikuttanut tuloksiin, että rakennuksen ilmanlämpötila vaihteli runsaasti juuri 23.4.2010 tehtyjä kuvauksia ennen. Tämän seurauksena Comsol-ohjelmisto laskee pintalämpötilat korkeammiksi.

Ulkoapäin kuvattaessa huomataan, että kummallakin kuvauskerralla lämpökamera antaa keskiäärin vain 0,4–1,5 °C korkeampia lämpötiloja. Hyvin on huomattavissa, että lämpökameran antamat tulokset ovat lähempänä ulkona kuvauksen aikana vallinnutta ilmanlämpötilaa kuin Comsol-ohjelmiston tulokset.

Tutkittaessa rakenteen ulkopinnasta otettuja pintalämpötilakäyriä huomataan, ettei eroavaisuuksia ole niin paljoa. Kuvassa 17 on lämpökameralla saatu lämpötiläkäyrä rakenteen ulkopinnasta ja lämpötilanvaihteluita on sen mukaan runsaasti. Kuvassa 18 on Comsol-ohjelmistolla saatu lämpötiläkäyrä ja myös sen mukaan lämpötilanvaihteluita on runsaasti. Käyrät ovat samanlaisia ja lämpötilat ovat aika lähellä toisiaan. Voidaankin todeta, että kun ilmanlämpötila vaihtelee säännöllisesti rakenteen ympärillä, niin tällöin Comsol-ohjelmistolla saadaan myös luotettavia tuloksia. Pitää vain huomioida, että laskelmaohjelma ei huomioinut kosteusvirtauksia, tuulta eikä ilmavuotoja.



KUVA 17. Lämpökameralla saatu pintalämpötiläkäyrä rakenteen ulkopinnasta 9.4.2010 (ulkolämpötila 4,8 °C)



KUVA 18. Comsol Multiphysics -ohjelmistolla saatu pintalämpötilakäyrä rakenteen ulkopinnasta 9.4.2010

Rakenteiden pintalämpötilojen minimiarvot ilmenevät yleisesti runkotolppien sekä nurkkien kohdalla, joissa tiiveys sekä eristävyys eivät ole yhtä hyviä kuin muualla rakenteessa. Tämä ilmenee hyvin varsinkin Comsol-ohjelmisto tuloksissa ja kuvissa. Maksimilämpötilat saadaan rakenteen keskikohdalta suoraan eristeiden kohdalta.

6 YHTEENVETO

Tällä työllä pyrittiin selvittämään lämpökameran ja Comsol Multiphysic-ohjelmiston eroavaisuuksia rakenteiden pintalämpötiloja tutkittaessa. Saaduissa tuloksissa ilmeni hyvin, että lämpökamera antaa yleisesti jopa 0,5–1,8 °C korkeampia pintalämpötiloja sisätiloissa tehdyissä mittauksissa kuin Comsol-ohjelmisto. Tämä johtuneen osittain siitä, että lämpökameralla saadaan suoraan sen hetkinen pintalämpötila esille, kun taas Comsol-ohjelmisto laskee pintalämpötilan ottaen huomioon koko vuorokauden ajan lämpötilojen vaihtelut. Syynä voivat myös olla pintavastukset, koska niihin vaikuttaa suoraan myös esimerkiksi konvektio eli lämmönsiirtyminen aineen virtauksen mukana. Myös itse lämpötilat vaikuttavat pintavastukseen.

Talo Rintamäen rakenteista saatiin suoritettua kuvaukset myös ulkopuolella. Tulokset osoittivat sen, että Comsol-ohjelmisto antaa 0,4–1,4 °C alhaisempia lämpötiloja kuin lämpökameralla saatavat tulokset. Syy siihen, miksi Comsol-ohjelmisto näyttää alhaisempia lämpötiloja on se, että ohjelma ottaa huomioon koko edellisen vuorokauden lämpötilanvaihtelut. Lämpökameran tuloksiin on kuitenkin saattanut vaikuttaa tuuli, vaikka kuvaushetkillä sitä ei ollut juurikaan huomattavissa. Ulkoapäin kuvattaessa huomattiin myös, että lämpökameran mukaan rakenteen pintalämpötila on keskimäärin 0,5–1,2 °C alhaisempi kuin ympärillä oleva lämpötila. Comsol-ohjelmiston mukaan eroa on keskimäärin noin 0,5–2,0 °C. Tuloksista on hyvin huomattavissa, että eroa ei ole paljoa.

Ulkoapäin kuvattaessa huomattiin, että lämpökameran mukaan rakenteen pintalämpötila on keskimäärin 0,5–1,2 °C alhaisempi kuin ympärillä oleva lämpötila. Comsol-ohjelmiston tuloksien mukaan pintalämpötilat ovat keskimäärin noin 0,5–2,0 °C alhaisempia kuin ilmanlämpötila.

Tutkittaessa pintalämpötiloja rakennuksen sisäpuolelta huomattiin, että jokaisella kuvauskerralla lämpökameran mukaan pintalämpötilat ovat keskimäärin 0,5–1,0 °C alhaisempia kuin rakennuksen sisälämpötila. Comsol-ohjelmiston mukaan rakenteen pintalämpötilat oli keskimäärin vain 0,5 °C alhaisempia kuin

sisälämpötila rakennuksessa. Nämä eroavaisuudet johtuvat luultavammin siitä, että Comsol-ohjelmisto ei huomionnut rakenteissa olevia kosteuksia, lämmönsiirtymistä eikä todellisia lämpötilojen sen hetkisiä vaihteluita. Tuloksiin saattoi myös vaikuttaa se, että ohjelmisto otti myös huomioon lämpötilanvaihtelut koko vuorokauden ajalta.

Todellisuudessa rakenteiden pintalämpötilat ovatkin yleisesti 0,5–1,5 °C alhaisempia kuin rakenteen ympärillä oleva lämpötila. Rakennuksen ilmanlämpötila oli kuvattavassa huoneessa erittäin lämmin kummallakin kuvauskerralla. Parhaimmillaan lämpötila oli käynyt jopa 27 °C:ssa ennen 23.4.2010 tehtyjä kuvauksia. Tämä johtuu osittain siitä, että samassa tilassa sijaitti sauna, jota oli lämmitetty edellisenä iltana. Syynä voi myös olla se, että varastohuone, jota kuvattiin oli vain 3,0 m²:n kokoinen ja lattialämmitys oli päällä. Kun huoneen ovi avattiin, huomattiin heti kuinka lämmin ilma siellä oli. Ilmanlämpötila mitattiin puolen tunnin päästä oven avaamisesta mutta rakenteiden pinnat eivät välttämättä olleet kerenneet vielä tässä ajassa tasaantua. Voidaankin todeta, että lämpökamerakuvauksia tehtäessä olisikin hyvä mitata rakenteiden pintalämpötilat myös erillisellä pintalämpömittarilla.

Tuloksista voi hyvin huomata sen, että jos haluaa mahdollisimman tarkkoja tuloksia Comsol-ohjelmistolla, on syytä ottaa huomioon kaikki mahdolliset seikat, jotka voivat vaikuttaa lopullisiin tuloksiin. Näitä ovat kosteus, lämmönsiirtymiset, lämpötilojen vaihtelut, materiaalien tarkat U-arvot ja pintavastukset.

Kun lämpökameralla halutaan mahdollisimman hyviä ja luotettavia tuloksia tulisi kameran asetukset, kuten emissiivisyys, kuvausetäisyys ja viimeisin kalibrointi-päiväys, tarkastaa ennen kuvauksia tarkasti useaan kertaan. Rakenteet olisi hyvä mitata myös pintalämpötilamittarilla. Tällöin tulokset tulevat olemaan luotettavia ja vertailuarvoja saataisiin. Tällä tavalla tuloksia tutkittaessa ei tulisi epätietoisuutta siitä, että ovatko kameran tulokset oikeita ja kameran asetukset oikein. Ulkoapäin kuvatessa on hyvä huomoida myös vallitsevat olosuhteet, varsinkin tuuli.

LÄHTEET

1. Paloniitty, Sauli – Kauppinen, Timo 2006. Rakennusten lämpökuvaus. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
2. KH 24-00368. 2005. Rakennuksen lämpökuvaus. Rakennustieto Oy.
3. C4 Suomen rakentamismääräyskokoelma 2003. Ympäristöministeriön asetus lämmöneristyksestä.
4. CSC-Tieteen tietotekniikan keskus. 2010. Saatavissa: www.csc.fi/tutkimus/alat/numeriikka/somsolmulsepeli. Hakupäivä 17.3.2010.
5. COMSOL Group. 2010. Saatavissa: <http://www.comsol.fi>. Hakupäivä 17.3.2010.
6. Asumis- ja terveysministeriön oppaita 2003:1. 2003. Asumisterveysohje. Saatavissa: http://www.finlex.fi/pdf/normit/14951-asumisterveysohje_pdf.pdf. Hakupäivä 25.4.2010.

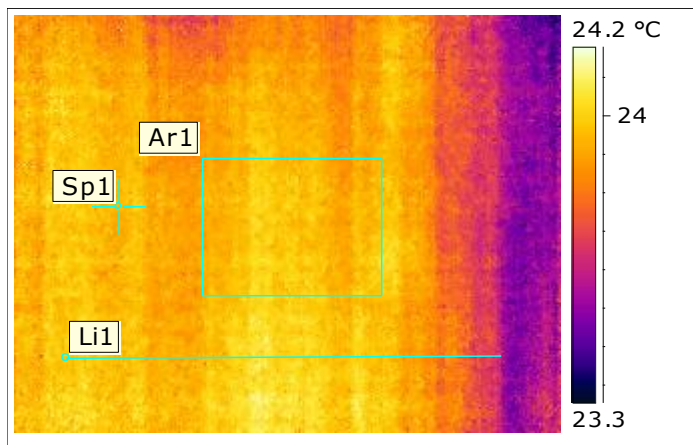
LIITTEET

- LIITE 1. Talon Rintamäen lämpökuvauksraportti 9.4.2010
- LIITE 2. Talon Rintamäen lämpökuvauksraportti 23.4.2010
- LIITE 3. Talon Rintamäen seinärakenne
- LIITE 4. Comsol Multiphysics -tulokset 9.4.2010
- LIITE 5. Comsol Multiphysics -tulokset 23.4.2010
- LIITE 6. Lämpötilat vuorokauden ajalta 9.4.2010 ja 23.4.2010

Huonetila / Kuvattu kohde

Varastohuone B400-kameralla 9.4.2010

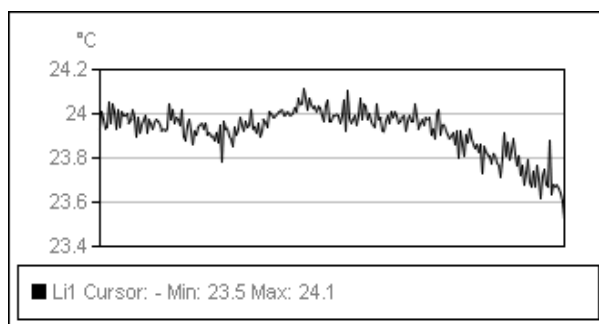
Lämpökameran kuva



Valokuva

**Mittaustulostaulukko:**

Mittausparametrit	Arvot	Lämpötilaindeksi, min:	104 %
Emissiivisyys	0.95	Lämpötilaindeksi, max:	108 %
Sp1 Lämpötila	23.2 °C	Lämpötilaindeksi, piste:	106 %
Ar1 Max. Lämpötila	24.1 °C		
Ar1 Min. Lämpötila	22.8 °C		



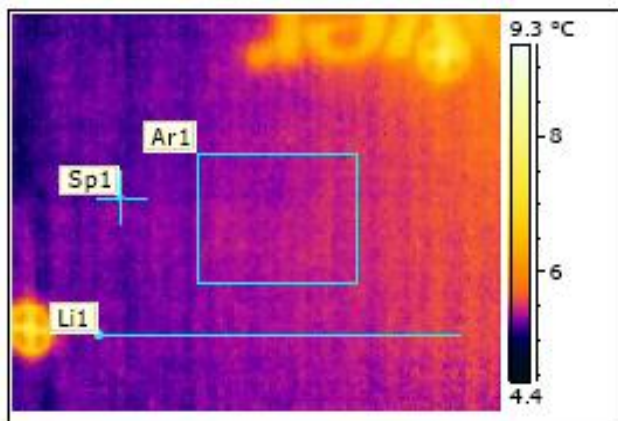
Ulkolämpötila	Sisälämpötila	Paine-ero	Tuuli	Pilvisyys
5,6	24,5	-4,0	–	–

Korjausluokka 4

Huonetila / Kuvattu kohde

Varastohuone ulkoapäin B400-kameralla 9.4.2010

Lämpökameran kuva



Valokuva

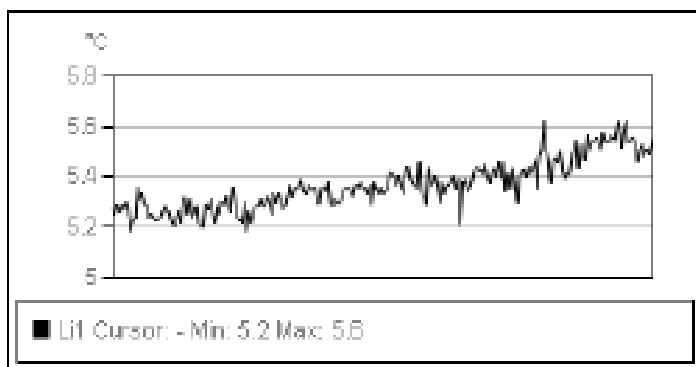
**Mittaustulostaulukko:**

Mittausparametrit	Arvot
Emissiivisyys	0.95
Sp1 Lämpötila	5.3 °C
Ar1 Max. Lämpötila	5.7 °C
Ar1 Min. Lämpötila	5.1 °C

Lämpötilaindeksi, min: -

Lämpötilaindeksi, max: -

Lämpötilaindeksi, piste: -

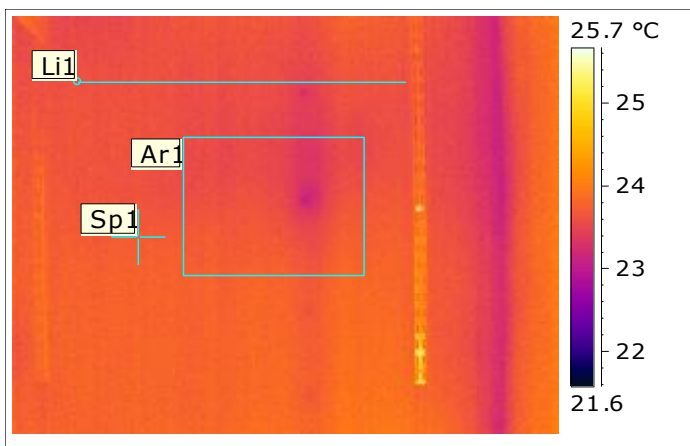


Ukolämpötila	Sisälämpötila	Paine-ero	Tuuli	Pilvisyys
5,6	24,5	-4,0	-	-

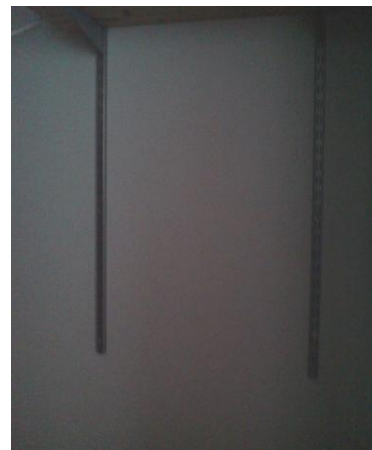
Huonetila / Kuvattu kohde

Varastohuone P660-kameralla 23.4.2010

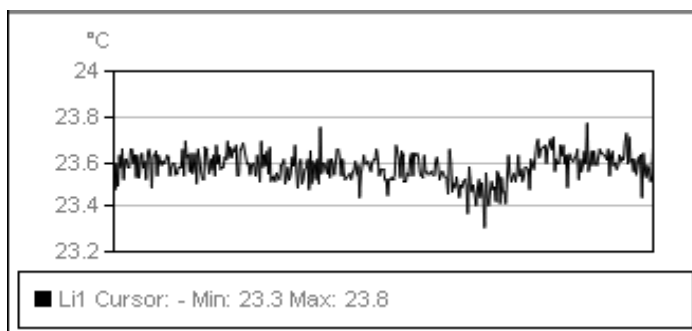
Lämpökameran kuva



Valokuva

**Mittaustulostaulukko:**

Mittausparametrit	Arvot	
Emissiivisyys	0.95	Lämpötilaindeksi, min: 100 %
Sp1 Lämpötila	22.8 °C	Lämpötilaindeksi, max: 105 %
Ar1 Max. Lämpötila	23.2 °C	Lämpötilaindeksi, piste: 104 %
Ar1 Min. Lämpötila	22.7 °C	



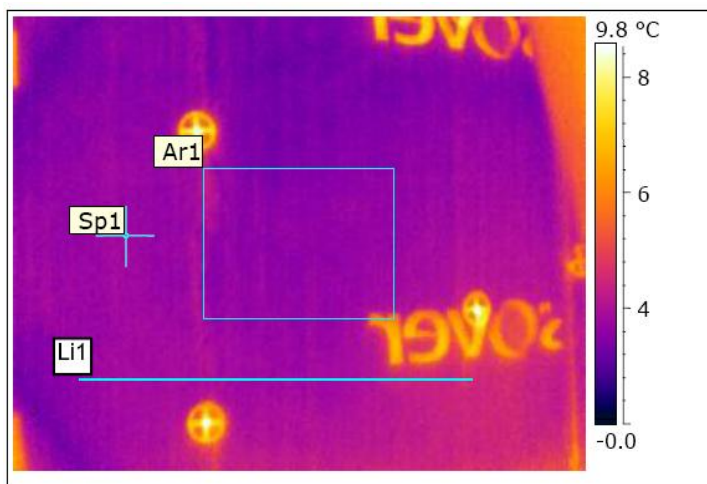
Ukolämpötila	Sisälämpötila	Paine-ero	Tuuli	Pilvisyys
4,8	25,5	-4,0	-	-

Korjausluokka 4

Huonetila / Kuvattu kohde

Varastohuone ulkoapäin P660-kameralla 23.4.2010

Lämpökameran kuva



Valokuva

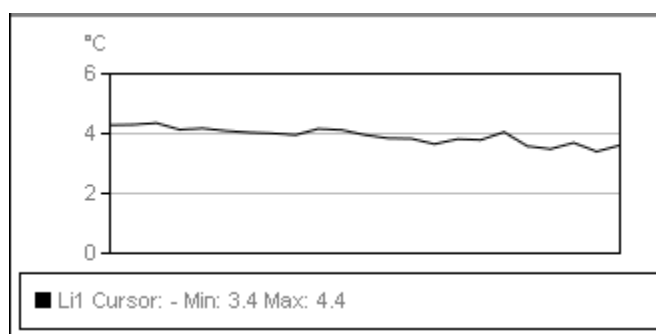
**Mittaustulostaulukko:**

Mittausparametrit	Arvot
Emissiivisyys	0.95
Sp1 Lämpötila	3.6 °C
Ar1 Max. Lämpötila	3.9 °C
Ar1 Min. Lämpötila	3.2 °C

Lämpötilaindeksi, min: -

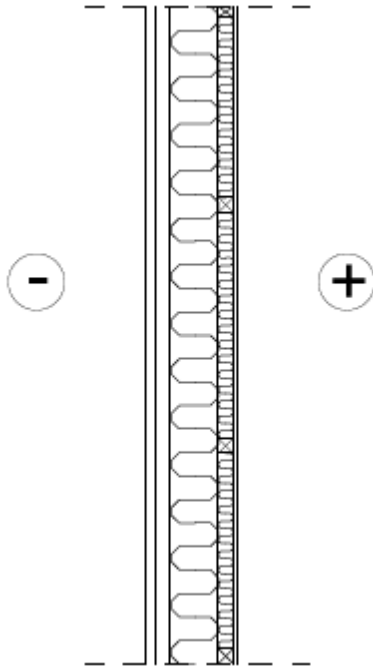
Lämpötilaindeksi, max: -

Lämpötilaindeksi, piste: -



Ulkolämpötila	Sisälämpötila	Paine-ero	Tuuli	Pilvisyys
4,8	25,5	-4,0	-	-

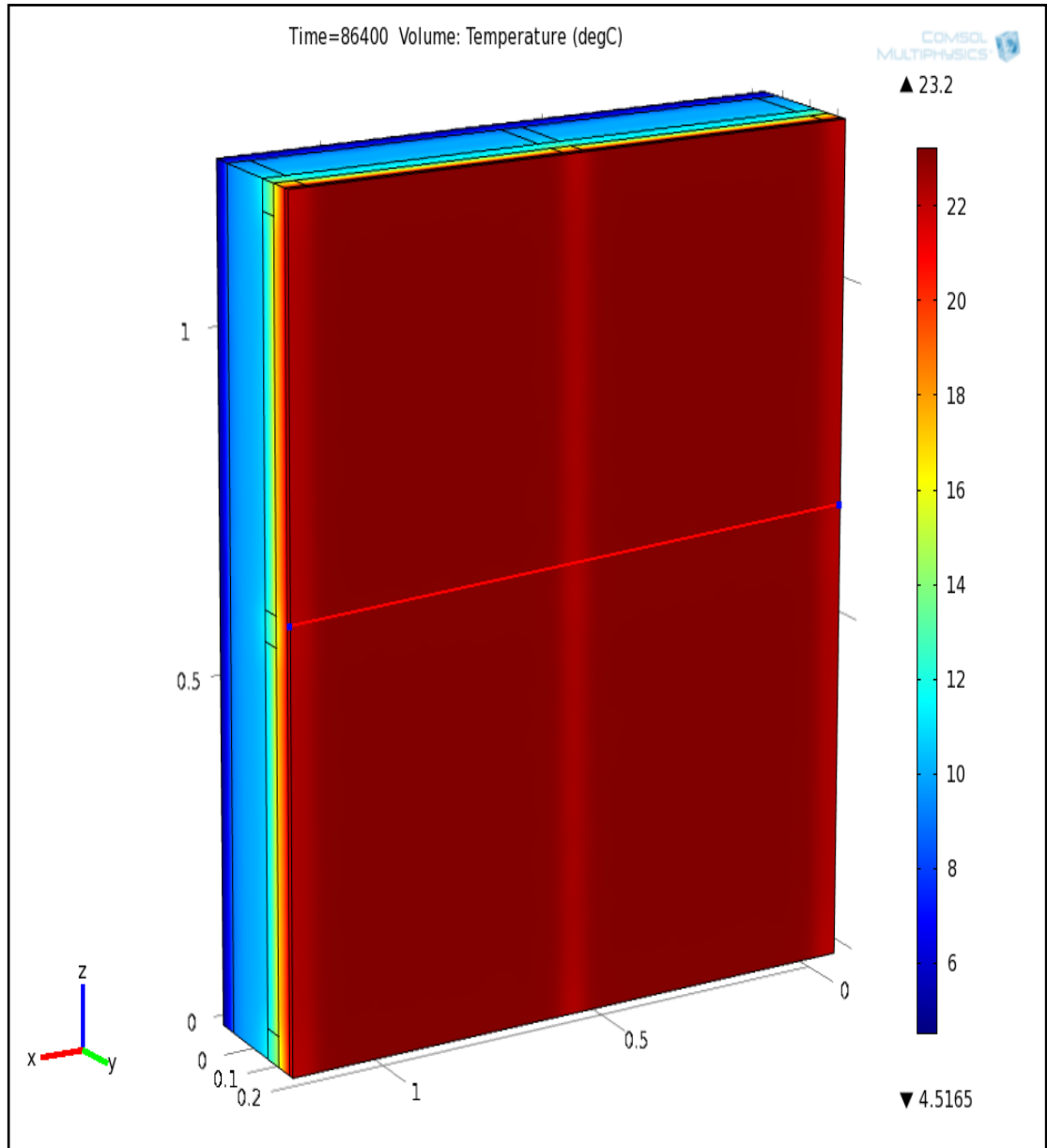
Talo Rintamäen seinärakenne ulkopuolelta lukien



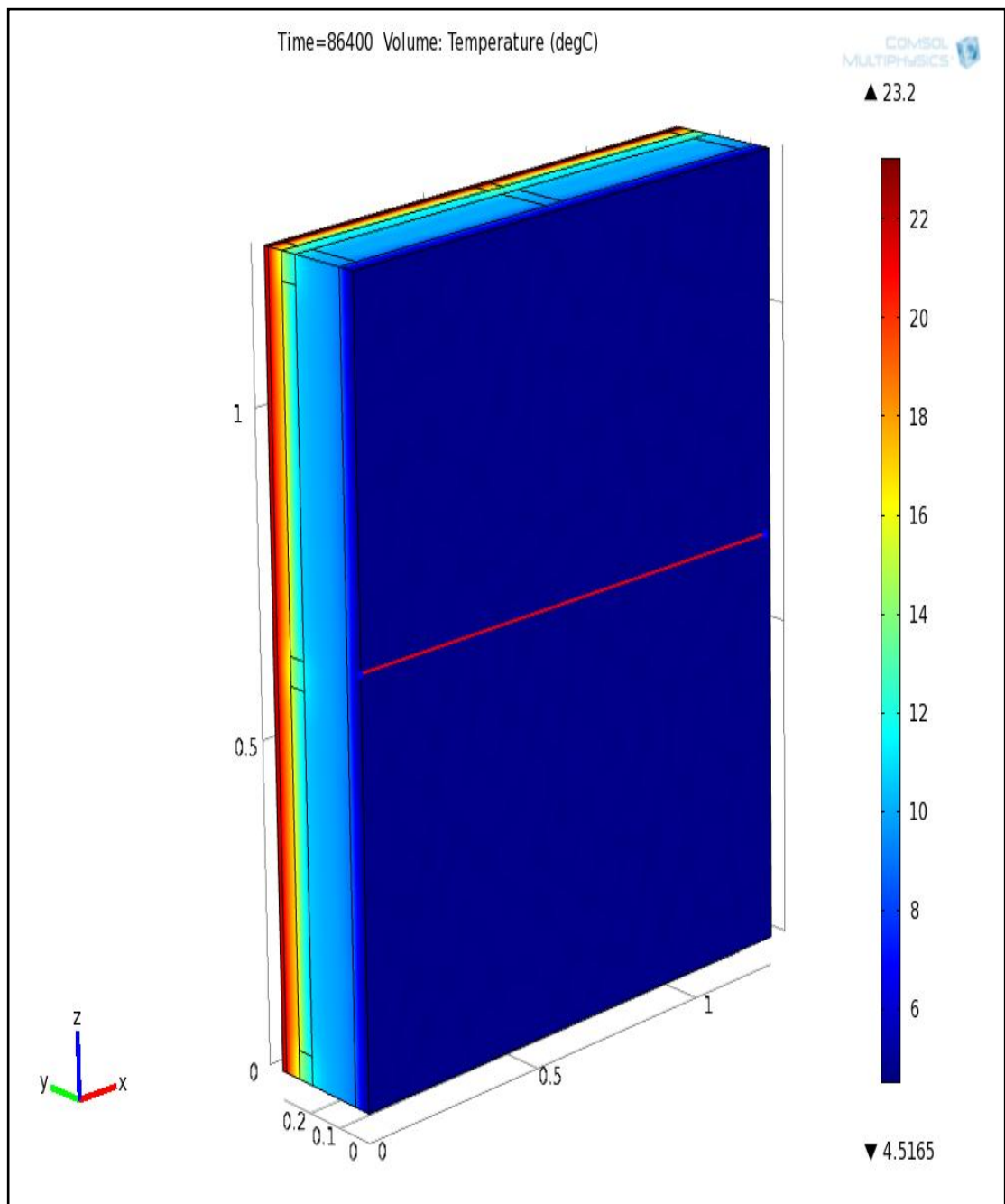
1. pystykoolaus 30*175
2. runkokarhulevy RKL A 45 mm
3. Tuulensuojabitumipaperi, saumat tolppien kohdalla n. 100 mm limittäin
4. Pystyrunko 145*48 k600, välissä mineraalivilla 150 mm
5. vino 45 asteinen koolaus 45*45 k600 + välissä mineraalivilla 50 mm
6. Höyrynsulku 0.2 muovikalvo, saumat n. 300 mm limittäin, teipattu
7. kipsilevy EK 13, saumat nauhoitettu, levy tasoitettu
8. Pohjamaali+ pintamaali

Rakenteen U- arvo 0.14 W/(K·m²)

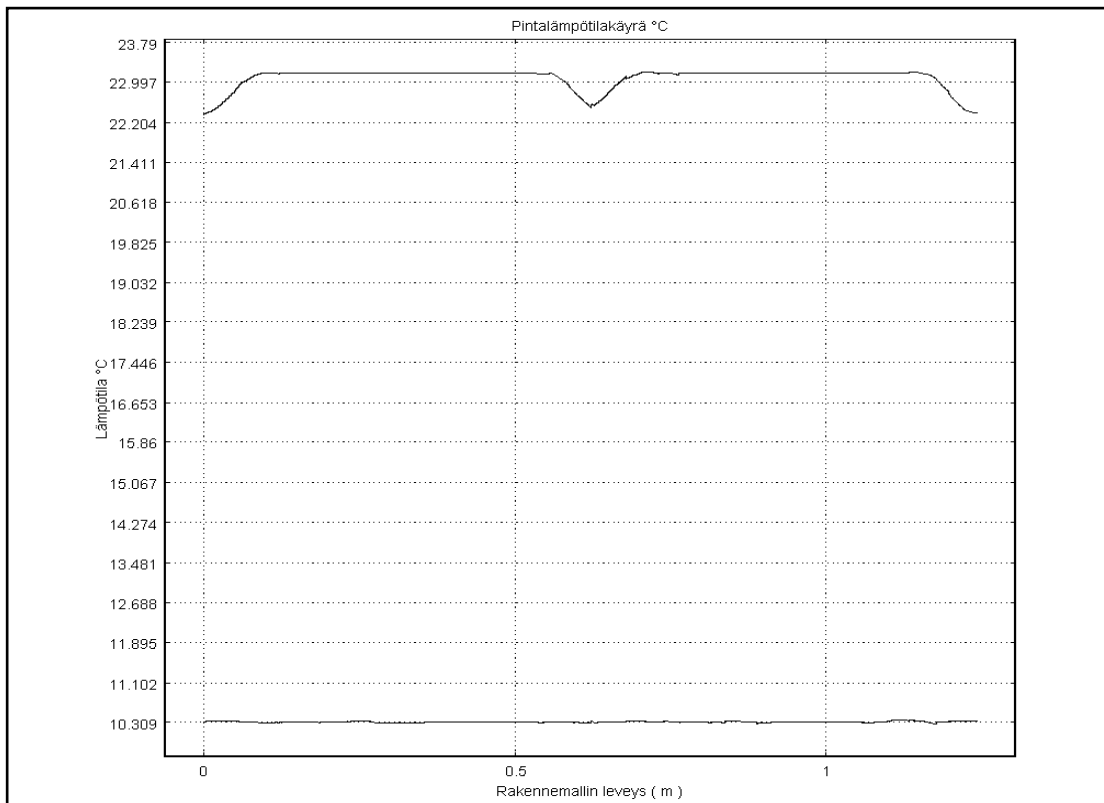
Talo Rintamäki 9.4.2010



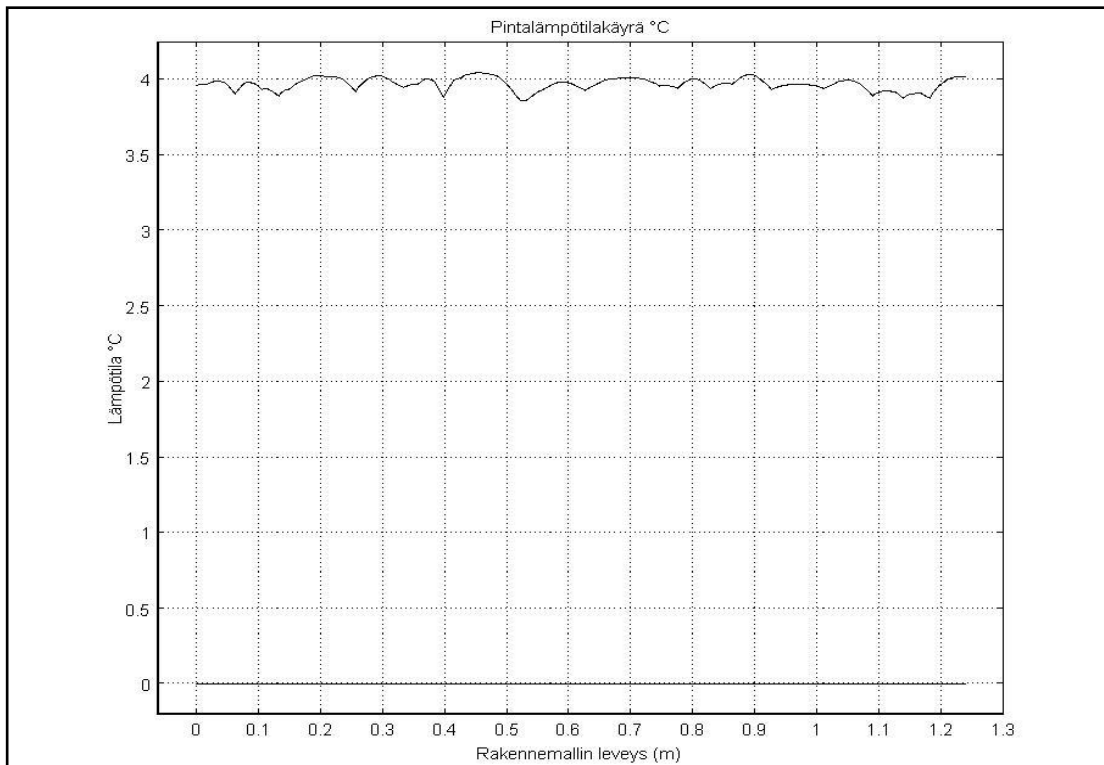
3D-kuva sisältäpäin



3D-kuva ulkoapäin

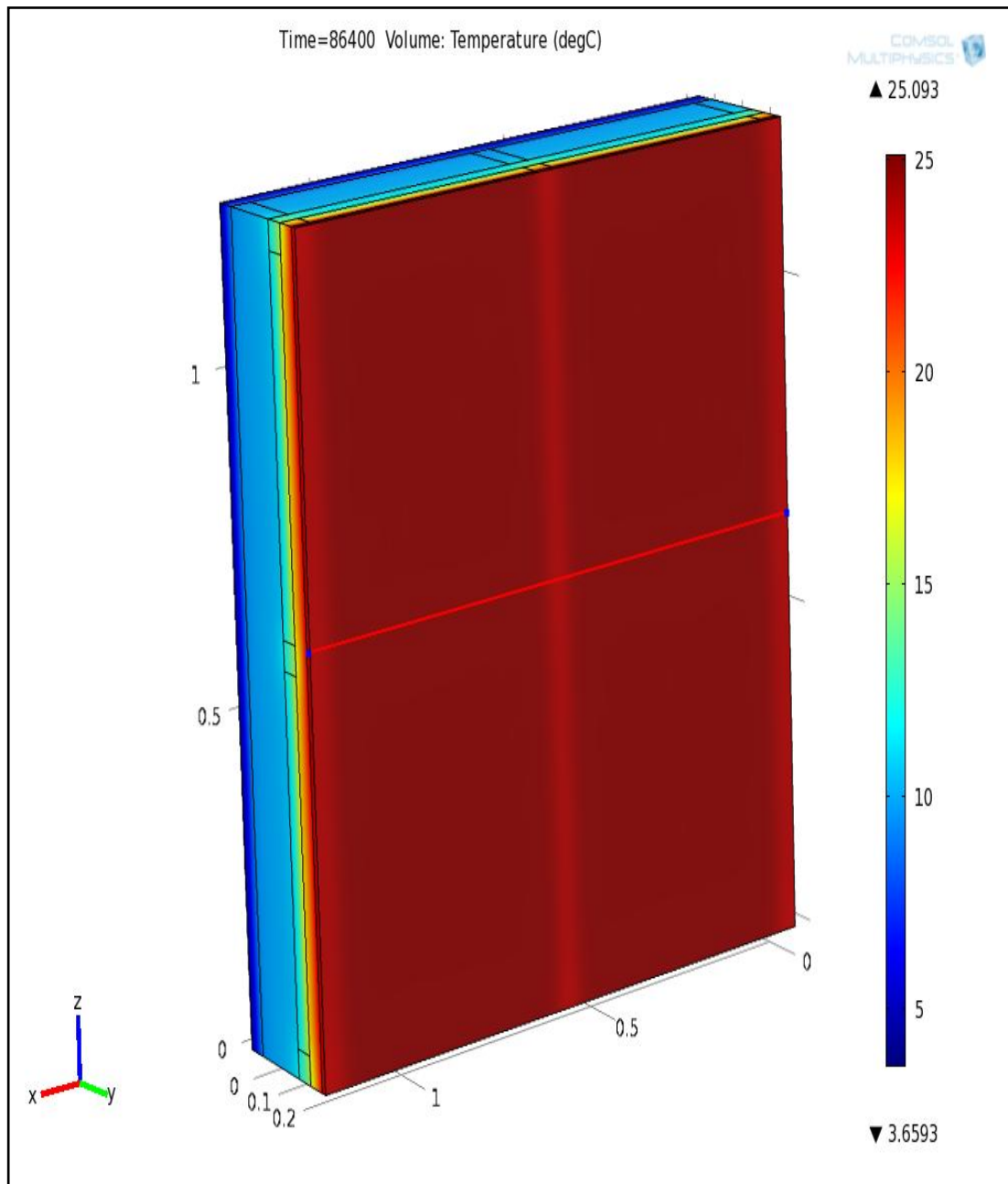


Pintalämpötiläkäyrä rakenteen sisäpinnasta

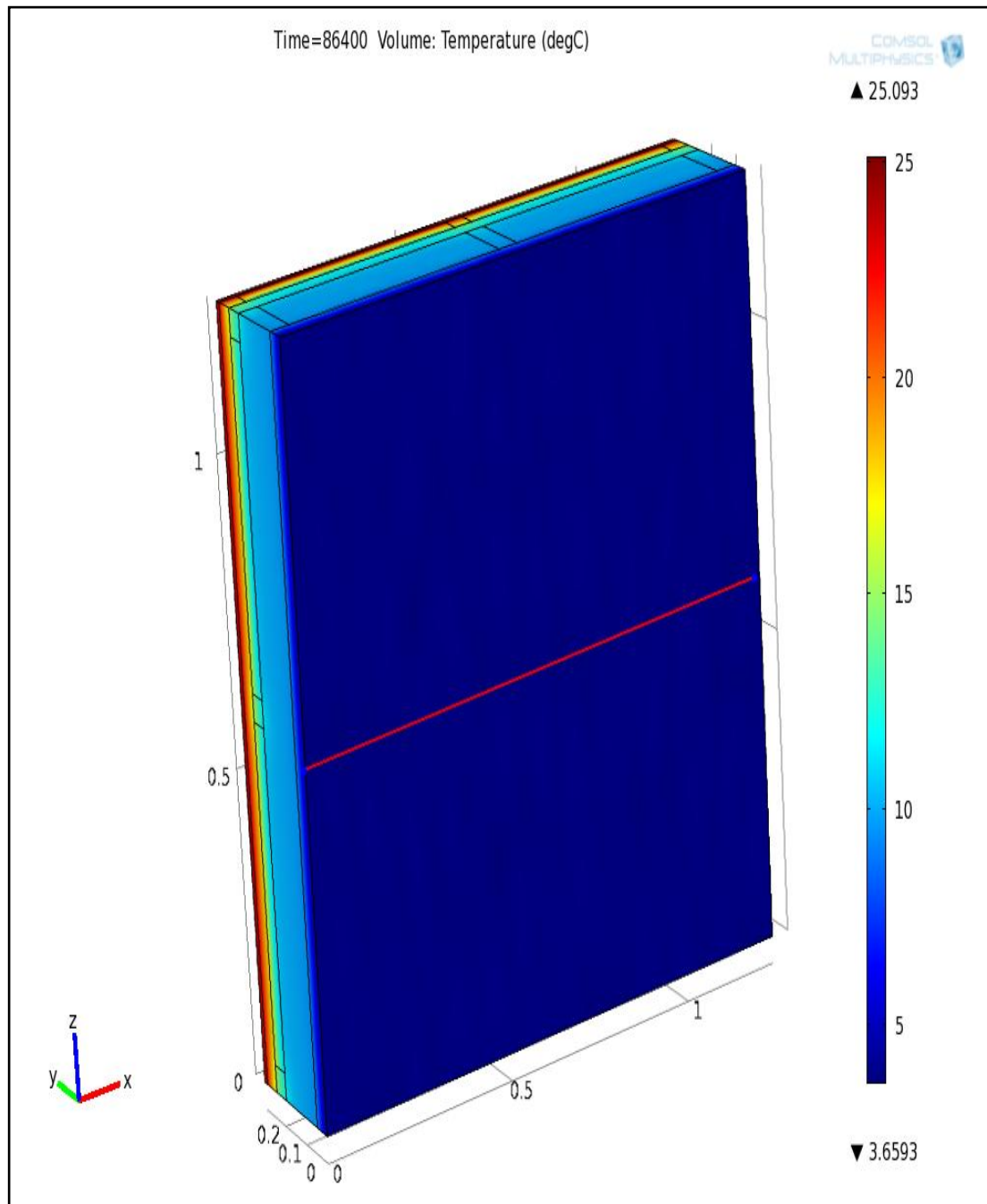


Pintalämpötiläkäyrä rakenteen ulkopinnasta

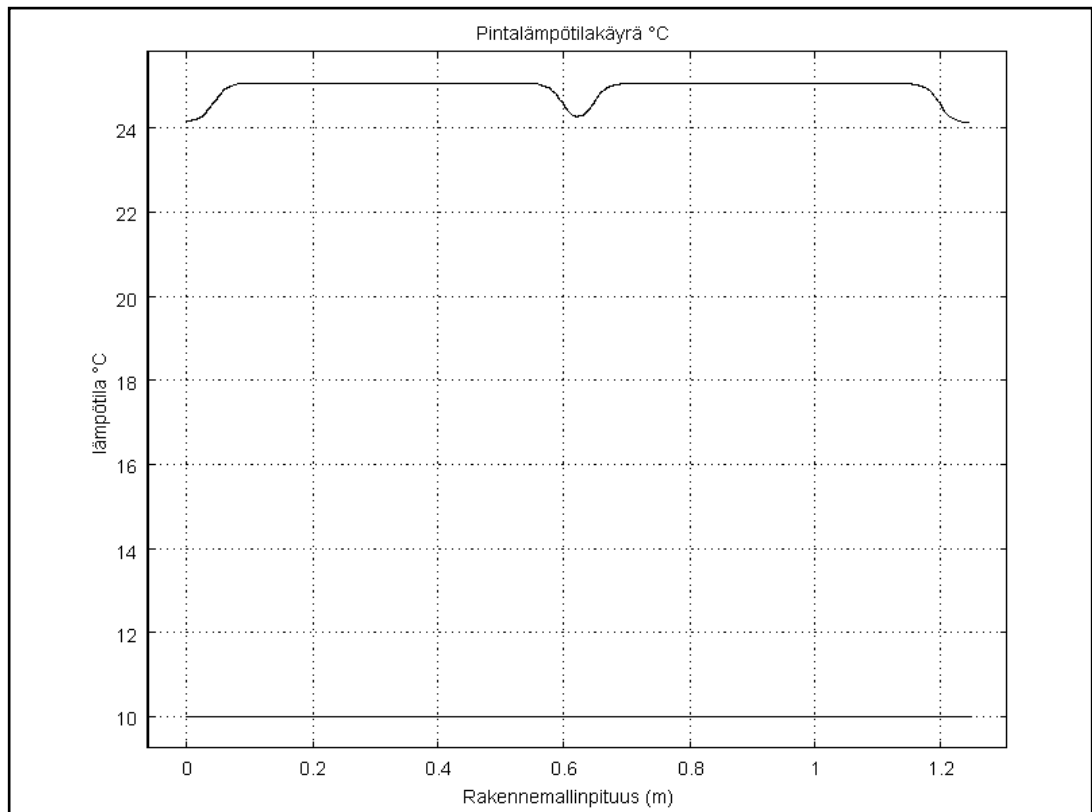
Talo Rintamäki 23.4.2010



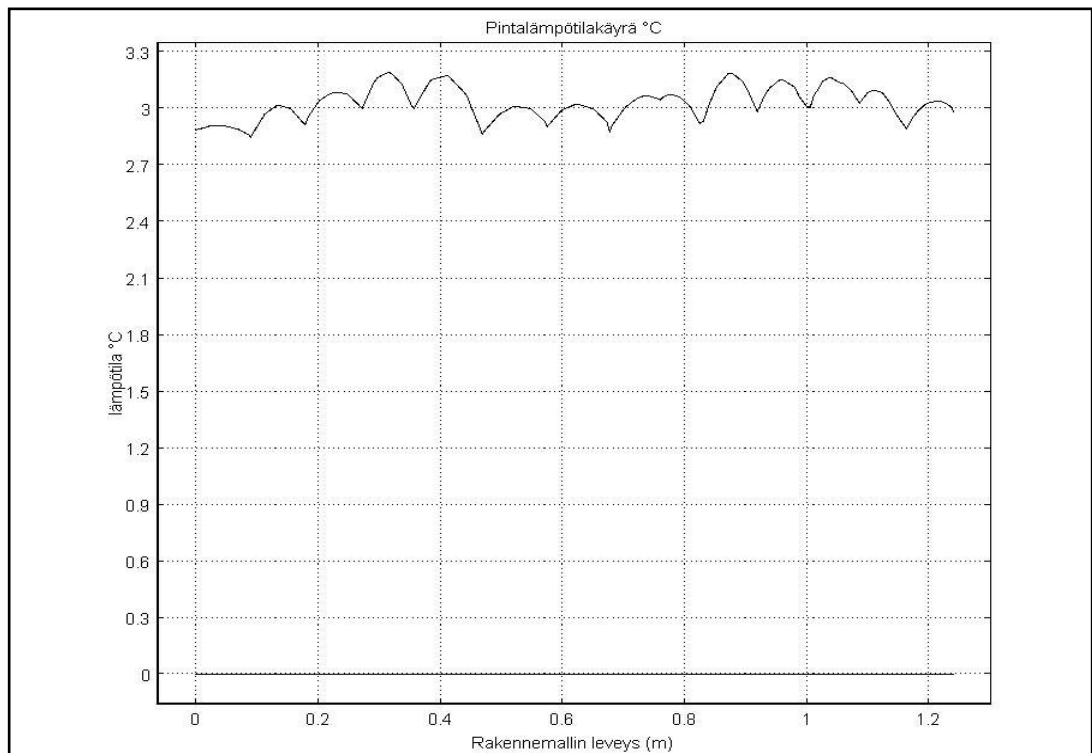
3D-kuva sisältäpäin



3D-kuva ulkoapäin

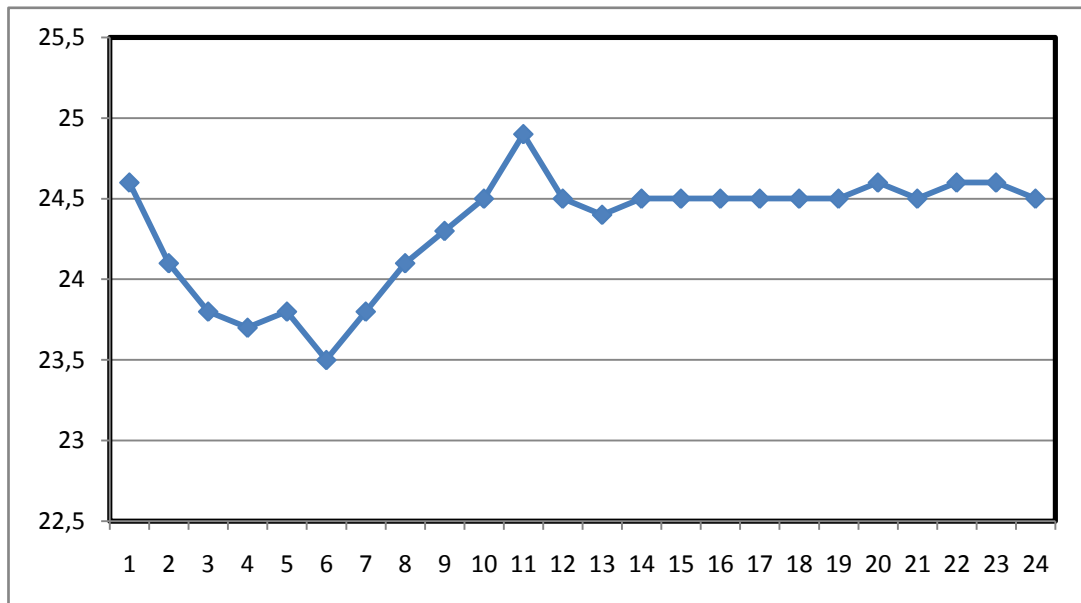


Pintalämpötiläkäyrä rakenteen sisäpinnasta



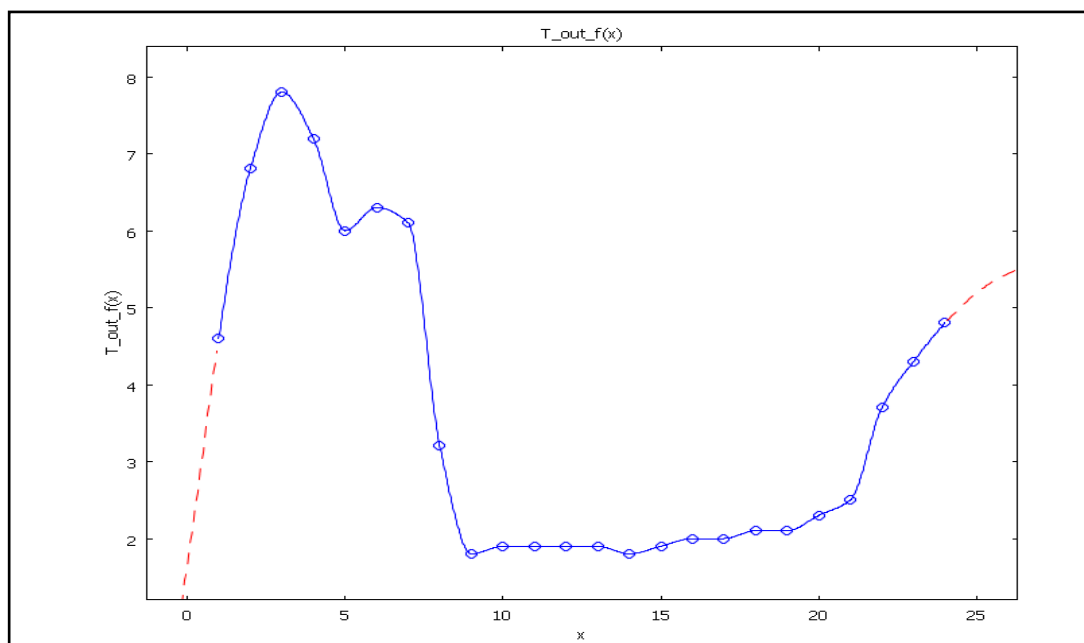
Pintalämpötiläkäyrä rakenteen ulkopinnasta

Talo Rintämäki 9.4.2010



Sisälämpötilat tunnin välein mitattuina vuorokauden ajalta

(x-akseli= aika h ja y-akseli= Lämpötila °C)



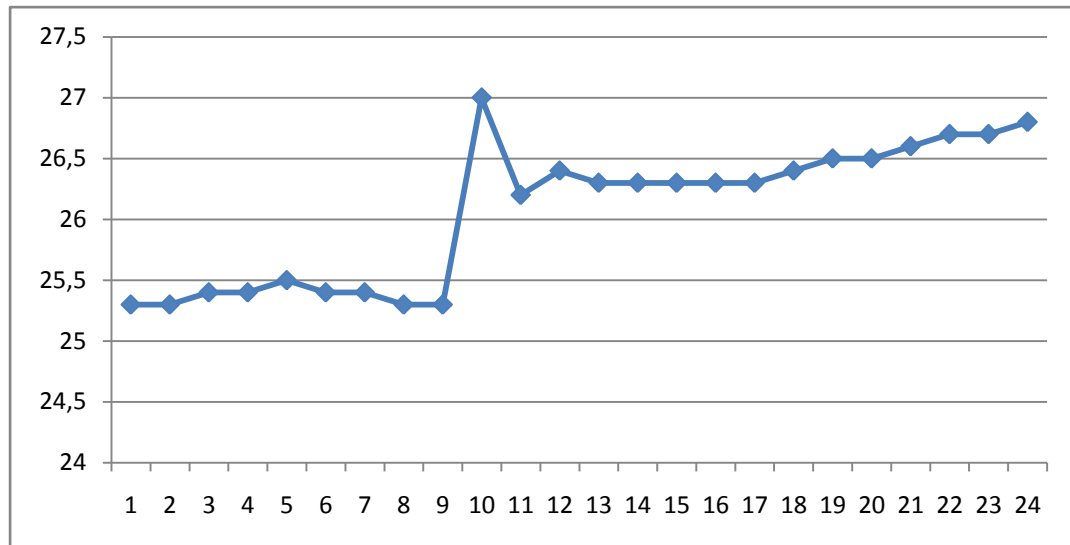
Ulkolämpötilat tunnin välein mitattuina vuorokauden ajalta

(x-akseli= aika h ja y-akseli= Lämpötila °C)

LÄMPÖTILAT VUOROKAUDEN AJALTA

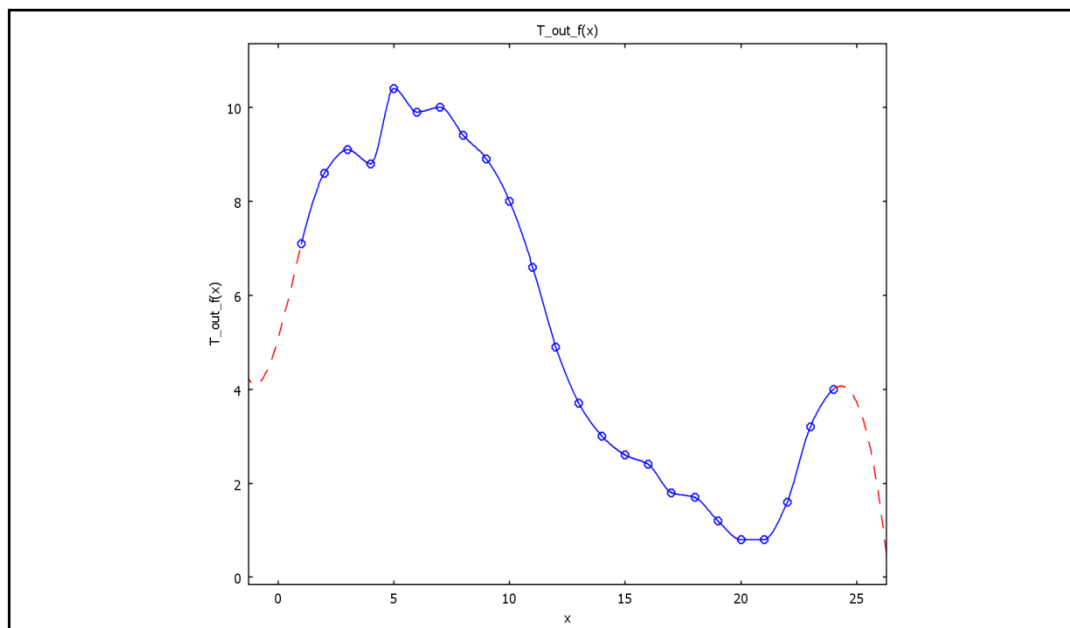
LIITE 6/2

Talo Rintamäki 23.4.2010



Sisälämpötilat tunnin välein mitattuina vuorokauden ajalta

(x-akseli= aika h ja y-akseli= Lämpötila °C)



Ulkolämpötilat tunnin välein mitattuina vuorokauden ajalta

(x-akseli= aika h ja y-akseli= Lämpötila °C)

