

TTKK:N LÄMMÖNLÄPÄISEVYYSLAITTEISTON TOIMINNAN TARKASTELU

Juha Vinha

Rakenteiden Mekaniikka, Vol. 30
Nro 1, 1997, s.. 109-131

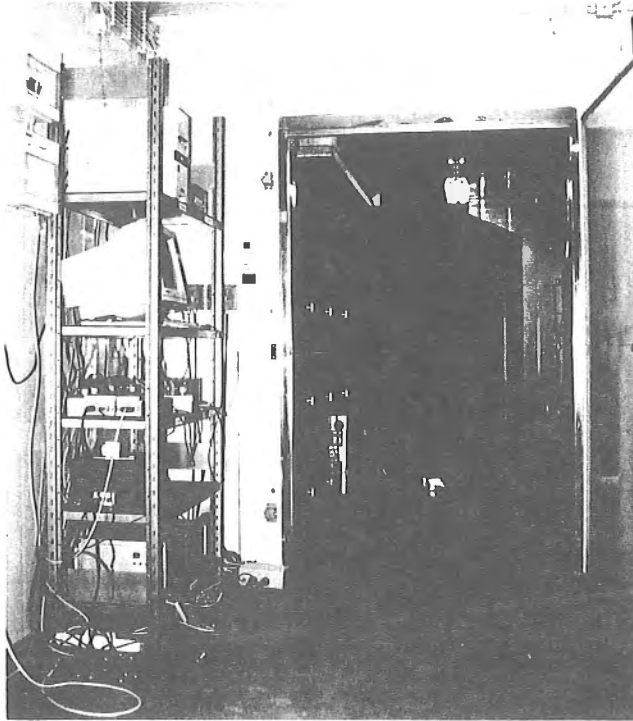
TIIVISTELMÄ

Artikkeli käsittelee TTKK:n talonrakennustekniikan laboratorioon rakennettua uutta lämmönläpäisevyyslaitteistoa, jolla voidaan mitata erilaisten rakenteiden lämmönläpäisyker-toimia (U-arvoja) sekä yksittäisten materiaalien lämmönjohtavuuksia (λ -arvoja). Laitteiston suunnittelu- ja kehitystyö kesti n. kaksi vuotta ja se valmistui lokakuussa 1996. Suunnittelu tehtiin kansainvälisten ISO, CEN ja DIN standardien mukaisesti siten, että laitteisto täyttää lämmönläpäisevyyskokeessa vaadittavat tarkkuudet. Laitteiston mittaus- ja säätöjärjestelmä toimii täysin automaattisesti tietokoneohjauksella. Mittaus- ja säätöjärjestelmä rakennettiin käyttäen uusinta tekniikkaa, jolloin säätö saatiin tehokkaaksi ja mittaustarkkuus paremmaksi. Laitteiston avulla kyetään mittaamaan tutkittavan rakenteen tai materiaalin lämpötekniset arvot muutaman vuorokauden kuluessa.

LÄMMÖNLÄPÄISEVYYSLAITTEISTON OSAT

TTKK:n lämmönläpäisevyyslaitteisto on tyypiltään ns. "calibrated hot box" laitteisto. Laitteisto koostuu lämpimästä ja kylmästä kammioista, joiden sisälämpötilaa voidaan säätää. TTKK:n laitteistossa lämmin kammi sijaitsee kylmän kammion sisällä. Lämpimänä kammiona toimii pyörillä varustettu kalorimetrikaappi, joka työnnetään kylmänä kam-miona käytettävään pakkashuoneeseen. Kalorimetrikaapin seinässä on $1200 \times 1200 \text{ mm}^2$

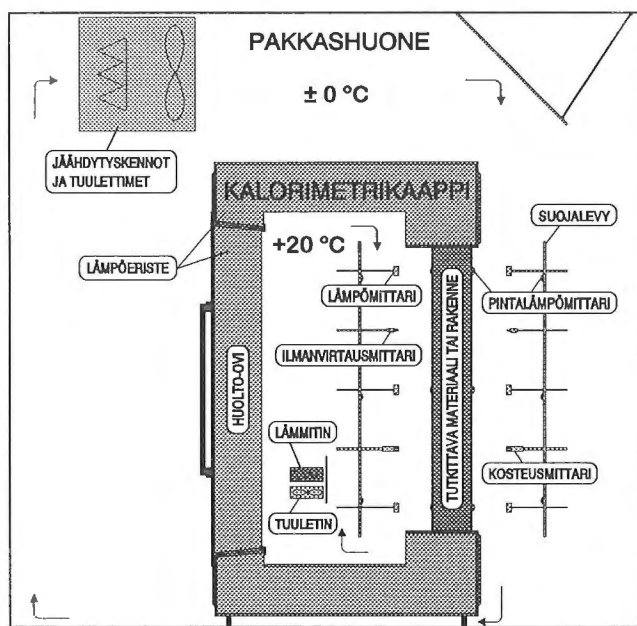
suuruinen tutkimusaukko, johon tutkittava koe-elementti asennetaan. Koe-elementin pinta-alan tulee olla $1190 \times 1190 \text{ mm}^2$, jotta aukon reunoille jää riittävä asennus- ja tiivistysvara (kuva 1).



Kuva 1. TTKK:n lämmönläpäisevyyslaitteisto. Kuvassa etualalla mittaus- ja säätölaitteet, takana pakkashuone ja kalorimetrikaappi suojalevyineen.

Toisella puolella kalorimetrikaappia on huolto-ovi, josta asetetaan erilaiset mittausanturit ja lämmityslaite kalorimetrikaapin sisälle. Kalorimetrikaapissa ei ole lämpöä johtavaa runkorakennetta, vaan ulkolevynä olevan 12 mm vanerin takana on pelkästään 200 mm paksu polyuretaanieristys. Tutkimusaukon seinässä on 300 mm paksu eristys, joka mahdollistaa saman levyisten koe-elementtien testauksen. Kaapin runkona ovat ulkopuoliset kulmateräsprofiilit, jotka on ulkolevyjen tavoin suojattu kosteudelta. Kalorimetrikaapin sisätilavuus on $1,7 \text{ m}^3$ ja vastaavasti pakkashuoneen tilavuus on n. 45 m^3 .

Tutkittavan koe-elementin sisä- ja ulkopinnan lähelle asetetaan suojalevyt, joiden tarkoituksena on suojata elementin pintoja paikallisilta ja hetkittäisiltä lämpötilavaihteluilta. Samalla ne pyrkivät estämään ja tasoittamaan säteilylämmön heijastumisvaikutusta tutkittavan rakenteen pintojen lähellä. Edellä kuvatuista syistä johtuen suojalevyt on valmistettu alumiinista (suuri lämmönjohtavuus) ja maalattu mattamustaksi (pieni heijastuskerroin/suuri emissiviteetti) (kuva 2).



Kuva 2. Lämmönläpäisevyyssokeen mittausjärjestelyt.

Kalorimetrikaapin ja pakkashuoneen lämpötiloja mitataan ja säädetään erilaisten mittaus- ja säätölaitteiden avulla. Lämpötiloja mitataan sekä sisä- että ulkopuolelta tutkittavan rakenteen pinnasta, ilmasta ja suojalevyn pinnasta. Mittauspisteitä on kussakin kohdassa 9 kpl eli yhteensä 54 kpl. Lisäksi mitataan kalorimetrikaappiin syötettyä lämmitystehoa, sisä- ja ulkopuolen ilmankosteutta ja ilmavirtauksen nopeutta. Mittaukseen on mahdollista ottaa mukaan myös esim. lämpövirtalevyjä, jolloin voidaan tarkastella epähomogeenisten rakenteiden paikallisia lämpövirtoja.

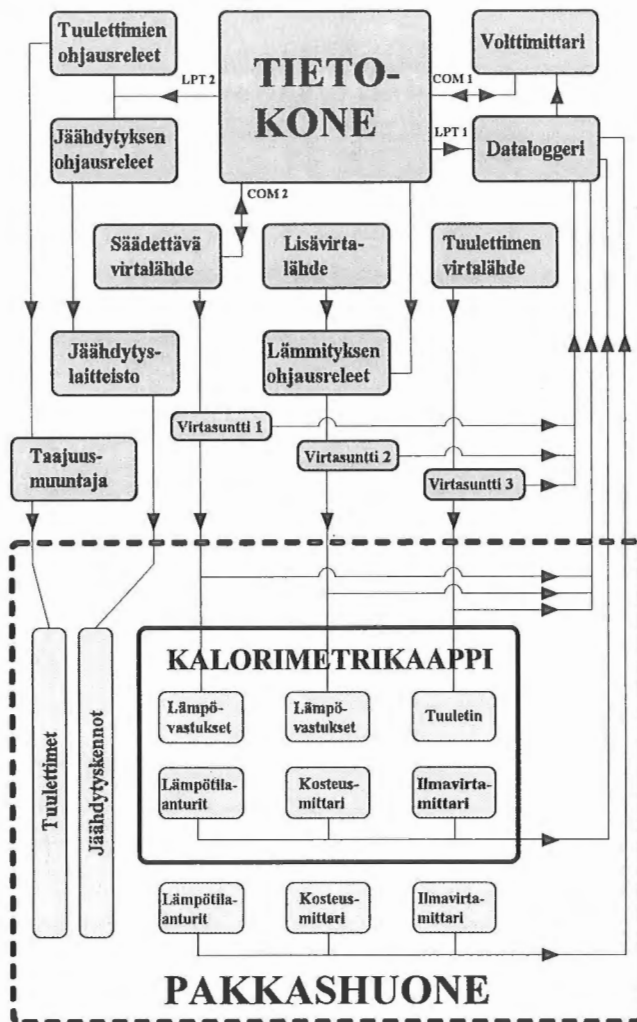
Kalorimetrikaapin lämpötilaa säädetään lämmitysvastusten ja tuulettimen avulla, jotka on kytketty virtalähteisiin. Ulkopuolella pakkashuoneen jäädytys tapahtuu jäädytyskompressorien ja tuulettimien avulla. Kaikki prosessissa mukana olevat laitteet on kytketty tietokoneeseen, joka suorittaa tarvittavat mittaus- ja säätötoimenpiteet automaattisesti.

LAITTEISTON JA OHJAUSOHJELMAN TOIMINTAPERIAATE

Lämmönläpäisevyyskokeessa selvitetään, millä lämmitysteholla kalorimetrikaapin sisällä pysyy haluttu lämpötilaero ulkopuoleen nähden. Standardien mukaisessa U-arvokokeessa sisälämpötilaksi säädetään tavallisesti +20 °C ja ulkolämpötilaksi 0 °C. Kun lämpötilojen ja sisäpuolella tarvittavan lämmitystehon arvot eivät enää muutu, ovat kalorimetrikaappi ja tutkittava koe-elementti saavuttaneet stationääritilan. Stationääritilassa lämpöä siirtyy vakiomäärä aikayksikössä kalorimetrikaapin sisäpuolelta ulos ts. kalorimetrikaapin ja koe-elementin läpi kulkeva lämpövirta (q) on vakio. Stationääritilassa mitattujen lämpötilojen ja kokonaislämmitystehon avulla saadaan laskettua tutkittavan rakenteen kaikki lämpötekniiset arvot. Muut laskennassa tarvittavat suureet ovat ennakoita tiedossa.

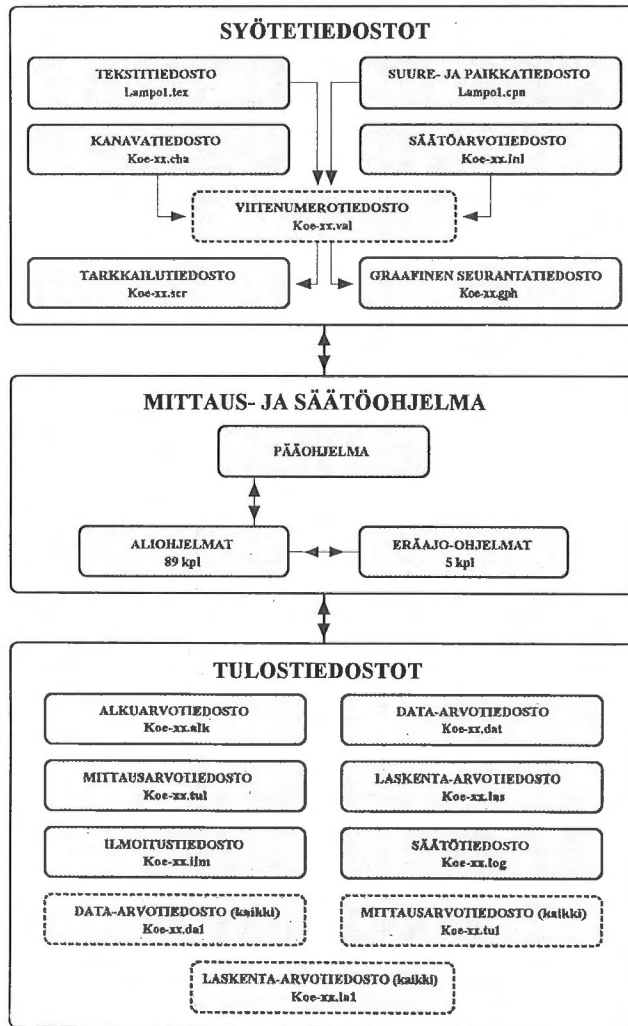
Kokeen aikana tietokone käy läpi saman mittaus- ja säätöprosessin 15 minuutin välein. Mittaus- ja säätöprosessin aikana tietokone mittaa arvot n. 70 kanavalta minuutin välein. Mittaus tapahtuu dataloggerin ja volttimittarin avulla. Tämän jälkeen tietokone laskee mitatuista arvoista eri suureiden (lämpötila, lämmitysteho, ilman suhteellinen kosteus ja ilmavirran nopeus) keskiarvot sekä niiden avulla saatavat tutkittavan rakenteen lämpötekniiset arvot. 15 minuutin välein kone käy muuttamassa pakkashuoneen jäädytyksen säätöä ja kalorimetrikaapin lämmityksen säätöä niin, että kalorimetrikaapin sisä- ja ulkopuolelle tulee mahdollisimman tarkasti halutut lämpötilat. Yhden lämmönläpäisevyyskokeen aikana laitteisto mittaa n. 150 000 mittausarvoa, laskee n. 200 000 laskenta-arvoa ja säätää prosessia n. 3500 kertaa.

Stationääritilanteessa lämpötiloista lasketut keskiarvot vaihtelevat pakkahuoneessa $\pm 0,1$ °C ja kalorimetrikaapin sisällä $\pm 0,01$ °C. Lämmitystehon keskiarvot vaihtelevat $\pm 0,1$ W. On muistettava, että esim. lämpötila-anturien mittaustarkkuus on n. $\pm 0,05$ °C, joten laitteiston säätötarkkuus on kokeessa erittäin hyvä. Mittaus- ja säätölaitteiston toimintakaavio on esitetty kuvassa 3.



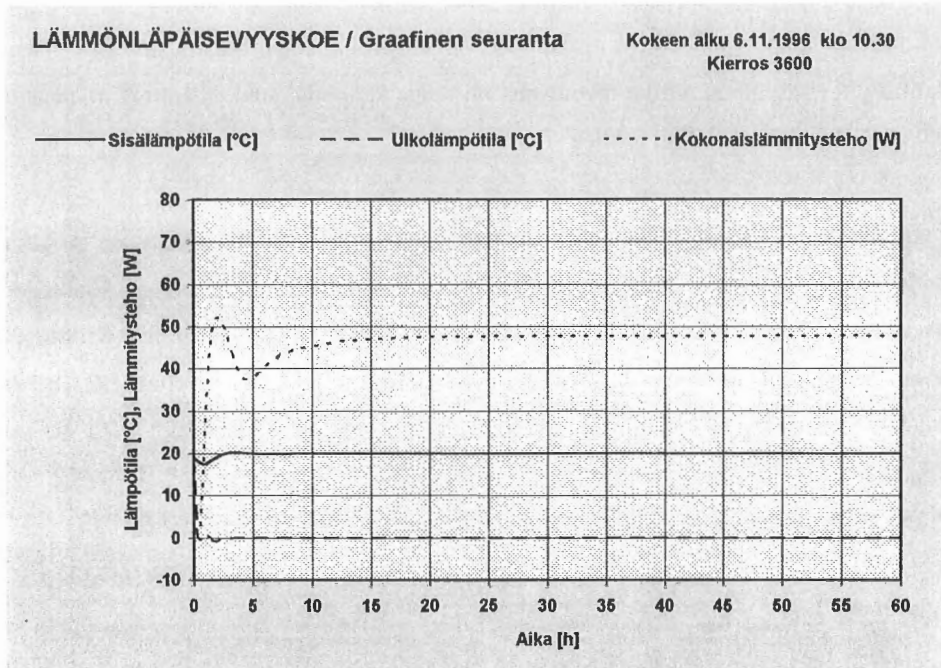
Kuva 3. Lämmönläpäisevyyslaitteiston toimintakaavio.

Koetta ohjataan ohjausohjelman LAMPO1.BAS avulla, jonka toimintaperiaate on esitetty kuvassa 4. Ennen kokeen alkua ohjausohjelman syötetiedostoihin annetaan tiedot mm. kokeessa käytettävistä mittausjärjestelyistä, kanavista, mitattavista suureista, koeolosuhteista, tutkittavan koe-elementin ominaisuuksista sekä kokeen aikana seurattavista mittauservoista. Kokeen kuluessa ohjelma tallentaa mitatut ja lasketut arvot sekä säätötapahtumat tulostustiedostoihin. Kokeen edistymistä voidaan tarkkailla kokeen aikana numeeristen ja graafisten seurantasivujen avulla tietokoneen näytöltä.



Kuva 4. Ohjausohjelman LAMPO1.BAS toimintakaavio.

Kuvassa 5 on esitetty esimerkki lämmönläpäisevyysskoeken graafisesta seurantasivusta. Kuvasta havaitaan, että sisä- ja ulkolämpötilat ovat asettuneet oikealle kohdalle jo runsaan 5 tunnin kuluttua kokeen alusta. Lämmitystehon tasaantuminen kestää jonkin verran pidempään, mutta stationääritila on kuitenkin saavutettu tässä kokeessa alle 20 tunnin kuluessa.



Kuva 5. Esimerkki lämmönläpäisevyyslaitteiston graafisesta seurantasivusta kokeen aikana.

LAITTEISTON KALIBROINTI

Lämmönläpäisevyyslaitteiston tarkkuus riippuu oleellisesti erityisesti kahdesta seikasta; lämpötila-antureiden mittaustarkkuudesta ja kalorimetrikaapin kuluttaman lämmitystehon mittaustarkkuudesta. Siksi näiden kalibrointi on suoritettava hyvin huolellisesti.

Lämpötila-antureiden kalibrointi

Laitteiston kehitysvaiheessa lämpötila-antureina käytettiin perinteisiä termolankoja, jotka mittaavat lämpötilan kahden eri aineesta valmistetun langan liitoskohdassa (esim. kupari-konstantaanilanka). Lankojen toiset päät kytketään mittauslaitteistoon, joka mittaa lankojen päiden välillä olevan jännite-eron. Jännite-ero muutetaan lämpötilaksi ns. muuntokaavan avulla. Testauksissa todettiin kuitenkin, että kapealla lämpötila-alueella termolangan ilmoittama lämpötila poikkesi epälineaarisesti kalibrointilämpömittarin arvoista. Tämä hankaloitti kalibrointia, koska tavoitteena oli saada lämpötila-antureiden tarkkuudeksi $\pm 0,05$ °C vertailulämpötilaan nähden.

Termolankojen tarkkuusongelmasta johtuen laitteiston lämpötila-antureiksi valittiin uudentyyppiset puolijohdeanturit, joiden lämpötilamuutos on lineaarinen lämmönläpäisevyyskokeissa käytettävällä lämpötila-alueella. Toinen puolijohdeanturin etu on sen antama ulostulojännitteen arvo, joka on tuhatkertainen termolankaan verrattuna. Tällöin jännitteen mittauksessa tapahtuvan virheen osuus pienenee oleellisesti.

Puolijohdeanturin antama ulostulojännite muutetaan lämpötilaksi seuraavasti:

$$t_{pj} = k_1 U_{pj} + k_0 \quad (1)$$

Kertoimet k_1 ja k_0 ovat muuntokertoimia, jotka määritetään anturikohtaisesti kalibrointiko-
keessa. Kalibroimattomilla antureilla kertoimien arvot ovat $k_1 = 100$ ja $k_0 = 273,15$ (mitatta-
essa Celsius-asteita). Kalibroinnin jälkeen kertoimien arvot voivat kuitenkin vaihdella
huomattavasti ($k_1 = 98 \dots 102$ ja $k_0 = 266 \dots 280$). Kertoimien vaihtelu merkitsee sitä, että
kalibroimattomina eri anturit voivat näyttää jopa 5 °C eri arvoja. Yksinkertaisen muunto-
kaavansa ansiosta ne voidaan kuitenkin kalibroida oikeisiin arvoihin hyvin tarkasti. Termol-
lankojen muuntokertoimien muuttaminen on sen sijaan ongelmallista, koska muuntokaavat
ovat useamman asteen polynomifunktioita.

Kalorimetrikaapin kalibrointi

Kalorimetrikaapin kuluttama kokonaislämpövirta (q_{kok}) koostuu tutkittavan rakenteen läpi menevästä lämpövirrasta (q_{rak}) ja kaapin muun vaipan läpi menevästä lämpövirrasta (q_{kal}). Koska kalorimetrikaapin ja tutkittavan rakenteen pinta-alat pysyvät samoina kaikissa kokeissa, voidaan lämpövirtojen sijasta tarkastella suoraan kalorimetrikaapin ja tutkittavan rakenteen kuluttamia osuuksia tarvittavasta kokonaislämmitystehosta.

$$q_{kok} = q_{rak} + q_{kal} \quad \rightarrow \quad q = \frac{P}{A} \quad \rightarrow \quad P_{kok} = P_{rak} + P_{kal} \quad (2)$$

Lämmönläpäisevyyskokeessa mitataan kokonaislämmitystehoa (P_{kok}), mutta tutkittavan rakenteen lämpöteknisten arvojen laskemiseksi on tiedettävä mikä on P_{rak} osuus kokonaisedusta. Tätä varten on puolestaan tiedettävä kalorimetrikaapin vaipan läpi siirtyvä lämpöteho (P_{kal}), joka saadaan selville kalibrointikokeiden avulla. Kalibrointikokeissa kalorimetrikaapin lämmönkulutusta mitataan asettamalla tutkimusaukkoon homogeeninen ja yhdestä materiaalista koostuva kalibrointielementti, jolla on tunnettu lämmönjohtavuus (λ_{kbr}). Tällöin tiedetään, mikä osa kokonaislämmitystehosta siirtyy kalibrointielementin läpi (P_{kbr}) ja mikä osa kalorimetrikaapin vaipan alueelta (P_{kal}).

$$P_{kal} = P_{kok} - P_{kbr} \quad (3)$$

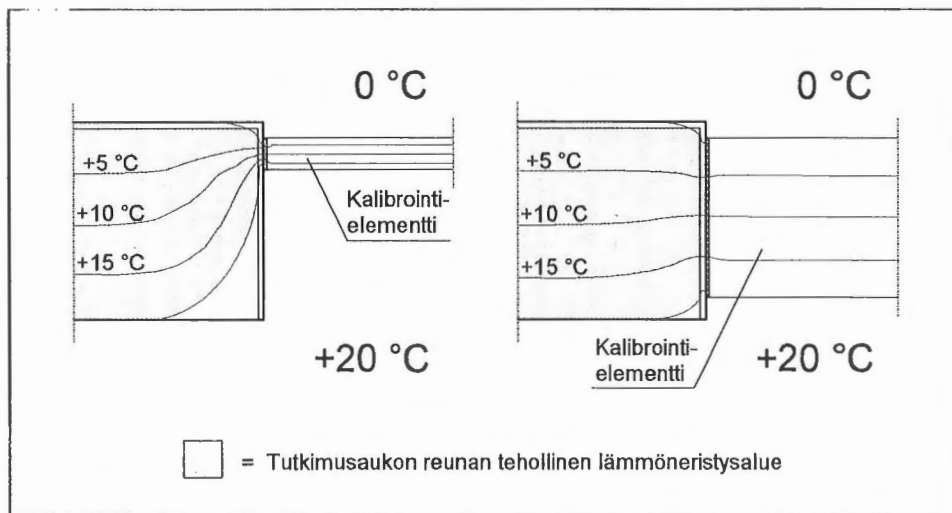
Kalibrointielementin läpi siirtyvä osuus lämmitystehosta saadaan kaavasta:

$$P_{kbr} = \frac{A_{kbr} (t_{sp} - t_{up}) \lambda_{kbr}}{d_{kbr}} \quad (4)$$

Kaavassa A_{kbr} on kalibrointielementin pinta-ala, d_{kbr} on elementin leveys, t_{sp} on elementin sisäpinnan lämpötila ja t_{up} on vastaavasti elementin ulkopinnan lämpötila.

Kalibroinnin ongelmana on se, että tietyn levyisellä kalibrointielementillä saatu kalorimetrikaapin vaipan kuluttama lämmitystehon osuus (P_{kal}) muuttuu, jos elementin paksuus

vaihtuu. Tämä johtuu siitä, että eri levyisillä elementillä siirtyy tutkimusaukon reuna-alueiden kautta eri määrä lämpöenergiaa ts. tutkimusaukon reuna-alueiden tehollinen lämmöneristyspaksuus vaihtelee elementin leveyden vaihdella (kuva 6).



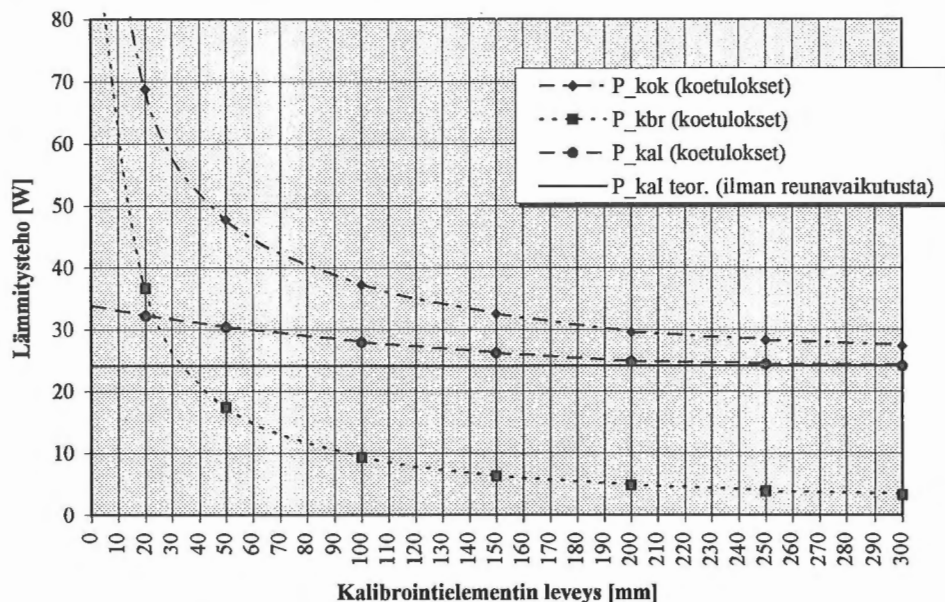
Kuva 6. Kalorimetrikaapin reunojen tehollinen lämmöneristyspaksuus vaihtelee tutkittavan elementin leveyden vaihdella.

Edellä kuvatun ilmiön johdosta kalorimetrikaappi on kalibroitava usealla eri levyisellä kalibrointielementillä, jotta saadaan selville P_{kal} :n arvot koe-elementin leveyden funktiona. Vaihtoehtona olisi reunavaikutuksen huomioon ottaminen laskennallisella tarkastelulla, mutta tämä on varsin monimutkainen ja epätarkka menetelmä kolmidimensioisen lämmönsiirtotapahtuman johdosta.

Kuvasta 6 voidaan todeta, että tutkimusaukon reunassa oleva vaneri toimii kalibrointikojeissa "kylmäsihtana", koska sen lämmönjohtavuus on ympärillä oleviin eristeisiin verrattuna suurempi. Koetilanteessa tutkimusaukossa saattaa sen sijaan olla rakenne, jonka lämmönjohtavuus on suurempi kuin vanerilevyllä ja lämmön kulku painottuu reunan lähellä eri tavalla. Tästä johtuen reunavaikutus aiheuttaa joissakin tapauksissa mittaustuloksiin hiukan virhettä.

TTKK:n lämmönläpäisevyyslaitteisto on kalibroitu kaikkiaan seitsemällä kalibrointielementillä, joiden leveydet ovat 20 mm, 50 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm, 250 mm ja 300 mm. Kalibrointielementit tehtiin tiheydeltään S25 luokkaan kuuluvasta EPS-levystä, jonka lämmönjohtavuus testattiin VTT:llä. Elementtien pinnat päällystettiin lisäksi ohuella muovikalvolla, jotta niissä ei tapahtuisi kosteusvaihteluiden aiheuttamia lämmönjohtavuusmuutoksia. Muovikalvon väriksi valittiin mattamusta, jotta elementtien pintojen emissiviteetti olisi tiedossa ja toisaalta, jotta se olisi melko lähellä tutkittavien rakenteiden emissiviteettejä.

Kalibrointia ei voida tehdä kovin ohuilla elementeillä, koska kalibrointielementin leveyden lähestyessä nollaa lähestyy sen kautta poistuva lämmitysteho P_{kbr} ja myös kokonaisteho P_{kok} ääretöntä. Tällöin P_{kal} :n arvoa on mahdotonta mitata luotettavasti. Lisäksi kalibrointielementin asennus- ja paksuusvirheet vaikuttavat oleellisesti lopputulokseen. Kuvassa 7 on esitetty TTKK:n lämmönläpäisevyyslaitteiston kalibrointikokeissa mitatut P_{kal} , P_{kbr} ja P_{kok} arvot kalibrointielementtien leveyden funktiona.



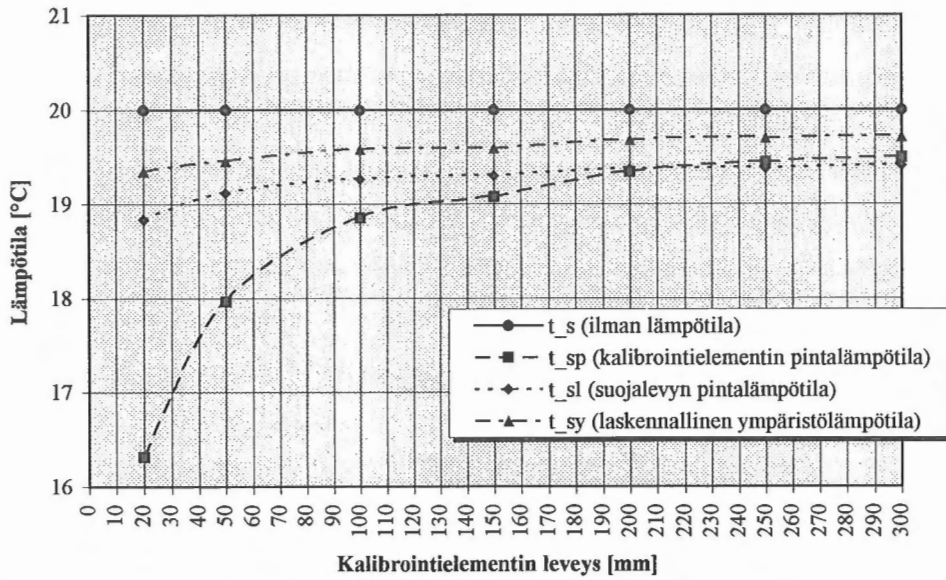
Kuva 7. Kalorimetrikaapin ja kalibrointielementin kautta kuluvat lämmitystehot (P_{kal} ja P_{kbr}) sekä niiden summa (P_{kok}) kalibrointielementin leveyden funktiona.

Lämmönläpäisevyyskokeen mittaustarkkuus riippuu merkittävästi kalibroinnin avulla saadusta P_{kal} :n arvosta. Esim. 1,0 W virhe P_{kal} :n arvossa vaikuttaa mitattuun U-arvoon n. $\pm 0,05 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$, mikä merkitsee tutkittavasta rakenteesta riippuen 3.....35 % virhettä. Virhe on suurimmillaan paksuilla rakenteilla, jotka kuluttavat hyvin vähän lämmitystehoa (P_{rak} :n osuus pieni) ja pienin vastaavasti ohuilla ja paljon lämpöä kuluttavilla rakenteilla. Näin ollen myös kalorimetrikaappi on tehtävä hyvin eristetyksi, jotta tutkittavan rakenteen kautta poistuva osuus kokonaislämmitystehosta olisi riittävän suuri.

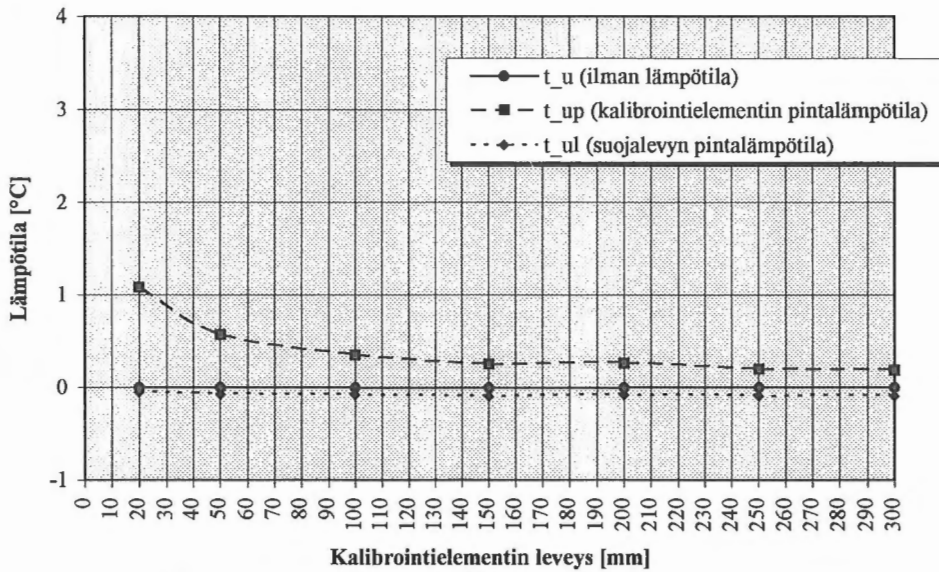
Toisaalta kuvasta 7 nähdään, että tehonmittauksen epätarkkuus P_{kal} :n arvon osalta kasvaa vasta ohuilla elementeillä. Verrattaessa 20 mm ja 300 mm kalibrointielementtejä toisiinsa on esim. elementin paksuudesta aiheutuvan virheen merkitys näillä elementeillä aivan erilainen. Edellä mainittu 1,0 W virhe P_{kal} :n arvossa aiheutuu 20 mm elementissä pelkästään n. 0,05 mm paksuusvirheestä. Sen sijaan 300 mm elementissä virhe syntyy vasta n. 70 mm paksuuserosta!

Lämmitystehon mittauksessa voi puolestaan virtajohtojen tehohäviöistä aiheutuva virhe olla n. 3 %, jolloin virhe vaihtelee tarvittavasta lämmitystehosta riippuen 0.....2,0 W välillä. Tämä virhe on riippumaton tutkittavan rakenteen paksuudesta, joten lämmitystehon mittaus tulee ehdottomasti tapahtua vasta kalorimetrikaapin sisältä. Edellä olevat esimerkit antavat kuvan siitä, miten tarkkuutta vaativia lämmönläpäisevyyskokeen mittaukset ja kalibroinnit ovat.

Kalibrointikokeiden yhteydessä voitiin vertailla sisä- ja ulkopuolen lämpötilajakaumaa eri levyisten elementtien pinnan lähellä. Kuvassa 8 on esitetty kalibrointielementin sisäpuolen pinta-lämpötilan, ilman lämpötilan ja suojalevyn pintalämpötilan vaihtelu elementin leveyden funktiona. Lisäksi kuvassa on esitetty sisäilman ns. ympäristölämpötila, jota käsitellään myöhemmin lämpötekniisten arvojen laskennan yhteydessä. Kuvassa 9 on vastaavat arvot elementin ulkopuolelta. Kalibrointikokeissa sisä- ja ulkopuolen ilmavirran nopeudet pidettiin vakiona, joten niillä ei ole vaikutusta mitattuihin lämpötila-arvoihin.



Kuva 8. Kalibrointikokeissa sisäpuolelta mitattu ilman lämpötilä (t_s), kalibrointielementin pintalämpötilä (t_{sp}), suojalevyn pintalämpötilä (t_{sl}) ja laskennallinen ympäristölämpötilä (t_{sy}) kalibrointielementin leveyden funktiona.



Kuva 9. Kalibrointikokeissa ulkopuolelta mitattu ilman lämpötilä (t_u), kalibrointielementin pintalämpötilä (t_{up}) ja suojalevyn pintalämpötilä (t_{ul}) kalibrointielementin leveyden funktiona. Ulkopuolella laskennallinen ympäristölämpötilä (t_{uy}) ei poikkea ilman lämpötilästä.

Kuvista 8 ja 9 havaitaan, että ohuemmillä ja huonomman U-arvon omaavilla kalibrointielementeillä pintalämpötilat ovat merkittävästi alhaisemmat sisällä ja vastaavasti korkeammat ulkona. Sisäpuolella lämpötilan lasku on kuitenkin vielä voimakkaampaa. Tämä johtuu siitä, että lämmönläpäisevyyskokeessa säädetään ilmavirtauksen nopeus sisäpinnan lähellä huomattavasti pienemmäksi (n. 0,1 m/s) kuin ulkopinnassa (yli 2,0 m/s). Arvot pyrkivät vastaamaan käytännössä esiintyviä keskimääräisiä ilmavirran nopeuksia rakenteen sisä- ja ulkopinnan lähellä. Ilmavirran nopeuden pienentyessä ilma kerrostuu elementin pinnan lähellä enemmän, jolloin pinnan ja ilman välinen lämpötilaero kasvaa.

Kalibroinnin tarkkuus ja mittaustuloksiin vaikuttavat virheet

Lämmönläpäisevyyskokeen tuloksiin vaikuttaa lukuisia määriä virheitä, jotka on saatava riittävän pieniksi luotettavan koetuloksen saamiseksi. Virheitä aiheuttavat mm.

- lämpötila-antureiden mittausrvirheet
- tutkimusaukon reunavaikutus (kts. kuva 6)
- kalorimetrikaapin tehonkulutusarvon (P_{kal}) mittausrvirheet (kts. kuva 7)
- tehonmittauksessa tapahtuvat virheet (virtalähteiden, ja -johtojen tehohäviöt)
- volttimittarin mittausrvirheet
- kalibrointielementtien lämmönjohtavuuden mittausrvirheet
- kalibrointi- ja koe-elementtien koko- ja muotoerot
- elementtien pintojen karkeuserot ja virheelliset emissiviteetti-arvot
- elementtien asennusrvirheet ja reunojen erilainen tiivistäminen (saumaeristeen ja ilmastointiteipin käyttö)

Edellä olevista virheistä johtuen lämmönläpäisevyyslaitteistolla mitatuille lämpöteknisille arvoille annetaan aina tietty epävarmuus, joka on TTKK:n laitteistolla ± 3 %. Laitteiston epävarmuus määritetään koe-elementeillä, joiden lämpötekniset arvot ovat ennalta tiedossa. Olennaista on, että tutkittavia rakenteita mitattaessa käytetään samoja olosuhdeasetuksia kuin laitteiston kalibroinnissakin. Tällöin virheiden merkitys vähenee huomattavasti.

LÄMMITYKSEN JA JÄÄHDYTYKSEN SÄÄTÖ KOKEESSA

Lämmönläpäisevyyskokeessa lämmityksen ja jäähdytyksen säätö tapahtuu mitattujen sisä- ja ulkoilman lämpötilojen avulla. Sisälämpötilan perusteella säädetään kalorimetrikaappiin syötettävän kokonaistehon määrää ja vastaavasti ulkolämpötilan perusteella jäähdytyskennoihin syötettävän freonin syöttöaikaa jäähdytysjaksossa. Teknisenä toteutuksena sisälämpötilan säätö tapahtuu siis portaattomasti ja ulkolämpötilan säätö puolestaan jaksoittaisesti. Ulkolämpötilan säädön osalta jaksoittainen säätö oli ainoa vaihtoehto, koska aikaisemmin rakennettu jäähdytyslaitteisto asetti suunnittelulle omat rajansa. Tästä huolimatta säädöt saatiin tehokkaiksi ja tarkoiksi sekä sisä- että ulkopuolella.

Sisälämpötilan säätö

Ohjausohjelman säätökaavoissa käytetään ilman lämpötiloista mitattuja 15 min keskiarvoja. Lämpötiloista otetaan huomioon sekä edellinen että uusi keskiarvo, jolloin saadaan selville lämpötilan muutossuunta ja nopeus. Kalorimetrikaappin lämmitystehoa säädetään seuraavan säätökaavan avulla:

$$P_{uus1} = P_{nyt} + k_{11}(t_{sa} - t_s) + k_{12}(t_{se} - t_s) \quad (5)$$

Säätökaavan ensimmäinen termi ottaa huomioon nykyisen lämmitystehon, toinen termi sisälämpötilan eron tavoitelämpötilasta ja kolmas termi lämpötilan muutos suunnan. Kaavassa P_{uus1} on kalorimetrikaappiin syötettävä uusi laskennallinen lämmitysteho, P_{nyt} on nykyinen laskennallinen lämmitysteho, t_{sa} on tavoitelämpötila sisällä (+20 °C), t_{se} on edellinen sisälämpötilan keskiarvo, t_s on uusi sisälämpötilan keskiarvo ja k_1 ja k_2 ovat säätökaavan painokertoimet. Painokertoimet ovat vapaasti valittavissa ja niiden avulla vaikutetaan säädön tehokkuuteen ja nopeuteen. Seuraavalla säätökierroksella P_{uus1} arvo siirtyy P_{nyt} arvon paikalle ja vastaavasti t_s arvo t_{se} arvon paikalle.

Lämmitysteho syötetään kalorimetrikaappiin säädettävän virtalähteen ja lisävirtalähteen avulla. Lisäksi laskelmissa on otettava huomioon kaapissa olevan tuulettimen lämmitysteho ja johtohäviöt. Laskennalliset P_{uusi} ja P_{nyl} arvot koostuvat näin ollen eri osatehoista seuraavasti:

$$\begin{matrix} P_{uusi} \\ P_{nyl} \end{matrix} = P_{sääd} + P_{lisä} + P_{tuul} + P_{häviö} \quad \Rightarrow \quad \begin{matrix} P_{uusi} \\ P_{nyl} \end{matrix} = P_{kok} + P_{häviö} \quad (6)$$

Lämmitystehon säätö toteutetaan kokeessa siten, että aluksi säädetään lisävirtalähteestä sopiva pohjateho. Tämän jälkeen kalorimetrikaapistä mitataan todellinen lisävirtalähteen teho ($P_{lisä}$) ja tuulettimen teho (P_{tuul}) ja lasketaan ne yhteen. Tällä tavoin saadaan näiden laitteiden virtajohdoissa tapahtuvat tehohäviöt eliminoitua. Sen jälkeen lisätään säädettävää virtalähteestä loput tarvittavasta tehosta. Säädettävän virtalähteen johtohäviöt ($P_{häviö}$) aiheuttavat kuitenkin sen, että kalorimetrikaappiin ei mene aivan haluttua tehoa. $P_{häviö}$:n osuus saadaan selville mittaamalla tämäkin teho vasta kalorimetrikaapin sisältä, mutta tästä johtuen laskennalliset P_{uusi} ja P_{nyl} arvot poikkeavat hieman kalorimetrikaapin kuluttamasta kokonaistehosta (P_{kok}).

Ulkolämpötilan säätö

Ulkolämpötilan säätö tapahtuu saman tyyppisellä säätökaavalla kuin sisälläkin, mutta säädettävänä suurena on tällöin jäähdytysajan pituus yhdessä jäähdytysjaksossa. Jäähdytysajan säätökaava on seuraava:

$$Ja_{uusi} = Ja_{nyl} - k_{j1}(t_{ua} - t_u) - k_{j2}(t_{ue} - t_u) \quad (7)$$

Säätökaavassa olevat termit vastaavat lämmitystehon säädössä käytettyjä termejä siten, että lämmitystehon tilalla kaavassa on jäähdytysaika ja vastaavasti sisälämpötilan tilalla ulkolämpötila. Jäähdytyksen säätöä varten valitaan kokeen alussa jäähdytysjakso, joka määrää kuinka usein jäähdytyskompressorit lähtevät käyntiin kokeen aikana. Kokeen kuluessa tietokone säätää jäähdytysajan pituuden annetussa jäähdytysjaksossa optimaaliseksi.

TUTKITTAVAN RAKENTEEN LÄMPÖTEKNISTEN ARVOJEN LASKENTA

Tutkittavan rakenteen lämpötekniset arvot voidaan laskea lähtöarvojen ja kokeesta mitattujen lämpötilojen sekä kokonaislämmitystehon avulla. Mitatuista ilman lämpötiloista on kuitenkin aluksi laskettava ns. ympäristölämpötilat, koska mitattuihin lämpötiloihin vaikuttavat suojalevyn ja elementin pinnan välissä tapahtuva lämpösäteily, ilman konvektio sekä suojalevyn ja elementin pintojen säteilyominaisuudet eli emissiviteetit. Näiden tekijöiden vaikutus otetaan laskelmissa huomioon säteilyn ja konvektion lämmönsiirtymiskertoimilla.

Suojalevyn ja elementin pinnan välillä siirtyvän säteilyn määrään vaikuttavat pintojen välinen lämpötilaero, pintojen asema ja mitat sekä pintojen ominaisuudet. Kahden toisiaan lähellä olevan tasopinnan välinen säteilyn lämmönsiirtymiskerroin (α_r) [$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$] voidaan laskea seuraavan kaavan avulla:

$$\alpha_r = h_r E \quad (8)$$

Kaavassa h_r on säteilykerroin ja E on kahden toisiaan lähellä olevan pinnan emissiviteettikerroin. Lämmönläpäisevyyskokeessa säteilykerroin h_r lasketaan kaavalla:

$$h_r = 4 \sigma T^3 = 4 \sigma \left[\frac{(t_p + t_l)}{2} + 273,15 \right]^3 \quad (9)$$

Kaavassa σ on Stefan-Bolzmännin säteilyvakio ($= 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}^4$), T on lämpötila [K] ja t_p ja t_l ovat tutkittavan elementin ja suojalevyn pintalämpötilat [$^{\circ}\text{C}$].

Emissiviteettikerroin E lasketaan kaavalla:

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{\epsilon_{rak}} + \frac{1}{\epsilon_l} - 1 \quad (10)$$

Kaavassa ϵ_{rak} on elementin pinnan emissiviteetti ja ϵ_l suojalevyn pinnan emissiviteetti.

Emissiviteettien arvot vaihtelevat 0.....1 välillä ja ne kuvaavat pintojen kykyä lähettää lämpösäteilyä ns. mustaan vertailukappaleeseen ($\epsilon = 1,0$) verrattuna. Käytännön laskelmissa emissiviteetti kuvaa lisäksi pinnan absorptiokykyä eli mitä suurempi pinnan emissiviteetti on sitä enemmän säteilystä imeytyy pintaan. Emissiviteetin arvo riippuu vallitsevasta lämpötilasta sekä lämpösäteilyn aallonpituudesta ja lähtökulmasta pintaan nähden. TTKK:n laitteistossa suojalevyjen ja kalibrointielementtien emissiviteetteinä käytetään arvoa 0,95. Tutkittavien koe-elementtien pintojen emissiviteetit vaihtelevat huonelämpötila-alueella yleensä 0,8.....0,98 välillä. Poikkeuksen tekevät lähinnä alumiinipinnat, joiden emissiviteetit vaihtelevat välillä 0,09.....0,35.

Kaavojen 8, 9 ja 10 perusteella voidaan säteilyn lämmönsiirtymiskertoimet koe-elementin sisä- ja ulkopuolella laskea seuraavasti:

$$\alpha_{rs} = \frac{4 \sigma [0,5 (t_{sp} + t_{st}) + 273,15]^3}{\frac{1}{\epsilon_{srak}} + \frac{1}{\epsilon_{si}} - 1} \quad (11)$$

$$\alpha_{ru} = \frac{4 \sigma [0,5 (t_{up} + t_{ul}) + 273,15]^3}{\frac{1}{\epsilon_{urak}} + \frac{1}{\epsilon_{ul}} - 1} \quad (12)$$

Konvektion lämmönsiirtymiskertoimen (α_c) [$W/m^2 \cdot K$] laskenta on huomattavasti hankalampaa, koska siihen vaikuttavien osatekijöiden merkitystä ja painoarvoa on usein vaikea arvioida. Konvektion lämmönsiirtymiskerroin riippuu mm. ilman ja pinnan välisestä lämpötilaerosta, ilmavirtauksen nopeudesta ja tyypistä (laminaarinen tai turbulентtinen), pinnan karkeudesta ja lämpövirran suunnasta. Luonnollisessa konvektiossa suoralla pinnalla α_c :n arvo on n. 3,0 $W/m^2 \cdot K$, mutta pakotetussa konvektiossa se voi olla paljon suurempi. Lämmönläpäisevyyskokeessa on aina sekä luonnollista että pakotettua konvektiota, jolloin ilmavirtauskin on sekä turbulентtista että laminaarista. Sisäpuolella on suurempi painoarvo luonnollisella konvektiolla ja ulkopuolella taas päinvastoin. Tästä johtuen koeolosuhteissa vallitsevia konvektion lämmönsiirtymiskertoimia on vaikea määrittää.

Standardissa ISO/DIS 8990 on annettu ilman ympäristölämpötiloille laskentakaava, jota voidaan käyttää silloin kun konvektion lämmönsiirtymiskertoimen arvoa ei ole tiedossa. Tämän laskentamenettelyn mukaisesti voidaan sisä- ja ulkoilman ympäristölämpötilat (t_{sy} ja t_{uy}) laskea seuraavasti:

$$t_{sy} = \frac{t_s \frac{P_{rak}}{A_{rak}} + \alpha_{rs} (t_s - t_{sl}) t_{sp}}{\frac{P_{rak}}{A_{rak}} + \alpha_{rs} (t_s - t_{sl})} \quad (13)$$

$$t_{uy} = \frac{t_u \frac{-P_{rak}}{A_{rak}} + \alpha_{ru} (t_u - t_{ul}) t_{up}}{\frac{-P_{rak}}{A_{rak}} + \alpha_{ru} (t_u - t_{ul})} \quad (14)$$

Kaavoissa t_{sl} ja t_{ul} ovat sisä- ja ulkosuojalevyn pintalämpötilat, t_{sp} ja t_{up} ovat tutkittavan koe-elementin sisä- ja ulkopinnan lämpötilat, α_{rs} ja α_{ru} ovat sisä- ja ulkopintojen säteilyn lämmönsiirtokertoimet ja P_{rak} on koe-elementin läpi menevä osuus lämmitystehosta, joka siis saadaan kaavasta:

$$P_{rak} = P_{kok} - P_{kal} \quad (15)$$

Edellä olevien kaavojen avulla saadaan tutkittavan rakenteen/ materiaalin lämpötekniset arvot seuraavilla laskentakaavoilla:

- 1) Koerakenteen läpi kulkeva lämpövirta [W/m^2]

$$q_{rak} = \frac{P_{rak}}{A_{rak}} \quad (16)$$

- 2) Koerakenteen lämmönjohtavuus [W/m·°C]

$$\lambda_{rak} = \frac{d_{rak} P_{rak}}{A_{rak} (t_{sp} - t_{up})} \quad (17)$$

- 3) Koerakenteen sisäpinnan pintavastus [m²·°C/W]

$$m_s = \frac{A_{rak} (t_{sy} - t_{sp})}{P_{rak}} \quad (18)$$

- 4) Koerakenteen ulkopinnan pintavastus [m²·°C/W]

$$m_u = \frac{A_{rak} (t_{up} - t_{uy})}{P_{rak}} \quad (19)$$

- 5) Koerakenteen lämmönvastus [m²·°C/W]

$$m_{rak} = \frac{A_{rak} (t_{sp} - t_{up})}{P_{rak}} \quad (20)$$

- 6) Koerakenteen U-arvo koeolosuhteiden pintavastuksilla [W/m²·°C]

$$U_{koe} = \frac{P_{rak}}{A_{rak} (t_{sy} - t_{uy})} \quad (21)$$

- 7) Koerakenteen U-arvo ohjeiden mukaisilla pintavastuksilla [W/m²·°C]

$$U_{0,2} = \frac{P_{rak}}{A_{rak} (t_{sp} - t_{up}) + 0,2 P_{rak}} \quad (22)$$

- 8) Koerakenteen U-arvo ilman pintavastuksia [W/m²·°C]

$$U_0 = \frac{P_{rak}}{A_{rak} (t_{sp} - t_{up})} \quad (23)$$

U-arvon erilaisista laskentakaavoista havaitaan, että rakenteen U-arvo on riippuvainen käytettävistä pintavastusten arvoista. Suomen rakentamismääräyskokoelman osa C 4 antaa sisä- ja ulkopinnan yhteiselle pintavastuksille ohjearvon $m_s + m_u = 0,2 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$. Tätä arvoa vastaava U-arvo lasketaan kokeessa kaavalla 22.

Koeolosuhteissa pintavastuksille saadaan halutut arvot säätämällä sisä- ja ulkoilmavirran nopeutta. U-arvokokeiden suorittamista käsittelevissä kansainvälisissä standardeissa ja myös muussa kirjallisuudessa annetaan lämmönläpäisevyyskokeessa käytettäville sisä- ja ulkopinnan pintavastuksille hieman pienemmät suositusarvot; $m_s = 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$ ja $m_u = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$. TTKK:n laitteistossa ilmavirtojen nopeudet säädetään siten, että pintavastuksiksi saadaan eo. arvot. Pienempi pintavastus edellyttää suurempaa ilmavirran nopeutta, jolloin pinnan ja ilman välinen lämpötilaero pienenee. Tätä ilmiötä tarkasteltiin jo edellä kuvissa 8 ja 9. Kokeessa käytettävillä pintavastuksilla mitattu U-arvo saadaan laskettua kaavalla 21.

Pintavastuksien merkitys tutkittavan rakenteen U-arvoon on sitä suurempi mitä pienempi on sen oma lämmönvastus. Näin ollen esim. ikkunoissa pintavastuksien osuus voi olla rakenteen U-arvosta jopa 35 %. Tämä merkitsee, että sisä- ja ulkoilmavirran nopeudet on oltava kokeen aikana hyvin tasaiset ja tarvittaessa säädettävissä.

LÄMMÖNLÄPÄISEVYYSLAITTEISTON KÄYTTÖ TUTKIMUKSESSA JA OPETUKSESSA

Uuden laitteiston avulla TTKK:lla on valmius tehdä erilaisia lämmönkulkuun liittyviä kokeita yritysten ja yhteisöjen tarpeita varten. Tehokkaan toimintansa vuoksi laitteisto mahdollistaa suurienkin koesarjojen läpiviennin esim. diplomityön puitteissa. Laitteistoa voidaan käyttää lisäksi opetuksen apuvälineenä demonstraatiokokeissa ja harjoitustöissä. Laitteisto on suunniteltu siten, että siihen voidaan tarvittaessa lisätä myös uusia testiolosuh-

teita (esim. dynaamiset lämpötilavaihtelut, auringon säteilyn vaikutus ja kosteusolosuhteiden muutokset).

Tähän mennessä laitteistolla on jo tehty mm. hirsiseinien lämmöneristävyysskojeita, joissa tutkittiin hirren lämmönjohtavuutta sekä erilaisia keinoja parantaa hirsiseinän U-arvoa. Uusimpana tutkimuksena on parhaillaan käynnissä erikoislasi-ikkunoiden tutkimus, jossa selvitetään erilaisten selektiivipintojen ja jalokaasujen vaikutusta ikkunan U-arvoon sekä pyritään etsimään näiden avulla optimoituja lasiyhdistelmiä ikkunoihin.

KIITOKSET

Esitän tässä yhteydessä kiitokset TTKK:n talonrakennustekniikan professorille Ralf Lindbergille ja lab.ins. Kauko Sahille laitteiston kehittämistyössä saamastani tuesta ja neuvoista sekä dipl.ins. Pekka Viitalalle suuritöisen ohjausohjelman teosta. Lisäksi kiitän TEKES:ta laitteiston suunnittelun ja rakentamisen rahoittamisesta.

LÄHDEKIRJALLISUUS

- [1] Björkholtz, D.: Lämpö ja kosteus; Rakennusfysiikka. Rakentajain kustannus Oy, Helsinki 1987.
- [2] CEN/ TC 89/ WG 7&8: Measuring method for the determination of the aggregate thermal transmittance (U-value) of a Window system or door system: calibrated and guarded hot box method. 1992.
- [3] CEN/ TC 89/ WG 8: Masonry - Determination of thermal resistance by means of heat flow meter in a hot box. 1992.

- [4] DIN-Taschenbuch 158: Wärmeschutz; Planung, Berechnung, Prüfung., 4. Auflage, 1988.
- [5] Incropera, F. P., de Witt, D. P.: Fundamentals of heat and mass transfer. 2. Edition, Singapore 1985.
- [6] ISO/ DIS 8990: Thermal insulation - Determination of steady-state thermal transmission properties - Calibrated and guarded hot box. 1991.
- [7] Lutz, P., Jenisch, R., Klopfer, H., Freymuth, H., Krampf, L.: Lehrbuch der Bauphysik; Schall, Wärme, Feuchte, Licht, Brand. 2. Auflage, Stuttgart 1989.
- [8] RIL 155: Lämmön- ja kosteudeneristys. Suomen rakennusinsinöörien liitto. Helsinki 1984.
- [9] Suomen rakentamismääräyskokoelma osa C 4: Lämmöneristys Ohjeet 1978 .Ympäristöministeriö, 1. - 2. painos, Helsinki 1989.

Juha Vinha, DI, tutkija
TTKK Talonrakennustekniikka

Email: juha.vinha@ce.tut.fi