Sisäinen konvektio puhallusvillaeristeisissä yläpohjissa

Henna Kivioja[1] ja Juha Vinha[1]
[1] Tampereen yliopisto

Tiivistelmä

Tämä artikkeli kertoo COMBI-hankkeessa calibrated hot-box -menetelmällä suoritetuista mittauksista, joissa tutkittiin, miten sisäinen konvektio vaikuttaa rakenteen eristyskykyyn paksuilla puhallusvillaeristekerroksilla eristetyissä kattorakenteissa. Tutkittava sisäinen konvektio oli sekä huokoisen materiaalin sisällä tapahtuvaa luonnollista konvektiota, joka aiheutuu painovoiman ja lämpötilaerojen vaikutuksesta, että pakotettua konvektiota, jossa koneellisesti luotu ilmavirtaus vaikuttaa syntyvään konvektioon. Tutkimuksessa tutkittiin kahta eri puhallusvillaa, joiden eristekerrosten paksuudet olivat 300 mm ja 600 mm. Mittaukset toistettiin kahdella eri lämpötilaerolla ja tuuletusvälin ilmavirran nopeudella sekä kattoristikoiden kanssa että ilman kattoristikoita. Yhteensä koesarjassa tutkittiin 24 erilaista tapausta. Tutkimuksen tulokset osoittavat, että sisäinen konvektio voi heikentää erityisesti huokoisilla puhallusvillaeristeillä eristettyjen yläpohjien lämmöneristyskykyä merkittävästi. Tutkimustulokset osoittavat tarpeen kriittiselle arvioinnille siitä, ottavatko kansainväliset standardit ja Suomen rakentamismääräyskokoelma kattorakenteiden sisäistä konvektiota tarpeeksi huomioon. Yläpinnaltaan avointen vaakarakenteiden kriittistä modifioitua Rayleighin lukua pitäisi laskea arvoon 5, jotta sisäinen konvektio huomioitaisiin tarpeeksi.

1. Johdanto

Lähes nollaenergiarakennuksia rakennettaessa täytyy kiinnittää yhä enemmän huomiota rakenteiden rakennusfysikaaliseen toimintaan. Yksi keino vastata kiristyneiden rakennusmääräysten vaatimuksiin on kasvattaa eristepaksuuksia. Eristepaksuuden kasvattaminen saattaa kuitenkin tuoda mukanaan ongelmia varsinkin huokoisia eristemateriaaleja käytettäessä.

Puhallusvillaeristeet ovat yleisesti käytössä pohjoismaissa niiden kustannustehokkuuden takia. Puhallusvillaeristeillä ongelmaksi saattaa muodostua kuitenkin niiden suuri ilmanläpäisevyys, joka antaa paremmat mahdollisuudet sisäisen konvektion syntymiselle eristekerroksen sisään. Sisäinen konvektio ei ainoastaan johda suurempaan energiankulutukseen, vaan se voi myös kuljettaa mukanaan eristetilaan päässyttä vesihöyryä, joka voi tiivistyä vedeksi kylmässä tuuletustilassa ja aiheuttaa kosteus- ja homevaurioita.

Aiemmin yläpohjarakenteiden sisäistä konvektiota tutkittiin FRAME-projektissa [1]. Tutkimusaihe otettiin mukaan myös COMBI-hankkeeseen, sillä aiemmat tutkimukset jättivät monia jatkotutkimustarpeita eikä kokeellista tutkimusta aiheesta ole suoritettu tarpeeksi. Tutkimuksessa tarkastelun kohteena olivat eristemateriaali, eristekerroksen paksuus, lämpötilaero eristekerroksen yli, ilmavirtaus eristekerroksen pinnalla sekä kattoristikoiden vaikutus. Lisäksi tehtiin vertailua FRAME-kokeiden tuloksiin, jolloin saatiin tietoa eristeiden asennusmenetelmän ja tutkimuslaitteiston tutkimusaukon pinta-alan vaikutuksesta sisäiseen konvektioon.

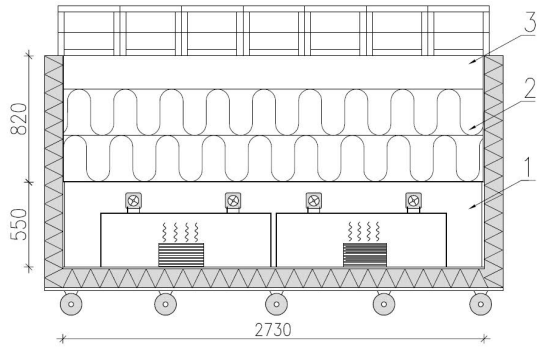
Kivioja, H. & Vinha, J. (2019) Sisäinen konvektio puhalluseristeisissä yläpohjissa. Julkaisussa: Vinha, J. & Raunima, T. (2019) Rakennusfysiikka 2019. Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut. 28.-30.11.2019 Tampere. Seminaarijulkaisu 6, osa 1(2).

2. Kokeiden suorittaminen

2.1 Koemenetelmä ja kalusto

FRAME-projektissa käytetyn laitteiston tutkimusaukon pinta-ala oli 1,2 m x 1,2 m. Vuonna 2016 valmistui Tampereen yliopistolle rakennettu uusi suurempi yläpohjarakenteiden tutkimuslaitteisto. Laitteisto rakennettiin standardin SFS-EN ISO 8990 [2] vaatimusten mukaisesti ja myös standardia SFS-EN ISO 12567 [3] on käytetty soveltuvilta osin apuna rakennusprosessissa. Uudemman laitteiston tutkimusaukon koko (1,84 m x 2,73 m) on tarpeeksi suuri, jotta ilmiöt pääsevät tapahtumaan todenmukaisemmin eristekerroksen sisällä. Laitteisto käyttää calibrated hot-box -menetelmää.

Laitteisto koostuu lämpimästä ja kylmästä kammiosta, jotka sijaitsevat pakkashuoneen sisällä. Tutkittava kappale asetetaan kammioiden välissä olevaan tutkimusaukkoon. Tutkimusaukon osat on esitetty kuvassa 1. Sekä lämmittimet että lämpötilojen mittaukset toimivat tietokoneohjelman kautta. Testeissä pakkashuone toimi oman ohjausyksikkönsä avulla.



Kuva 1. Yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto, missä 1) on lämmin kammio, 2) on tutkittava rakenne tutkimusaukossa ja 3) on kylmä kammio.

Calibrated hot-box -menetelmässä tarvitaan laitteiston tarkka kalibrointi, jotta saadaan selville laitteiston vaipan kautta tapahtuvat lämpöhäviöt Φ_{loss} (W). Kalibrointielementti rakennettiin 50 mm ja 100 mm paksuista XPS-levyistä, joiden lämmönjohtavuudet mitattiin käytetyissä olosuhteissa. Kalibrointi suoritettiin kuudessa eri olosuhteessa; aina, kun rakenteen paksuus, lämpötilaero tai ilmavirtaus muuttuivat. Tutkittavan rakenteen läpi virtaava lämpövirta saatiin selville kaavalla $\Phi_{srt} = P_{tot} - \Phi_{loss}$, kun tiedettiin P_{tot} (W), joka on lämpimään kammioon syötetty teho mitattuna kaikilta lämmittimiltä ja tuulettimilta. U-arvo voitiin laskea kaavalla $U = \Phi_{srt}/(A \cdot \Delta T)$, kun tiedettiin lisäksi tutkittavan rakenteen pinta-ala A (m^2) ja lämpötilaero rakenteen yli ΔT (°C).

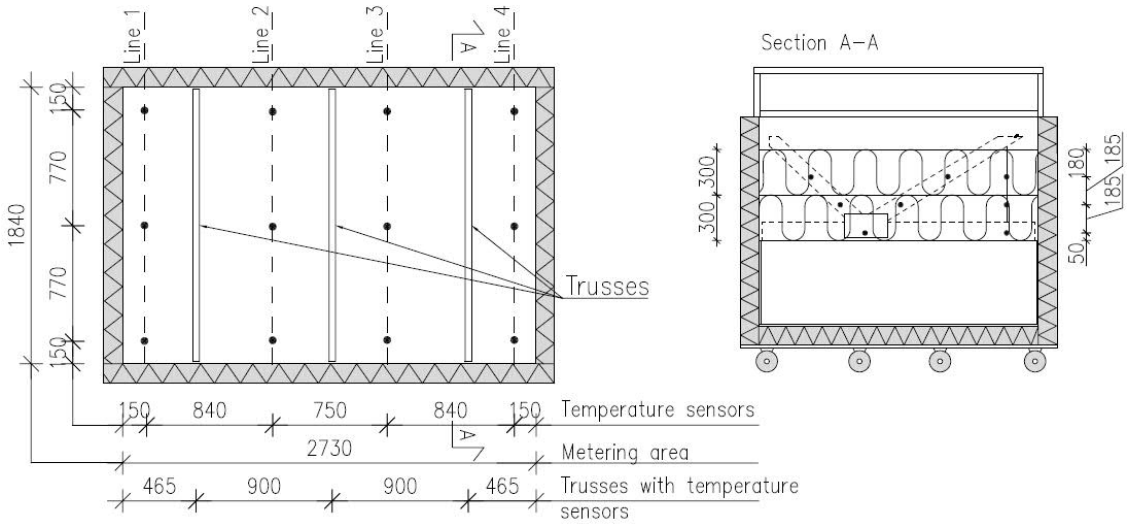
Kaikki testit kestivät vähintään 72 tuntia. Mittausta jatkettiin tasapainotilanteen saavuttamiseen saakka, jolloin lämpötilat ja lämmitystehot vaihtelivat alle 1 %. Laskenta-arvot mitattiin tämän jälkeen 6 tunnin jaksosta. U-arvo ilman sisäistä konvektiota laskettiin standardin SFS-EN ISO 6946 [4] mukaan yläraja-alaraja-menetelmällä, jolla pystyttiin ottamaan huomioon myös kattoristikoiden vaikutus. Laskenta suoritettiin Tampereen yliopistolla mitatuilla lämmönjohtavuuden arvoilla.

2.2 Tutkittavat rakenteet ja olosuhteet

Tutkittavan rakenteen alapinnassa oli 20 mm vaneri ja höyrynsulku. Kokeet suoritettiin puukuitu- ja lasipuhallusvillalla 300 mm ja 600 mm paksuisilla eristekerroksilla sekä kattoristikoiden kanssa että ilman. Lämpimän ja kylmän kammion välillä käytettiin 20 °C:n (0…20 °C) ja 35 °C:n (–15…+20 °C) lämpötilaeroja ja eristekerroksen pinnalla virtaavan ilmavirtauksen nopeuksina 0,0–0,1 m/s ja 0,5–0,7 m/s. Kuvassa 2 on esitetty tilanteet rakenteelle, joka on eristetty puukuitueristeellä ja jossa on mukana kattoristikot.

Kuva 2. Tutkimusaukko ennen kylmän kammion suojalevyjen ja suojakammion asennusta. Kattoristikon osat ennen eristeen asennusta (vasemmalla), 300 mm puukuitupuhallusvillan asennuksen jälkeen (keskellä), 600 mm puukuitupuhallusvillan asennuksen jälkeen (oikealla).

Testien aikana kylmästä ja lämpimästä kammiosta mitattiin lämpötilaa, suhteellista kosteutta ja ilmavirran nopeutta. Yhteensä 72 lämpötila-anturin mittaustuloksia käytettiin tulosten laskemiseen. Lisäksi 22 lämpötila-anturia oli lisätty eristekerroksen sisään korkeuksille 235 mm ja 420 mm eristekerroksen pohjasta ja jokaiseen kattoristikkoon kiinnitettiin 6 lämpötila-anturia. Kuvassa 3 on havainnollistettu lämpötila-antureiden ja kattoristikoiden paikkoja. Kylmän ja lämpimän kammion keskialueilla oli anturit, jotka mittasivat suhteellista kosteutta ja ilmavirran nopeutta. Taulukko 1 esittää selitykset lyhenteille, joita on käytetty eri rakenteista ja olosuhteista.



Kuva 3. Tutkimusaukon mitat ja lämpötila-antureiden sekä kattoristikoiden paikat.

Kaikkien koerakenteissa ja kalibroinnissa käytettyjen materiaalien lämmönjohtavuudet mitattiin, jotta saatiin mahdollisimman tarkat lähtötiedot laskentaa varten. Puukuitupuhallusvillaa puhallettaessa eristekerros pakkautuu sitä tiheämmäksi, mitä paksumpi kerros eristettä puhalletaan. Mittauksissa mitattu tiheys 300 mm puukuitupuhallusvillakerroksesta oli 36 kg/m^3 ja

600 mm kerroksesta 40 kg/m^3. Lasipuhallusvillan tapauksissa samaa ilmiötä ei ollut havaittavissa, vaan molempien lasipuhallusvillakerrosten tiheydeksi saatiin 25 kg/m^3.

Taulukko 1. Lyhenteet ja selitykset käytetyistä rakenteista ja olosuhteista.

Lyhenne	Selitys
W300	300 mm puukuitupuhallusvillakerros
W600	600 mm puukuitupuhallusvillakerros
GL300	300 mm lasipuhallusvillakerros
GL600	600 mm lasipuhallusvillakerros
TR	rakenteessa on kattoristikot
INS	rakenteessa ei ole kattoristikoita
20	20 °C lämpötilaero
35	35 °C lämpötilaero
AF0.0	0,0–0,1 m/s ilmavirtaus eristekerroksen pinnalla
AF0.6	0,5–0,7 m/s ilmavirtaus eristekerroksen pinnalla

2.3 Kaavat

Dimensioton modifioitu Rayleighin luku kuvaa potentiaalia sisäisen konvektion syntymiselle. Mitä suurempi R_{am}, sitä todennäköisimmin sisäistä konvektiota esiintyy rakenteessa. Standardi SFS-EN ISO 10456 [5] määrittelee modifioidun Rayleighin luvun kaavalla 1. Kriittistä modifioitua Rayleighin lukua $R_{am,cr}$ käytetään esittämään hetkeä, jolloin sisäinen konvektio alkaa.

$$Ra_m = \frac{g\beta\rho c_p}{\upsilon} \cdot \frac{d\kappa\Delta T_s}{\lambda_m} \tag{1}$$

missä Ra_m = modifioitu Rayleighin luku (-)
g = maan putoamiskiihtyvyys (m/s^2)
β = ilman lämpölaajenemiskerroin 10 °C:ssa (1/K)
c_p = ilman ominaislämpökapasiteetti 10 °C:ssa (J/(kgK))
υ = ilman kinemaattinen viskositeetti 10 °C:ssa (m^2/s)
d = kerroksen paksuus (m)
κ = ilman permeabiliteetti 10 °C:ssa (m^2)
ΔT_s = lämpötilaero rakenteen pintojen välillä (K)
λ_m = materiaalin lämmönjohtavuus (W/(m^{2}K))

Sisäistä konvektiota voidaan arvioida myös dimensiottoman Nusseltin luvun, *Nu*, avulla kaavalla 2. Nusseltin luku kuvaa sitä, kuinka paljon lämpövirta kasvaa sisäisen konvektion vaikutuksesta.

$$Nu = \frac{q_{cd} + q_{conv}}{q_{cd}} \tag{2}$$

missä Nu = Nusseltin luku (-)
q_{cd} = lämpövirran tiheys ilman konvektiota (W/m^2)
$q_{cd} + q_{conv}$ = lämpövirran tiheys mitattuna hot-box-menetelmällä, jolloin mukana on lämmön siirtyminen johtumisen lisäksi konvektion avulla (W/m^2)

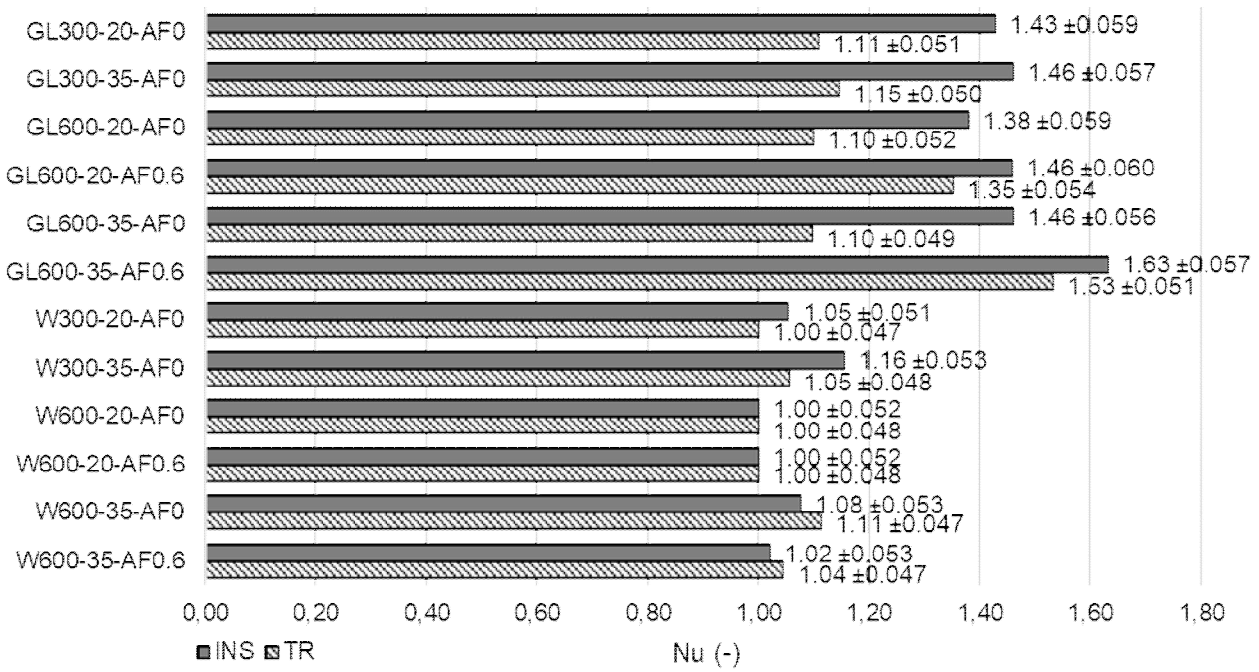
3. Tulokset ja pohdinta

3.1 Sisäinen konvektio

Taulukossa 2 ja kuvassa 4 esitetään tutkimuksen mittaustulokset. Puukuitupuhallusvillan tapauksissa konvektio lisäsi lämpövirtaa 0–16 % ja lasipuhallusvillalla kattoristikoiden kanssa 10–53 % ja ilman kattoristikoita 38–63 %. Tuloksista nähdään, että puhalletulla puukuitueristeellä 20 °C:n lämpötilaerolla Nusseltin luku oli vain 1,00–1,05 eli sisäistä konvektiota ei tapahtunut juuri ollenkaan. Lasipuhallusvillan tuloksista nähdään, että huomattavaa sisäistä konvektiota voi esiintyä jo 20 °C:n lämpötilaerolla.

Taulukko 2. Kokeissa mitatut olosuhteet ja lasketut U-arvot sekä modifioidut Rayleighin luvut.

Testi	$T_{a,i}$ (°C)	$T_{a,e}$ (°C)	ΔT_a (°C)	$v_{a,e}$ (m/s)	q_{srt} (W/m^2)	$U_{0.14}$ (W/m^{2}K)	Ra_m (-)
W300-TR-20-AF0	20,00	0,03	19,97	0,02	2,70	0,1457 ±0,0071	2,6
W300-TR-35-AF0	20,00	-14,58	34,58	0,02	4,76	0,1476 ±0,0067	5,0
W600-TR-20-AF0	20,00	-0,06	20,06	0,03	1,52	0,0778 ±0,0038	3,4
W600-TR-20-AF0.6	20,00	-0,01	20,01	0,71	1,39	0,0708 ±0,0038	3,4
W600-TR-35-AF0	20,00	-14,84	34,84	0,00	2,79	0,0812 ±0,0035	6,5
W600-TR-35-AF0.6	20,00	-14,89	34,89	0,72	2,64	0,0762 ±0,0034	6,5
W300-INS- 20-AF0	20,00	0,13	19,87	0,05	2,70	0,1461 ±0,0071	2,6
W300-INS- 35-AF0	20,00	-14,30	34,30	0,05	4,70	0,1473 ±0,0067	5,0
W600-INS-20-AF0	20,00	-0,17	20,17	0,02	1,26	0,0632 ±0,0037	3,4
W600-INS-20-AF0.6	20,00	0,00	20,00	0,61	1,29	0,0647 ±0,0037	3,4
W600-INS-35-AF0	20,00	-14,67	34,67	0,01	2,40	0,0701 ±0,0034	6,4
W600-INS-35-AF0.6	20,00	-14,66	34,66	0,69	2,30	0,0664 ±0,0034	6,5
GL300-TR-20-AF0	20,00	-0,16	20,16	0,02	2,98	0,1555 ±0,0072	2,5
GL300-TR-35-AF0	20,00	-14,79	34,79	0,02	5,09	0,1541 ±0,0068	4,8
GL600-TR-20-AF0	20,00	-0,29	20,29	0,02	1,58	0,0804 ±0,0038	5,2
GL600-TR-20-AF0.6	20,00	0,00	19,99	0,59	1,93	0,0989 ±0,0040	5,2
GL600-TR-35-AF0	20,00	-15,32	35,32	0,12	2,62	0,0769 ±0,0034	9,5
GL600-TR-35-AF0.6	20,00	-14,65	34,65	0,52	3,67	0,1074 ±0,0036	9,5
GL300-INS-20-AF0	20,00	0,10	19,90	0,06	3,39	0,1827 ±0,0075	2,4
GL300-INS-35-AF0	20,00	-14,33	34,32	0,06	5,68	0,1780 ±0,0069	4,4
GL600-INS-20-AF0	20,00	-0,14	20,14	0,05	1,79	0,0899 ±0,0039	5,3
GL600-INS-20-AF0.6	20,00	0,06	19,94	0,53	1,89	0,0950 ±0,0039	5,3
GL600-INS-35-AF0	20,00	-14,48	34,48	0,05	3,09	0,0906 ±0,0035	9,5
GL600-INS-35-AF0.6	20,00	-14,35	34,35	0,49	3,47	0,1012 ±0,0035	9,5



Kuva 4. Koetilanteiden Nusseltin luvut. Sisäistä konvektiota tapahtuu, jos Nusseltin luku on >1.0.

Tulosten perusteella pitäisi arvioida kriittisesti sitä, ottavatko kansainväliset standardit ja Suomen Rakentamismääräyskokoelma sisäisen konvektion riittävästi huomioon. Tällä hetkellä standardi SFS-EN ISO 10456 [5] ja RakMK C4 [6] asettavat kriittiseksi modifioiduksi Rayleighin luvuksi 15, kun lämpövirran suunta on ylöspäin ja rakenteen yläpinta on avoin. Mittauksista saadut modifioidut Rayleighin luvut vaihtelivat välillä 2,4–9,5, jotka ovat kaikki reilusti alle 15, vaikka sisäistä konvektiota havaittiin noin 80 %:ssa tapauksista. Tapauksissa, joissa ei havaittu sisäistä konvektiota, modifioitu Rayleighin luku oli 2,6–3,4.

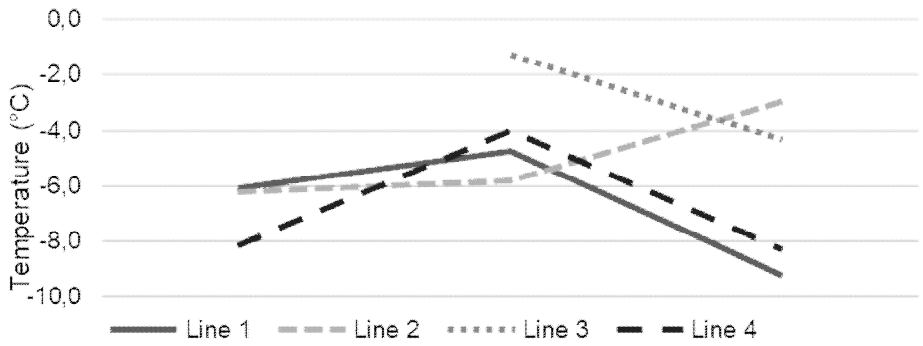
Tulosten mukaan puukuitueristeellä Nusseltin luku ylitti luvun 1,0, kun tulosta vastaava modifioitu Rayleighin luku oli 5. COMBI:n ja FRAME:n tulosten mukaan kriittinen modifioitu Rayleighin luku tulisi olla 5 eristeen yläpinnan ollessa avoin, jotta sisäinen konvektio ei alentaisi puhallusvillaeristeen eristyskykyä. Tämä arvo vastaa myös Shankarin ja Hagentoftin [7] laskelmien tuloksia sekä Gullbrekken et al. [8] mittaustuloksia. Joissakin tapauksissa modifioitu Rayleighin luku oli kuitenkin alle 5, vaikka eristeessä tapahtui sisäistä konvektiota. Esimerkiksi lasivillalla havaittiin tapauksia, joissa Nusseltin luku ei kasvanut vaikka modifioitu Rayleighin luku kaksinkertaistui. Tästä voidaan päätellä, että mittaustulokset voivat vaihdella suuresti ja arvoa 5 voidaan pitää sopivana kriittisen modifioidun Rayleighin luvun arvona myös lasipuhallusvillalle.

Wahlgren [9] on esittänyt mittaustensa perusteella kriittiseksi modifioiduksi Rayleighin luvuksi arvoa 22. Wahlgren kuitenkin suoritti mittaukset vain rakenteen keskiosalta 1 m^2 suuruiselta alueelta. Yleisesti lämpövirran tiheydet ovat suurempia eristekerroksen keskialueilla kuin lähellä reunoja. Siksi koko rakenteen sisäistä konvektiota ei voi arvioida ainoastaan mittaamalla eristeen keskiosia.

3.2 Lämpötilajakaumat

Tutkimuksessa mitattiin myös eristekerroksen sisäisiä lämpötilajakaumia. Kattoristikot eivät kasvattaneet sisäistä konvektiota, mutta normaali kylmäsiltavaikutus oli huomattavissa. Konvektiovirtaukset ovat nähtävissä lämpötilamittausten tuloksista. Suurimmaksi osaksi lämpötilat

olivat korkeampia eristeen keskiosissa kuin eristekerroksen reunoilla ja nurkissa. Puukuitupuhallusvillan tapauksissa lämpötilat olivat keskimäärin 1–5 °C korkeammat keskellä kuin lähellä reunoja. Lasipuhallusvillalla joillakin yksittäisillä tapauksilla ero saattoi olla jopa 10 °C. Yleisesti lasipuhallusvillan sisällä lämpötilajakaumat olivat suuremmat kuin puukuitupuhallusvillalla.



Kuva 5. Lämpötilajakauma lasipuhallusvillaeristeen sisällä 420 mm korkeudella, kun lämpötilaero oli 35 °C ja eristekerroksen pinnalla ei ollut ilmavirtausta (GL600-INS-35-AF0). Linjojen (lines 1–4) sijoittuminen on esitetty kuvassa 3. Linjasta 3 puuttui yksi lämpötila-anturi.

Kuva 5 esittää lämpötilajakauman 600 mm lasipuhallusvillaeristekerroksen sisällä korkeudella 420 mm eristeen alapinnasta, kun mittauksen lämpötilaero oli 35 °C ja eristekerroksen pinnalla ei ollut merkittävää ilmavirtausta. Lämpötilamittaukset osoittavat, että konvektiota tapahtuu koko eristekerroksen alueella ja se saa ilman liikkumaan pääsääntöisesti ylöspäin eristekerroksen keskialueella ja alaspäin lähellä reunoja.

3.3 Yksittäisten muuttujien vaikutus

Tutkimuksessa tutkittiin viiden eri muuttujan vaikutusta sisäiseen konvektioon: lämpötilaeron, kattoristikoiden, ilmavirran nopeuden rakenteen pinnalla, eristekerroksen paksuuden ja eristemateriaalin. Yksittäisten muuttujien vaikutusta sisäiseen konvektioon tutkittiin vertaamalla kahta mittausta, jossa vain yksi muuttuja muuttuu.

Selvästi suurin vaikutus havaittiin olevan eristemateriaalilla, koska yhtä tapausta lukuun ottamatta lasipuhallusvillalla sisäinen konvektio oli suurempaa kuin puukuitupuhalluseristeellä. Verrattaessa tapausta ilman kattoristikoita, lasivillalla havaittiin jopa 61 %-yksikköä enemmän sisäistä konvektiota kuin puukuitupuhallusvillalla vastaavassa tilanteessa. Yksistään eristekerroksen paksuudella ei näyttänyt olevan kovin paljon vaikutusta missään tutkituissa olosuhteissa. Pelkästään puukuitueristeen tapauksia vertailtaessa lämpötilaeron kasvattaminen aiheutti suurimman kasvun (10 %-yksikköä) sisäiseen konvektioon. Lasipuhallusvillalla suurimmat yksittäiset sisäistä konvektiota kasvattavat tekijät olivat ilmavirtauksen lisääminen ja yllättävästi kattoristikoiden poistaminen.

Tiheämmällä puukuitupuhallusvillalla kattoristikoiden lisääminen ei vaikuttanut sisäiseen konvektioon. Lasipuhallusvillalla sisäinen konvektio kuitenkin väheni 10–30 %-yksikköä, kun kattoristikot lisättiin rakenteeseen. Delmas ja Arquis [10] ovat esittäneet, että kattoristikoiden alapaarteet saattavat pienentää kriittistä modifioitua Rayleighin lukua, mutta myös vähentää ilmavirran nopeutta eristekerroksessa, mikäli modifioitu Rayleighin luku on suuri. Tässä tutkimuksessa modifioidut Rayleighin luvut eivät olleet yhtä suuria kuin esitetyssä tutkimuksessa,

mutta sisäinen konvektio oli kuitenkin merkittävää lasipuhallusvillalla eristetyissä rakenteissa. Siksi kattoristikoiden alapaarteet saattoivat hidastaa sisäistä konvektiota laitteiston pituussuunnassa. Sisäistä konvektiota tapahtuu kuitenkin myös toisessa suunnassa.

3.4 Asennusmenetelmä ja tutkimusaukon koko

FRAME-hankkeessa tutkittiin samantyylisiä rakenteita, mutta tutkimusaukon koko oli 1,44 m^2 ja eristeet asennettiin tutkimusaukkoon käsin ripottelemalla. Verrattaessa COMBI:n laitteistolla (tutkimusaukko n. 5 m^2) saatuja tuloksia nähdään, että lasivillan tulokset ovat samaa suuruusluokkaa. Tästä pääteltynä pienemmän laitteiston reunojen vaikutusta ei koettu liian suureksi. Puukuitueristeen osalta tulokset kuitenkin eroavat toisistaan tutkimusten välillä. Käsin asennetun puukuitueristeen rakenne eroaa jopa silmämääräisesti tarkasteltuna puhallusvillan puhalluskoneella asennetusta eristeestä. Käsin asennettu eriste pakkautuu eri tavalla ja kuitujen väliin jää suurempia ilmarakoja. Lasivillalla kyseistä ilmiötä ei ole havaittavissa. Tästä johtuen puukuitupuhallusvilla kehotetaan aina asentamaan puhaltamalla.

4. Yhteenveto

Kattorakenteiden sisäistä konvektiota tutkittiin yhteensä 24 erilaisella tapauksella. Sisäinen konvektio tapahtuu koko eristekerroksen alalla, joten sillä voi olla hyvin suuri vaikutus rakenteen U-arvoon. Tämän tutkimuksen tulokset osoittavat kattorakenteiden suunnittelun tärkeyttä ja jo rakenteiden suunnitteluvaiheessa tulee kiinnittää huomiota eristemateriaalien ja asennustapojen valintaan. Lasipuhallusvillaeristeellä havaittiin enemmän sisäistä konvektiota kuin tiheämmällä puukuitupuhallusvillalla. Lasipuhallusvillalla sisäinen konvektio voi kasvattaa lämpövirtaa rakenteen läpi jopa 60 %. Kuitenkin keskimääräinen kasvu puukuitupuhallusvillalla eristetyissä rakenteissa oli 0–10 % ja lasipuhallusvillalla eristetyissä rakenteissa 30–40 %. Kun tutkittiin yksittäisten muuttujien vaikutusta sisäiseen konvektioon, lasipuhallusvillalla suurin yksittäisen tekijän vaikutus oli lämpötilaeron kasvattamisella, kun taas lasipuhallusvillaeristeillä suurimmat vaikutukset havaittiin eristeen pinnalla vaikuttavalla ilmavirran nopeudella ja kattoristikoiden läsnäololla. Tutkimuksen tulosten mukaan kriittistä modifioidun Rayleighin luvun raja-arvoa tulisi laskea arvoon 5 sekä kansainvälisissä standardeissa kuin kansallisissa ohjeissa, jotta sisäinen konvektio otettaisiin tarpeeksi huomioon.

Lähdeluettelo

[1] Vinha, J., Laukkarinen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A., Suonketo, J., Jokisalo, J., Teriö, O., Koskenvesa, A., Palolahti, T. 2013. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tutkimusraportti 159. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka. 354 s. + 43 liites.

[2] SFS-EN 8990. 1996. Thermal insulation. Determination of steady-state thermal transmission properties. Calibrated and guarded hot box. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 24 p.

[3] SFS-EN 12567. 2010. Thermal performance of windows and doors. Determination of thermal transmittance by the hot-box method. Part 1: Complete windows and doors. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 28 p. + 35 appendix.

[4] SFS-EN 6946. 2008. Rakenne- ja rakennusosat. Lämmönvastus ja lämmönläpäisy-kerroin. Laskentamenetelmä. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 31 s.

[5] SFS-EN 10456. 2007. Rakennusaineet ja -tuotteet. Lämpö- ja kosteustekniset omi-naisuudet. Taulukoidut suunnitteluarvot ja menetelmät ilmoitetun lämpöteknisen arvon ja lämpöteknisen suunnitteluarvon määrittämiseksi. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 20 s. + 10 liites.
[6] RakMk C4. (2012). Lämmöneristys Ohjeet 2012. LUONNOS 16.maaliskuuta 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. Helsinki. 47 s.
[7] Shankar, V., Hagentoft, C-E. 2000. A Numericals Study of Effect of Natural Convection on Thermal Properties of Horizontal Oriented Porous Insulation. Journal of Building Physics. Vol. 24 (2). pp. 155–167.
[8] Gullbrekken, L. Uvslokk, S. Kvande, T. Time, B. 2017. Hot-Box measurements of highly insulated wall, roof and floor structures. Journal of Building Physics. Vol. 41 (1). pp. 58–77.
[9] Wahlgren, P. 2001. Convection in Loose-fill Attic Insulation. PhD thesis. Chalmers University of Technology, Göteborg.
[10] Delmas, A., Arquis, E. 1995. Early Initiation of Natural Convection in an Open Porous Layer Due to the Presence of Solid Conductive Inclusions. Journal of Heat Transfer. Vol. 117. pp. 773–739.