

COMBI

COMPREHENSIVE DEVELOPMENT OF
NEARLY ZERO-ENERGY
MUNICIPAL SERVICE BUILDINGS



SISÄISEN KONVEKTION VAIKUTUS PUHALLUSVILLA- ERISTEISISSÄ YLÄPOHJISSA

Henna Kivioja ja Eero Tuominen, Tampereen teknillinen yliopisto

Sisällys

Sisäisen konvektion vaikutus puhallusvillaeristeisissä yläpohjissa

Sisäinen konvektio

Sisäisen konvektion tutkimusmenetelmät

Yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto

COMBI:n yläpohjakokeiden suoritus

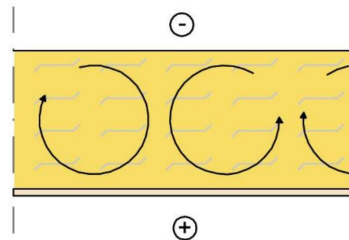
COMBI:n yläpohjakokeiden tulokset

Johtopäätökset

Sisäinen konvektio

- Konvektiossa lämpö siirtyy virtaavan aineen tai ilman mukana
 - Luonnollinen konvektio: lämpötilaerojen aiheuttamien ilman tiheyserojen seurauksena
 - Pakotettu konvektio: tuulen tai puhaltimen ansiosta
- Yläpohjien sisäinen konvektio
 - Voi esiintyä yhdistettyä luonnollista ja pakotettua konvektiota
 - Heikentää avohuokosilla materiaaleilla eristettyjen yläpohjien lämmöneristävyyttä ja kosteusteknistä toimintaa
 - Suuruuteen vaikuttaa
 - ilmanläpäisevyys
 - rakenteen paksuus
 - lämpötilaero rakenteen yli
 - rakenteen geometria

Rakenteen yli vaikuttava lämpötilaero ja painovoima synnyttävät ilmavirtauksia ilmaa läpäisevän kerroksen sisään. Pyörteet yläpohjan eristekerroksessa voivat olla esimerkiksi kuvan mukaisia.



Seinärakenteessa kylmä ilma laskee kylmän ulkopinnan puolella ja nousee taas ylös lämpimän sisäpinnan puolella.

Yläpohjan eristeessä aiheutuvia ilman virtausreittejä on vaikeampi arvioida, koska yläpohjassa on monta kylmää reunaa ja konvektiopyörteiden vaikutusta toisiinsa ei täysin tunneta.

Sisäisen konvektion tutkiminen

Sisäistä konvektiota voidaan arvioida kokeellisesti laskemalla koetuloksista Nusseltin luku, joka ilmoittaa konvektion avulla rakenteen läpi siirtyvän lämpövirran.

Nusseltin luku Nu (-) saadaan selville mittaustuloksista jakamalla U-arvomittauksessa saatu U-arvo laskennallisella pelkän johtumisen huomioon ottavalla U-arvolla.

$$Nu = \frac{U_{with\ convection}}{U_{without\ convection}}$$

Nusseltin luvun ollessa 1,0 sisäistä konvektiota ei tapahdu ja lämpö siirtyy pelkästään johtumalla.

Modifioidun Rayleighin luku Ra_m kuvaa sisäisen konvektion tapahtumisen todennäköisyyttä. Mitä suurempi Modifioitu Rayleighin luku on sitä todennäköisemmin rakenteessa tapahtuu konvektiota. RakMK määrittelee Ra_m :lle raja-arvoksi ulkoseinässä 2,5, avoimessa yläpohjassa 15 ja tuulensuojalla suojatussa yläpohjassa 30.

$$Ra_m = \frac{g\beta\rho c_p}{\nu} \cdot \frac{dk\Delta T}{\lambda_m}$$

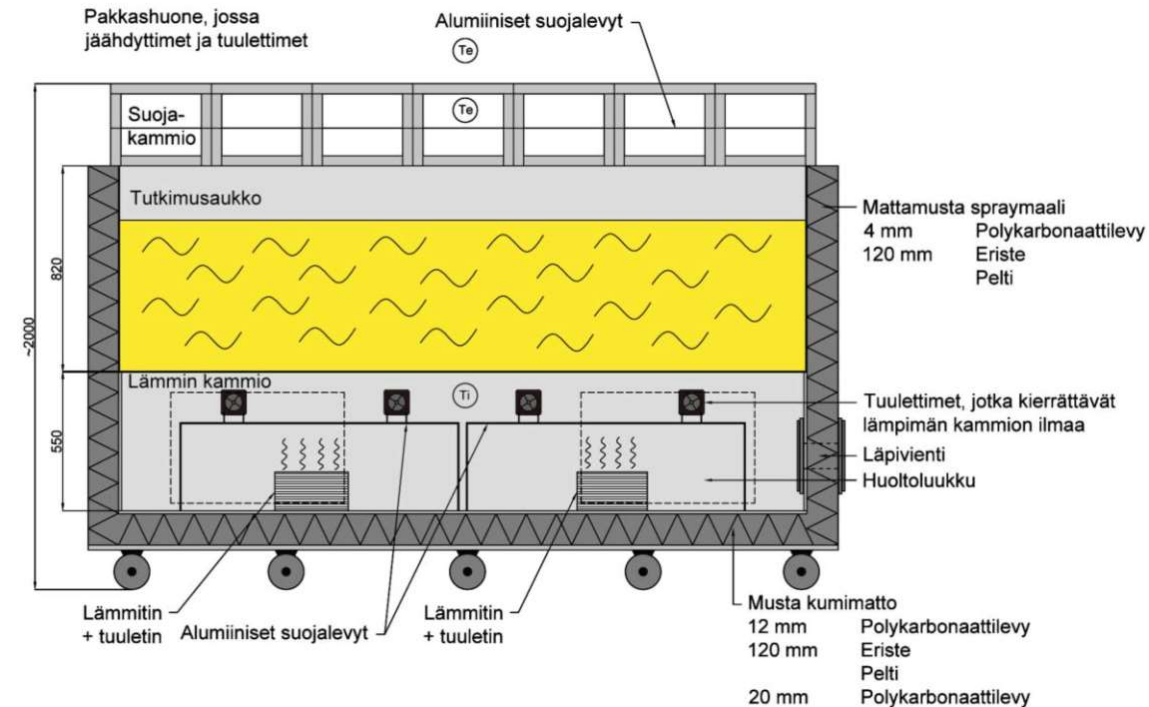
d	= eristekerroksen paksuus (m)
k	= eristeen ilmanläpäisevyys (m^2)
λ_m	= eristeen lämmönjohtavuus ($W/(m^2K)$)
ΔT	= lämpötilaero eristekerroksen yli (K)
g	= maan vetovoimakiinetyvyys (m/s^2)
β	= ilman lämpölaajenemiskerroin 10 °C:ssa (1/K)
ρ	= ilman tiheys 10 °C:ssa (kg/m^3)
c_p	= ilman ominaislämpökapasiteetti 10 °C:ssa ($J/(kgK)$)
ν	= ilman kinemaattinen viskositeetti 10 °C:ssa (m^2/s)

Yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto

TTY:n yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisella tutkimuslaitteistolla voidaan tutkia mm.

- Rakenteiden lämmönläpäisykerrointa (U-arvoa)
- Lämpövirran siirtymistä tutkittavan rakenteen läpi
- Sisäisen konvektion vaikutusta lämpötilakenttiin ja U-arvoon erilaisissa tilanteissa

Tutkimusaukon pinta-ala on n. 5 m² ja laitteistolla voidaan tutkia jopa 800 mm paksuja rakenteita.



Rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto, joka käyttää calibrated hot box -menetelmää.

Yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto

Laitteisto toimii Calibrated hot box -menetelmällä, jossa tutkittava rakenne asennetaan tutkimusaukkoon, joka on lämpimän ja kylmän kammion välissä.

Lämmin kammio mallintaa sisäilman olosuhteita (+20 °C) ja kylmä kammio ulkoilman olosuhteita (esim. 0...-15°C, ilmavirran nopeus rakenteen pinnalla säädettävissä)

Mitattavat suureet:

- Lämpötila (sisä- ja ulkoilma, rakenteen sisä- ja ulkopinta, lämpötilakentät rakenteen sisällä)
- Suhteellinen kosteus sisä- ja ulkoilmasta
- Ilmavirran nopeus rakenteen sisä- ja ulkopinnalla



Sisäisen konvektion tutkimustarve

Vuosina 2009-2012 käynnissä olleessa FRAME-projektissa tutkittiin mm. puhallusvillaeristeissä tapahtuvaa sisäistä konvektiota.

FRAME:n myötä syntyi tarve jatkotutkimukselle, jossa haluttiin tutkia

- tutkimusaukon suuremman koon
- eristeiden asennusmenetelmän
- kattoristikoiden

vaikutusta tuloksiin.

COMBI:ssa lähdettiin selvittämään näitä kysymyksiä.

FRAME:n kokeista poiketen COMBI:n kokeissa puhallusvillat asennettiin tutkimusaukkoon puhallusvillan puhalluskoneella, jotta asennus vastaisi paremmin normaalia asennustilannetta. FRAME:ssa asennus tehtiin käsin ripottelemalla. Eristeiden koostumuksessa eri asennusmenetelmien välillä oli silminnähden havaittava ero.

FRAME:ssa tutkimusaukon koko oli 1,44 m², COMBI:ssa n. 5 m². Suuremmalla tutkimusaukolla reunojen osuus ei tule yhtä merkittäväksi ja ilmiöt pääsevät tapahtumaan eristeen sisällä todenmukaisemmin.

Pelkän eristekerroksen omaavien yläpohjien lisäksi tutkimukseen otettiin mukaan myös yläpohjia, joissa oli kattoristikot.

COMBI:n yläpohjakokeissa tutkitut tilanteet

Yläpohjakokeissa on tutkittu puhallusvillaeristeisiä yläpohjia.

Muuttujina ovat olleet seuraavat suureet:

- Puhallusvillat: Puukuitu- ja lasipuhallusvilla
- Eristepaksuudet: 300 mm ja 600 mm
- Lämpötilaero: 20 °C ja 35 °C
- Tuuletusilmavirta:
 - 300 mm:n eristepaksuudella vain ~0 m/s
 - 600 mm: eristepaksuudella ~0 m/s ja ~0,6 m/s
- Kattoristikot: pelkkä eristekerros ja eristekerros + kattoristikot k900-jaolla

Koe	Eriste	Paksuus (mm)	Lämpötilaero (°C)	ilmavirtaus (m/s)	ristikot
1	Puukuitu	300	20	~0	Kyllä
2	Puukuitu	300	35	~0	Kyllä
3	Puukuitu	600	20	~0	Kyllä
4	Puukuitu	600	20	~0,6	Kyllä
5	Puukuitu	600	35	~0	Kyllä
6	Puukuitu	600	35	~0,6	Kyllä
7	Puukuitu	300	20	~0	ei
8	Puukuitu	300	35	~0	ei
9	Puukuitu	600	20	~0	ei
10	Puukuitu	600	20	~0,6	ei
11	Puukuitu	600	35	~0	ei
12	Puukuitu	600	35	~0,6	ei
13	Lasivilla	300	20	~0	Kyllä
14	Lasivilla	300	35	~0	Kyllä
15	Lasivilla	600	20	~0	Kyllä
16	Lasivilla	600	20	~0,6	Kyllä
17	Lasivilla	600	35	~0	Kyllä
18	Lasivilla	600	35	~0,6	Kyllä
19	Lasivilla	300	20	~0	ei
20	Lasivilla	300	35	~0	ei
21	Lasivilla	600	20	~0	ei
22	Lasivilla	600	20	~0,6	ei
23	Lasivilla	600	35	~0	ei
24	Lasivilla	600	35	~0,6	ei



600 mm kerros puukuitupuhallusvillaa puhallettuna tutkimusaukkoon rakenteessa, jossa on kattoristikot

COMBI:n yläpohjakokeet



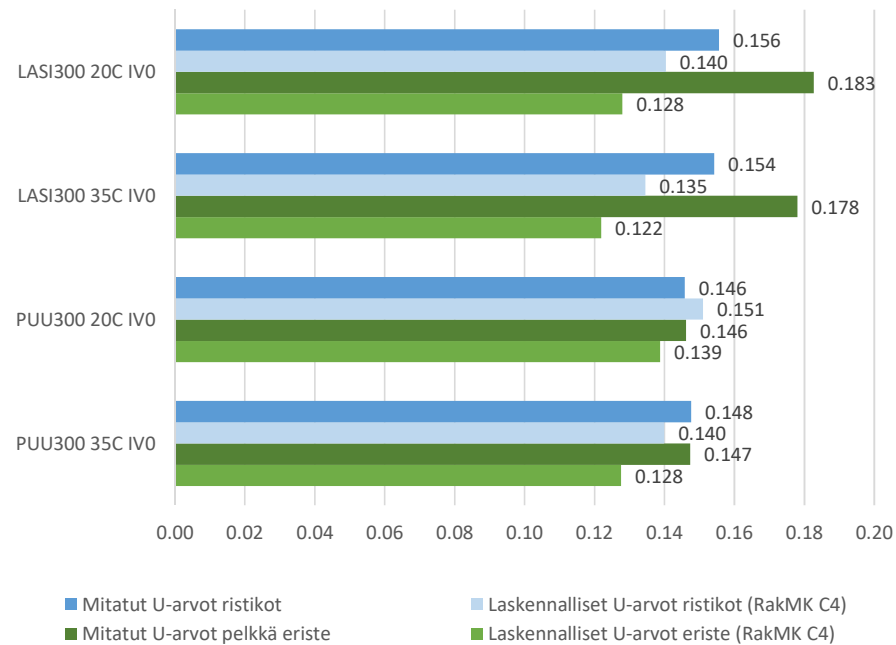
600 mm rakenteen kalibrointitilanne.



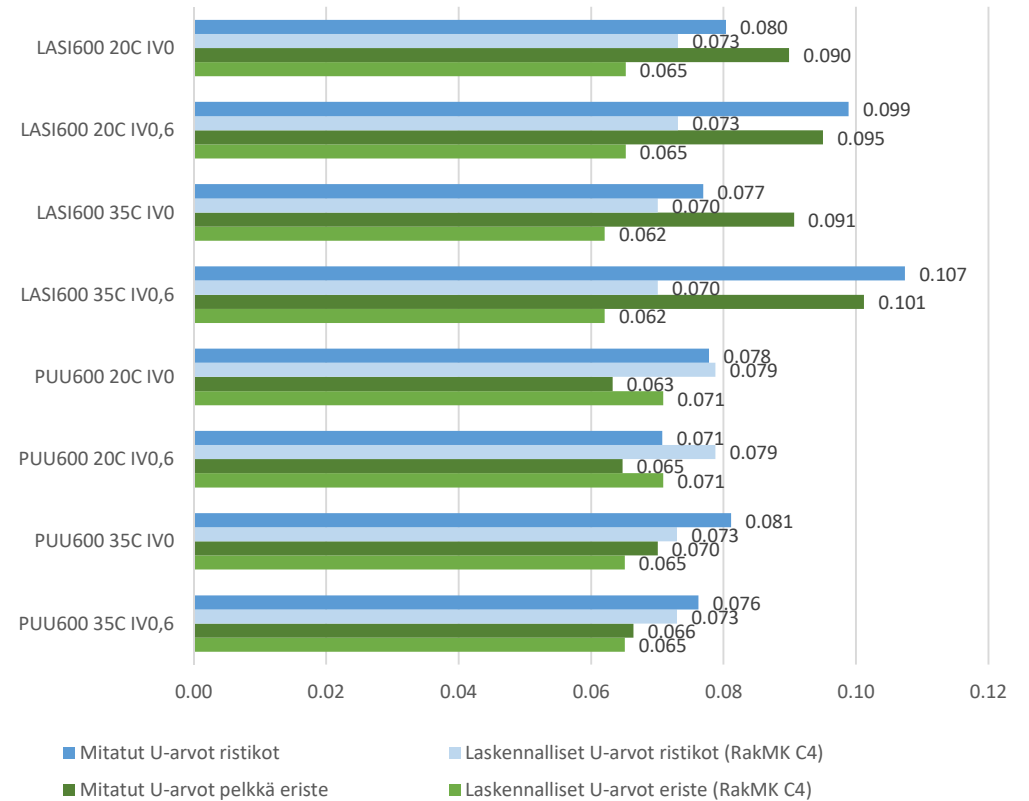
Kattoristikollisen koerakenteen valmistelu ja antureiden asentaminen paikoilleen.

U-arvot

U-arvojen vertailuarvot ilman sisäistä konvektiota on laskettu RakMK C4 luonnososan (2012) mukaan ilman korjauskertoimia. Koetilanteen nimessä on ilmoitettu eristeen tyyppi, mittauksessa käytetty lämpötilaero ja tuuletusilmavirran nopeus.



300 mm koetilanteiden U-arvot



600 mm koetilanteiden U-arvot

Nusseltin luvut

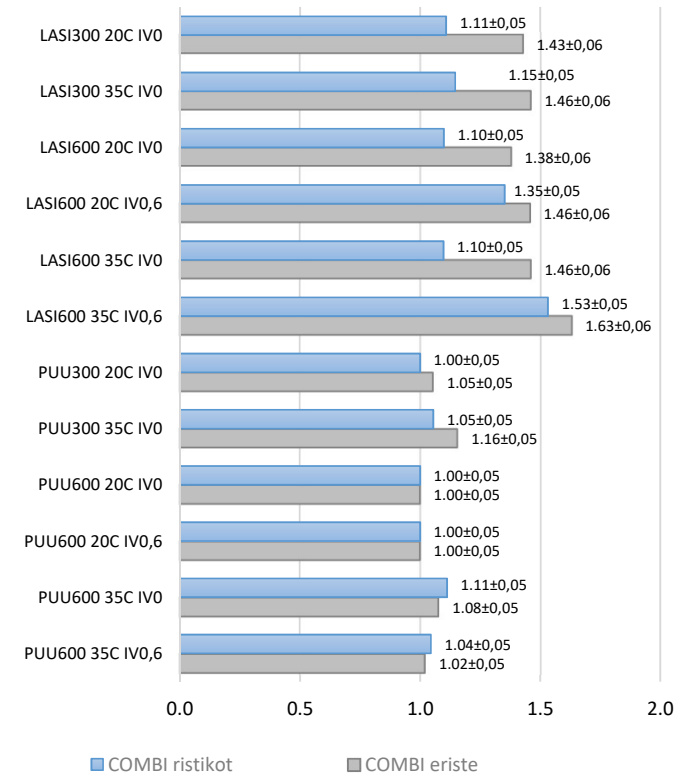
Nusseltin luku kuvaa sisäisen konvektion tapahtumista. Nusseltin luvun ollessa yli 1 rakenteessa tapahtuu sisäistä konvektiota.

Taulukossa on esitetty eri koevaiheissa saadut Nusseltin luvut.

Puukuitueristeellä 20 °C:een lämpötilaerolla konvektiolla ei ollut juurikaan vaikutusta rakenteen läpi siirtyvään lämpövirtaan. 35 °C:een lämpötilaerolla konvektio lisäsi lämpövirtaa korkeimmillaan 16±5 %.

Lasipuhallusvillalla runsaasti tuuletetussa tilanteessa ilmavirtaus pääsee voimistamaan sisäistä konvektiota moninkertaiseksi paksulla eristekerroksella. Puukuitueristeellä ei ole havaittavissa samanlaista reaktiota.

Lasipuhallusvillalla eristetyissä yläpohjissa lämpövirta rakenteen läpi lisääntyi suurimmillaan jopa 63 %. Lasipuhallusvillalla mielenkiintoisena yksityiskohtana voidaan myös huomata, että kattoristikoiden lisääminen rakenteeseen pienensi useimmissa tapauksissa ilmavirtauksen vaikutuksia.



COMBI-kokeissa mitatut Nusseltin luvut eri koetilanteissa.

Yksittäisten tekijöiden vaikutus sisäiseen konvektioon

Kattoristikoiden vaikutus

- Puukuitu
 - Vain 600 mm eristepaksuudella 35 °C lämpötilaerolla ristikot lisäävät hieman sisäistä konvektiota. Muissa tapauksissa konvektiota ei tapahdu tai se jopa vähenee ristikoiden vaikutuksesta
- Lasivilla
 - Pienellä ilmavirtauksella ristikoiden poistamisen vaikutus näkyy suuremmin kuin suurella ilmavirtauksella.

Puukuitu						
Paksuus (mm)	Lämpötilaero (°C)	ilmavirtaus (m/s)	ristikot	U (W/(m2K))	Nu (-)	Vaikutus %-yksikköä
300	20	~0	Kyllä	0,1457	1,00	-5,4
300	20	~0	ei	0,1461	1,05	
300	35	~0	Kyllä	0,1476	1,05	-10,0
300	35	~0	ei	0,1473	1,16	
600	20	~0	Kyllä	0,0778	1,00	0,0
600	20	~0	ei	0,0632	1,00	
600	35	~0	Kyllä	0,0812	1,11	3,5
600	35	~0	ei	0,0701	1,08	
600	20	~0,6	Kyllä	0,0708	1,00	0,0
600	20	~0,6	ei	0,0647	1,00	
600	35	~0,6	Kyllä	0,0762	1,04	2,4
600	35	~0,6	ei	0,0664	1,02	
Lasivilla						
300	20	~0	Kyllä	0,1555	1,11	-31,9
300	20	~0	ei	0,1827	1,43	
300	35	~0	Kyllä	0,1541	1,15	-31,4
300	35	~0	ei	0,1780	1,46	
600	20	~0	Kyllä	0,0804	1,10	-28,0
600	20	~0	ei	0,0899	1,38	
600	35	~0	Kyllä	0,0769	1,10	-36,3
600	35	~0	ei	0,0906	1,46	
600	20	~0,6	Kyllä	0,0989	1,35	-10,5
600	20	~0,6	ei	0,0950	1,46	
600	35	~0,6	Kyllä	0,1074	1,53	-9,8
600	35	~0,6	ei	0,1012	1,63	

Kattoristikoiden vaikutus sisäiseen konvektioon. Taulukko on koostettu siten, että vertailtavien tilanteiden kesken vain kattoristikot muuttuvat ja muut muuttujat pysyvät samoina.

Yksittäisten tekijöiden vaikutus sisäiseen konvektioon

Lämpötilaeron kasvattamisen vaikutus

- Puukuitu
 - Lämpötilaeron kasvattaminen kasvattaa sisäistä konvektiota 2,1–11,2 %-yksikköä
- Lasivilla
 - Pienemmällä ilmavirtauksella lämpötilaeron kasvattaminen kasvattaa myös sisäistä konvektiota hieman, mutta mittaustarkkuuden rajoissa tällä ei ole suurta merkitystä.
 - Suuremmalla ilmavirtauksella lämpötilaeron kasvattaminen kasvattaa sisäistä konvektiota jopa 17,3–18,0 %-yksikköä

Puukuitu						
Paksuus (mm)	Lämpötilaero (°C)	ilmavirtaus (m/s)	ristikot	U (W/(m ² K))	Nu (-)	Vaikutus %-yksikköä
300	20	~0	Kyllä	0,1457	1,00	
300	35	~0	Kyllä	0,1476	1,05	5,5
300	20	~0	ei	0,1461	1,05	
300	35	~0	ei	0,1473	1,16	10,1
600	20	~0	Kyllä	0,0778	1,00	
600	35	~0	Kyllä	0,0812	1,11	11,2
600	20	~0	ei	0,0632	1,00	
600	35	~0	ei	0,0701	1,08	7,7
600	20	~0,6	Kyllä	0,0708	1,00	
600	35	~0,6	Kyllä	0,0762	1,04	4,4
600	20	~0,6	ei	0,0647	1,00	
600	35	~0,6	ei	0,0664	1,02	2,1
Lasivilla						
300	20	~0	Kyllä	0,1555	1,11	
300	35	~0	Kyllä	0,1541	1,15	3,8
300	20	~0	ei	0,1827	1,43	
300	35	~0	ei	0,1780	1,46	3,3
600	20	~0	Kyllä	0,0804	1,10	
600	35	~0	Kyllä	0,0769	1,10	-0,2
600	20	~0	ei	0,0899	1,38	
600	35	~0	ei	0,0906	1,46	8,2
600	20	~0,6	Kyllä	0,0989	1,35	
600	35	~0,6	Kyllä	0,1074	1,53	18,0
600	20	~0,6	ei	0,0950	1,46	
600	35	~0,6	ei	0,1012	1,63	17,3

Lämpötilaeron kasvattamisen vaikutus sisäiseen konvektioon. Taulukko on koostettu siten, että vertailtavien tilanteiden kesken vain lämpötilaero muuttuu ja muut muuttujat pysyvät samoina.

Yksittäisten tekijöiden vaikutus sisäiseen konvektioon

Ilmavirtauksen vaikutus

- Puukuitu
 - 20 °C lämpötilaerolla ilmavirtauksen lisäämisellä ei ollut vaikutusta
 - 35 °C lämpötilaerolla ilmavirtauksen lisäys jopa heikensi konvektiota. Kuitenkin mittaustarkkuuden rajoissa voidaan todeta, että ilmavirtauksella ei juurikaan ollut vaikutusta puukuitueristeen tapauksissa.
- Lasivilla
 - Ristikoiden kanssa sisäinen konvektio kasvoi suuresti ilmavirtauksen noustessa
 - Ilman ristikoiota sisäinen konvektio kasvoi, mutta hieman maltillisemmin kuin rakenteella, jossa oli ristikot

Tuloksia tarkastellessa on huomiotava, että ilmavirtauksia ei saatu pysymään täysin samoina vertailtavien kokeiden välillä, mikä tuo hieman epävarmuutta suoraan vertailtaviin tuloksiin.

Puukuitu						
Paksuus (mm)	Lämpötilaero (°C)	ilmavirtaus (m/s)	ristikot	U (W/(m2K))	Nu (-)	Vaikutus %-yksikköä
600	20	~0	Kyllä	0,0778	1,00	
600	20	~0,6	Kyllä	0,0708	1,00	0,0
600	20	~0	ei	0,0632	1,00	
600	20	~0,6	ei	0,0647	1,00	0,0
600	35	~0	Kyllä	0,0812	1,11	
600	35	~0,6	Kyllä	0,0762	1,04	-6,8
600	35	~0	ei	0,0701	1,08	
600	35	~0,6	ei	0,0664	1,02	-5,6
Lasivilla						
600	20	~0	Kyllä	0,0804	1,10	
600	20	~0,6	Kyllä	0,0989	1,35	25,3
600	20	~0	ei	0,0899	1,38	
600	20	~0,6	ei	0,0950	1,46	7,9
600	35	~0	Kyllä	0,0769	1,10	
600	35	~0,6	Kyllä	0,1074	1,53	43,5
600	35	~0	ei	0,0906	1,46	
600	35	~0,6	ei	0,1012	1,63	17,0

Lämpötilaeron kasvattamisen vaikutus sisäiseen konvektioon.

Eristepaksuuden vaikutus

- Mittaustarkkuuden rajoissa eristepaksuudella (300/600 mm) ei näyttäisi olevan suurta vaikutusta sisäiseen konvektioon kummankaan eristeen tapauksissa.

Taulukot on koostettu siten, että vertailtavien tilanteiden kesken vain vertailusuure muuttuu ja muut muuttujat pysyivät samoina.

Puukuitu						
Paksuus (mm)	Lämpötilaero (°C)	ilmavirtaus (m/s)	ristikot	U (W/(m2K))	Nu (-)	Vaikutus %-yksikköä
300	20	~0	Kyllä	0,1457	1,00	
600	20	~0	Kyllä	0,0778	1,00	0,0
300	20	~0	ei	0,1461	1,05	
600	20	~0	ei	0,0632	1,00	-5,4
300	35	~0	Kyllä	0,1476	1,05	
600	35	~0	Kyllä	0,0812	1,11	5,7
300	35	~0	ei	0,1473	1,16	
600	35	~0	ei	0,0701	1,08	-7,8
Lasivilla						
300	20	~0	Kyllä	0,1555	1,11	
600	20	~0	Kyllä	0,0804	1,10	-0,9
300	20	~0	ei	0,1827	1,43	
600	20	~0	ei	0,0899	1,38	-4,9
300	35	~0	Kyllä	0,1541	1,15	
600	35	~0	Kyllä	0,0769	1,10	-4,9
300	35	~0	ei	0,1780	1,46	
600	35	~0	ei	0,0906	1,46	0,0

Eristepaksuuden vaikutus sisäiseen konvektioon.

Yksittäisten tekijöiden vaikutus sisäiseen konvektioon

Eristelaadun vaikutus rakenteen sisäiseen konvektioon

- Lasivillalla sisäinen konvektio oli kaikissa muissa tapauksissa suurempaa kuin puukuitueristeellä paitsi 35 °C lämpötilaerolla pienellä ilmavirtauksella.
- Suurimmat erot ovat nähtävissä tapauksissa, joissa ei ole ristikoita sekä paksumman eristekerroksen tapauksissa.

Eriste- tyyppi	Paksuus (mm)	Lämpötilaero (°C)	ilmavirtaus (m/s)	ristikot	U (W/(m2K))	Nu (-)	Vaikutus %- yksikköä
Puukuitu	300	20	~0	Kyllä	0,1457	1,00	
Lasivilla	300	20	~0	Kyllä	0,1555	1,11	10,8
Puukuitu	300	20	~0	ei	0,1461	1,05	
Lasivilla	300	20	~0	ei	0,1827	1,43	37,4
Puukuitu	300	35	~0	Kyllä	0,1476	1,05	
Lasivilla	300	35	~0	Kyllä	0,1541	1,15	9,1
Puukuitu	300	35	~0	ei	0,1473	1,16	
Lasivilla	300	35	~0	ei	0,1780	1,46	30,5
Puukuitu	600	20	~0	Kyllä	0,0778	1,00	
Lasivilla	600	20	~0	Kyllä	0,0804	1,10	9,9
Puukuitu	600	35	~0	Kyllä	0,0812	1,11	
Lasivilla	600	35	~0	Kyllä	0,0769	1,10	-1,5
Puukuitu	600	20	~0	ei	0,0632	1,00	
Lasivilla	600	20	~0	ei	0,0899	1,38	37,9
Puukuitu	600	35	~0	ei	0,0701	1,08	
Lasivilla	600	35	~0	ei	0,0906	1,46	38,4
Puukuitu	600	20	~0,6	Kyllä	0,0708	1,00	
Lasivilla	600	20	~0,6	Kyllä	0,0989	1,35	35,2
Puukuitu	600	35	~0,6	Kyllä	0,0762	1,04	
Lasivilla	600	35	~0,6	Kyllä	0,1074	1,53	48,8
Puukuitu	600	20	~0,6	ei	0,0647	1,00	
Lasivilla	600	20	~0,6	ei	0,0950	1,46	45,7
Puukuitu	600	35	~0,6	ei	0,0664	1,02	
Lasivilla	600	35	~0,6	ei	0,1012	1,63	61,0

Eristelaadun vaikutus rakenteen sisäiseen konvektioon.

Koetuloksiin vaikuttaneita tekijöitä

Kokeet on pyritty suorittamaan mahdollisimman tarkasti samalla tavoin toisiinsa vertailtavissa koetilanteissa. Tästä huolimatta koetuloksiin sisältyy aina paljon kokeisiin mahdollisesti vaikuttaneita epävarmuustekijöitä, kuten

- Hieman erilaiset lopulliset eristeiden tiheydet
 - Mahdolliset laitteiston kolauttelemiset/siirtymiset koetilanteita valmisteltaessa
 - Eri henkilöiden työtavat
- Kaikissa keskenään vertailtavassa kokeissa eristekerroksen pinnalla vaikuttavan ilmavirran nopeutta ei pystytty kokoajan pitämään täysin samana
- Keskenään vertailtavien tilanteiden kylmän kammion lämpötilat eivät aina olleet tarkalleen samat, vaikka pakkahuoneen ohjaus oli säädetty samaan arvoon. Tätä eroa korjattiin laskennallisesti.

Laskennalliset epävarmuudet eri koetilanteiden läpi siirtyvälle lämpövirralle, koerakenteen läpi siirtyneelle lämpövirralle, U-arvoille ja Nusseltin luvuille on esitetty taulukossa.

Test	ϕ_{srt} (%)	U_{srt} (%)	Nu (%)	ϕ_{srt} (W)	U_{srt} (W/mK)	Nu (-)
Ristikot						
PUU300 20C IVO	±2.5	±5.1	±4.9	±0.0071	±0.34	±0.047
PUU300 35C IVO	±2.4	±4.8	±4.6	±0.0067	±0.57	±0.048
PUU600 20C IVO	±2.4	±5.0	±4.9	±0.0038	±0.19	±0.048
PUU600 20C IVO,6	±2.6	±5.4	±5.3	±0.0038	±0.18	±0.048
PUU600 35C IVO	±2.1	±4.3	±4.3	±0.0035	±0.30	±0.047
PUU600 35C IVO,6	±2.3	±4.5	±4.5	±0.0034	±0.30	±0.047
LASI300 20C IVO	±2.4	±4.7	±4.6	±0.0072	±0.35	±0.051
LASI300 35C IVO	±2.3	±4.6	±4.4	±0.0068	±0.58	±0.050
LASI600 20C IVO	±2.4	±4.8	±4.7	±0.0038	±0.19	±0.052
LASI600 20C IVO,6	±2.0	±4.0	±4.0	±0.0040	±0.19	±0.054
LASI600 35C IVO	±2.3	±4.6	±4.5	±0.0034	±0.30	±0.049
LASI600 35C IVO,6	±1.7	±3.3	±3.3	±0.0036	±0.31	±0.051
Pelkkä eriste						
PUU300 20C IVO	±2.5	±5.1	±4.9	±0.0071	±0.34	±0.051
PUU300 35C IVO	±2.4	±4.8	±4.6	±0.0067	±0.57	±0.053
PUU600 20C IVO	±2.9	±5.7	±5.8	±0.0037	±0.18	±0.052
PUU600 20C IVO,6	±2.8	±5.9	±5.7	±0.0037	±0.18	±0.052
PUU600 35C IVO	±2.5	±4.1	±4.9	±0.0034	±0.30	±0.053
PUU600 35C IVO,6	±2.6	±4.9	±5.1	±0.0034	±0.30	±0.053
LASI300 20C IVO	±2.1	±4.3	±4.1	±0.0075	±0.36	±0.059
LASI300 35C IVO	±2.1	±4.1	±3.9	±0.0069	±0.59	±0.057
LASI600 20C IVO	±2.1	±4.3	±4.3	±0.0039	±0.19	±0.059
LASI600 20C IVO,6	±2.0	±4.1	±4.1	±0.0039	±0.19	±0.060
LASI600 35C IVO	±1.9	±3.9	±3.9	±0.0035	±0.30	±0.056
LASI600 35C IVO,6	±1.7	±3.5	±3.5	±0.0035	±0.30	±0.057

Johtopäätöksiä

- Sisäisen konvektion määrä oli suurempi lasipuhallusvillaeristeisissä yläpohjissa kuin puukuitupuhalluseristeellä eristetyissä yläpohjissa.
- Erityisesti lasipuhallusvillassa tapahtuu konvektiota jo 20 °C:een lämpötilaerolla.
- Puhallusvillan rakenne (mm. tiheys ja ilmanläpäisevyys) vaikuttavat paljon sisäisen konvektion syntymiseen. Tiheällä puukuitupuhallusvillalla (~36–40 kg/m³) ei havaittu yhtä suurta sisäistä konvektiota kuin harvemmillä lasipuhallusvillalla (~25 kg/m³).
- Lasipuhallusvillalla runsas tuuletus pääsee voimistamaan sisäistä konvektiota moninkertaiseksi, mikä pitäisi ottaa huomioon rakenteiden suunnittelussa joko energiankulutuksen laskennassa tai pienentämällä ilmavirtausta eristekerroksen pinnalla.
- Puukuitueristeellä suurin yksittäinen sisäistä konvektiota kasvattava tekijä oli lämpötilaeron kasvattaminen. Lasipuhallusvillalla suurimmat yksittäisen muuttujan vaikutukset saatiin ilmavirtauksen kasvattamisella ja poistamalla kattoristikot. Lämmöneristekerroksen paksuudella ei vaikuttanut olevan mittaustarkkuuden rajoissa yhtä merkittävää vaikutusta.
- Lasipuhallusvillalla mielenkiintoisena yksityiskohtana voidaan myös huomata, että kattoristikoiden lisääminen rakenteeseen pienensi useimmissa tapauksissa ilmavirtauksen vaikutuksia.
- Lämmöneristekerroksen sisällä tehtyjen lämpötilamittausten perusteella konvektiovirtaukset painuvat alaspäin laitteiston reunoilla ja nousevat ylöspäin eristekerroksen keskiosilla.

Lähteet

FRAME-kokeet:

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. 354 s. + 43 liites.

Pakkanen, T. 2012. **Sisäisen konvektion vaikutus yläpohjan lämmöneristävyyteen**. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. 64 s. + 129 liites.

Yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto:

Kivioja, H. 2017. **Tuuletetun kertopuurakenteisen kattoelementin lämpötekni­sen toiminnan tutkiminen calibrated hot box – menetelmällä**. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. 93 s. + 27 liites.

Kiitos!

Lisätietoja esityksen sisällöstä

Henna Kivioja	Tampereen teknillinen yliopisto		040 842 6430
Eero Tuominen	Tampereen teknillinen yliopisto	eero.tuominen@tuni.fi	040 742 1652

COMBI-tuloskortti: Sisäisen konvektion vaikutus puhallusvillaeristeisissä yläpohjissa
Kansainvälinen artikkeli: Kivioja, H. & Vinha, J. 2019. **Hot box measurements to investigate internal convection of highly insulated loose-fill mineral wool roof structures.** *Manuscript writing on process.*

Lisätietoja COMBI-hankkeesta

Juha Vinha	Tampereen teknillinen yliopisto	juha.vinha@tuni.fi	040 849 0296
------------	---------------------------------	--------------------	--------------

<https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/tutkimusprojektit/combi>

Tämän teoksen suhteen noudatetaan lisenssiä Creative Commons Nimeä-JaaSamoin 4.0 Kansainvälinen.
Lisenssiin voit tutustua osoitteessa <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.fi>