



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

HANNA-MAIJA KIANTA
LÄMPÖTILAN VAIKUTUS ERISTEMATERIAALIEN LÄMMÖNJOH-
TAVUUTEEN

Diplomityö

Tarkastaja: professori Juha Vinha
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
30. lokakuuta 2017

TIIVISTELMÄ

HANNA-MAIJA Kianta: Lämpötilan vaikutus eristemateriaalien lämmönjohtavuuteen

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 60 sivua, 11 liitesivua

Joulukuu 2017

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Juha Vinha

Avainsanat: lämmönjohtavuus, lämmöneristävyys, lämmöneristemateriaalit

Tutkimuksessa selvitettiin lämpötilan vaikutusta lämmöneristemateriaalien lämmönjohtavuusominaisuuksiin. Tutkimuksen alussa perehdyttiin lämpöön ja erityisesti lämmönjohtavuuteen fysikaalisina ilmiöinä. Siinä myös esiteltiin lämmöneristemateriaaleja ja niiden valmistustapoja.

Tutkimus keskittyi Suomessa tyypillisesti käytettävien rakennusmateriaalien lämmönjohtavuusmittauksiin -30 °C – $+30\text{ °C}$ lämpötiloissa. Lopuksi pohdittiin tulosten hyödyntämismahdollisuuksia käytännössä ja laskettiin esimerkkejä kuvitteellisen varastotilan lämmöneristävydestä ja energiankulutuksesta eri olosuhteissa.

Mittauksissa havaittiin, että paikallaan seisovan ilman eristävyteen perustuvien lämmöneristemateriaalien lämmönjohtavuus kasvoi jotakuinkin lineaarisesti lämpötilan noustessa. Sen sijaan pentaanin eristävyysominaisuuksiin perustuvien eristeiden lämmönjohtavuus heikkeni sekä kylmissä että kuumissa lämpötiloissa. Niiden eristävyys vaikutti olevan parhaimmillaan $+5\text{ °C}$:n lämpötilassa.

Tutkimustuloksia havainnollistettiin laskuesimerkein. Esimerkissä tutkittiin ilmaa sisältävää EPS-eristettä ja pentaania sisältävää PIR-eristettä. Esimerkissä havaittiin, että varastorakennuksessa, jonka seinäeristeet ovat -20 °C lämpötilassa ja seinät on eristetty EPS-eristeellä, energiankulutus on noin 10 % pienempi kuin tyypillisesti laskennassa käytettyjä arvoja käyttäen. Sen sijaan PIR-eristeisen tilan energiankulutus oli 17 % suurempi.

ABSTRACT

HANNA-MAIJA KIANITA: The effect of temperature on the thermal conductivity of insulation materials

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 60 pages, 11 Appendix pages

December 2017

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural design

Examiner: Professor Juha Vinha

Keywords: thermal conductivity, thermal insulation, insulation materials

This research investigated the dependence between temperature and thermal conductivity in thermal insulation materials. This research began with the introduction of heat and especially thermal conductivity as a physical phenomenon. In addition to this, there was an introduction of thermal insulation materials and their manufacturing process.

The focus of research was measuring thermal conductivity of insulation materials. The chosen insulation materials are typically used in Finland. The measurements were made in temperatures between $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$. After the measurements were made, some examples of how the results could be used in real life were considered and examples of insulation and energy consumption in an imaginary room were calculated.

The key observation was that thermal conductivity of air-based insulation materials increases linearly as the temperature increases. Thermal conductivity of pentane-based materials rises in high and low temperatures. It seems that their properties are at best level when the temperature is approximately $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

The calculation examples investigated sandwich-panels with EPS or PIR core. The example showed that compared to the values typically used in calculation, in $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ energy consumption was approximately 10 % lower when used EPS insulation and 17 % higher when used PIR insulation.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on laadittu ThermiSolilla vuosien 2016 ja 2017 aikana. TTY:llä työn ohjaajana on toiminut Juha Vinha.

Haluan kiittää kaikkia prosessiin osallistuneita. Erityisesti kiitän Veliä ja Tapiota, luottamuksesta, kärsivällisyydestä, sekä kriittisistä kommentteista. Nikolle kiitokset vaivannäöstä mittausten suorittamisessa ja tietysti kotiväelle kannustuksesta kirjoitusprosessin aikana.

Työn tekeminen oli mielenkiintoinen ja opettavainen prosessi. Lähdemateriaalin ja mittalaitteiden löytäminen oli haastavaa, mutta toisaalta vähäinen taustatieto auttoi pitämään työn tekemisen mielenkiintoisena alusta loppuun asti.

Tampereella, 27.11.2017

Hanna-Maija Kianta

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Tutkimuksen tausta	1
1.2	Tutkimuksen vaikutus energiankulutuksessa	1
1.3	Tutkimuksen suorittaminen	2
2.	LÄMPÖ	3
2.1	Termodynamiikan pääsäännöt	3
2.2	Lämmön siirtyminen	4
2.2.1	Yleistä	4
2.2.2	Johtuminen	5
2.2.3	Konvektio	6
2.2.4	Säteily	7
2.3	Lämmönjohtavuus	8
2.4	Lämmönläpäisykerroin	9
2.5	Kosteuden vaikutus lämmönjohtavuuteen	11
3.	LÄMMÖNERISTEIDEN OMINAISUUDET	12
3.1	EPS	12
3.2	XPS	13
3.3	Polyuretaanieristeet	14
3.4	Fenolieristeet	16
3.5	Mineraalivillat	17
3.6	Puukuitueristeet	19
3.7	Muut lämmöneristemateriaalit	20
3.8	Eristävät aineet	21
3.9	Aiemmat tutkimukset	23
4.	MITTAUKSET	25
4.1	Tutkittavat materiaalit	25
4.2	Mittausten suorittaminen	26
4.3	Mittalaitteet	27
4.3.1	Lämpövirtalevyalaite	27
4.3.2	Kuumalevyalaite	28
4.4	Virhelähteet	29
4.5	Näytteet	30
4.6	Tutkimuksen rajaukset	33
5.	TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU	35
5.1	Valmistajan ilmoittama lämmönjohtavuus	35
5.2	Vertailukäyrä	36
5.3	Mittaustulokset	38
5.3.1	Mittaustulosten yhteenveto	38
5.3.2	EPS- ja XPS-eristeet	41

5.3.3	PIR- ja fenolieristeet	43
5.3.4	Mineraalivilla ja puukuitueriste	45
5.4	Tulosten yhteenveto ja materiaalien välinen vertailu.....	46
6.	TULOSTEN SOVELTAMINEN KÄYTÄNTÖÖN.....	48
6.1	Tutkittava rakenne.....	48
6.2	Lämpötilan muutoksen vaikutus rakenteen U-arvoon	48
6.3	Lämmönjohtavuuden muutoksen vaikutus energiankulutukseen	53
6.4	U-arvon ja lämpötilan vaikutus rakennepaksuuteen	53
7.	YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT	55
7.1	Teoria	55
7.2	Mittaukset.....	55
7.3	Tulosten soveltaminen käytäntöön.....	56
7.4	Tutkimuksen tarkastelu ja jatkotutkimusehdotukset.....	56
	LÄHTEET.....	58

LIITE A: MITTAUSTULOKSET THERMISOL

LIITE B: TUTKIMUSRAPORTTI LNE

LYHENTEET JA MERKINNÄT

EPS	engl. expanded polystyrene, paisutettu polystyreeni, lämmöneristemateriaali	
LNE	Laboratoire national de métrologie et d'essais	
MW	engl. mineral wool, mineraalivilla, lämmöneristemateriaali, mineraalivillalla tarkoitetaan kivi- ja lasivillaa	
PF	engl. phenolic foam, fenolieriste, lämmöneristemateriaali	
PIR	engl. polyisocyanurate foam, polyuretaani, lämmöneristemateriaali	
PUR	engl. rigid polyurethane foam, polyuretaani, lämmöneristemateriaali	
U-arvo	lämmönläpäisykerroin	
XPS	engl. extruded polystyrene, suulakepuristettu polystyreeni, lämmöneristemateriaali	
κ	lämmöneristeen ilmanläpäisevyys	$\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$
η	ilman dynaaminen viskositeetti 10 °C lämpötilassa	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
λ	lämmönjohtavuus	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
λ_{10}	lämmönjohtavuus 10 °C lämpötilassa	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
λ_D	materiaalivalmistajan ilmoittama lämmönjohtavuus	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
λ_U	lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
Φ	lämpövirran suuruus	W
d	rakennepaksuus	m
h_c	konvektion lämmönsiirtokerroin	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
k	kerroin $3\cdot 10^6$	-
q	lämpövirran tiheys	W/m^2
A	pinta-ala	m^2
Q	lämpöenergia	J
R	ainekerroksen lämmönvastus	$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$
R_{si}	sisäpuolen pintavastus	$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$
R_{se}	ulkopuolen pintavastus	$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$
R_T	rakennusosan kokonaislämmönvastus	$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$
Ra_m	muunnettu Rayleighin luku	-
T	lämpötila	K tai $^{\circ}\text{C}$
ΔT	lämpötilaero	K tai $^{\circ}\text{C}$
U	lämmönläpäisykerroin (rakennusfysiikassa)	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
	sisäenergia (termodynamiikassa)	J
U_c	korjattu lämmönläpäisykerroin	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
ΔU	sisäenergian muutos	J
W	työ	J

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Tässä tutkimuksessa selvitetään lämpötilan vaikutusta lämmöneristemateriaalien lämmönjohtavuusominaisuuksiin. Tyypillisesti lämmöneristeiden lämmönjohtavuusominaisuuksia tarkastellaan +10 °C lämpötilassa ja esimerkiksi lämmöneristevalmistajien eristeilleen ilmoittamat lämmöneristävyysominaisuudet määritetään +10 °C keskilämpötilassa tehtyjen mittausten perusteella. Vuodenaikojen vaihtelut altistavat kuitenkin rakennuksen ulkovaipan monenlaisiin lämpötiloihin, minkä vuoksi rakenteiden käyttäytyminen tulee tuntee myös kylminä talvipäivinä ja kuumina kesäpäivinä. Lisäksi monissa erityissovelluksissa lämmöneristeet voivat olla merkittävästi tyypillistä mittauslämpötilaa lämpimämmissä tai viileämmissä olosuhteissa. Esimerkiksi pakkasvarastoissa varastotilojen lämpötila voi olla hyvinkin kylmä ja toisaalta lämmitetyissä tiloissa lämpötilat voivat nousta erityisesti kesäisin huomattavan korkeiksi.

Tutkimuksen lähtökohtana on havainto materiaalien lämmönjohtavuuden muuttumisesta lämpötilan muuttuessa. Tarkoituksena on selvittää ovatko muutokset merkittäviä ja onko niillä vaikutusta esimerkiksi tarvittaviin eristepaksuuksiin ja mikä niiden vaikutus on rakennusten energiankulutukseen.

Työn tilannut yritys, ThermiSol Oy, on havainnut aiemmin tekemiensä tutkimusten ja käytännön kokemusten perusteella, että paisutetusta polystyreenistä (EPS, engl. expanded polystyrene) valmistettujen lämmöneristeiden lämmöneristävyysominaisuudet paranevat kylmissä lämpötiloissa. Ilmiö on havaittu merkittävimpana erikoiskohteita varten tehdyissä mittauksissa, joissa on tutkittu eristeiden ominaisuuksia noin -150 °C lämpötilassa. Mittauksissa on havaittu, että EPS-eristeen lämmönjohtavuus on noin kolmanneksen sen tyypillisestä, +10 °C lämpötilassa mitatusta lämmönjohtavuudesta. Ilmiö on todettu myös käytännössä, kun pakkasvaraston jäähdytyskoneiston kapasiteetti on ollut ylimitoitettu, koska varaston vaipparakenteen lämmöneristävyys onkin ollut odotettua parempi.

1.2 Tutkimuksen vaikutus energiankulutuksessa

Energiankulutuksen vähentäminen ja käytettävien energiamuotojen muuttaminen kestävä kehityksen mukaisiksi on nykyään yhteiskunnallisesti tärkeä tavoite. Tämä näkyy maailmanlaajuisesti energiansäästöön liittyvinä tavoitteina ja rakennusalaalla esimerkiksi lämmöneristys- ja energiankulutusvaatimusten tiukentumisena. Sen vuoksi lämmöneris-

teiden ominaisuuksia ja niiden hyödyntämismahdollisuuksia tulisi myös pohtia nykyistä tarkemmin.

Noin neljännes Suomessa käytettävästä energiasta kuluu rakennusten lämmittämiseen (Motiva 2017). Tästä syystä rakennusten energiankulutuksen pienennyksellä voidaan saada vähennettyä energian valmistuksesta syntyviä haitallisia päästöjä. Rakennusten energiankulutuksen vähentämisessä lämmöneristäminen on merkittävässä osassa: Lisäämällä eristepaksuuksia saadaan vähennettyä lämmön siirtymistä rakenteiden läpi ulkoilmaan ja maapohjaan.

Tutkijat eivät kuitenkaan ole täysin yksimielisiä siitä, miten eristepaksuuksien kasvattaminen vaikuttaa rakennusten kosteusturvallisuuteen. Tästäkin syystä on hyvä tutkia tarkemmin, voidaanko eristeiden lämmöneristävyysominaisuuksia hyödyntää nykyistä tehokkaammin muilla tavoin, kuin eristepaksuutta lisäämällä.

Tutkimuksen päätavoite on tutkia lämpötilan vaikutusta lämmöneristeiden eristävyysominaisuuksiin. Tutkimus suoritetaan Suomessa tyypillisissä lämpötiloissa ottaen huomioon erityisesti kylmät olosuhteet. Tutkittavat lämmöneristeet ovat Suomessa tällä hetkellä ja tyypillisesti käytettyjä eristemateriaaleja.

1.3 Tutkimuksen suorittaminen

Vaikka lämmönjohtavuuden riippuvuus lämpötilasta on tunnettu ilmiö, lämmöneristeiden käyttäytymisestä eri lämpötiloissa on saatavilla melko vähän julkisia tutkimuksia. Tieto on myös melko hajallaan ja sisältää useimmiten vain osan Suomessa yleisimmin käytettävistä lämmöneristemateriaaleista. Tutkimustietoa materiaalien lämmönjohtavuuksista kylmissä lämpötiloissa on saatavilla melko vähän ja useimmat tutkimukset kattavat vain osan tässä tutkimuksessa selvitetystä materiaaleista ja rajoittuvat korkeampiin lämpötiloihin kuin tämä tutkimus.

Tutkimuksen alku on kirjallisuustutkimus. Loppuosa painottuu kokeellisiin mittauksiin ja niiden tulkitsemiseen. Kirjallisuustutkimuksen luvussa 2 tutustutaan termodynamiikan perusteisiin ja lämmönjohtavuuteen. Lisäksi luvussa 2 tutustutaan aiemmissä tutkimuksissa tehtyihin havaintoihin lämpötilan vaikutuksesta lämmöneristävyysominaisuuksiin. Luvussa 3 tutkitaan lämmöneristemateriaalien valmistusprosesseja ja niiden tärkeimpiä lämmöneristävyysominaisuuksia.

Diplomityö painottuu lämmönjohtavuusmittauksiin ja niiden hyödyntämiseen eri lämpötiloissa. Luvussa 4 esitellään mittausten valmistelu ja suoritustavat, sekä käytettävät mittalaitteet. Luvussa 5 esitellään saadut mittaustulokset. Luvussa 6 hyödynnetään mittaustuloksia laskemalla, mikä on saatujen mittaustulosten vaikutus yksinkertaisen rakenteen lämmönläpäisyominaisuuksiin ja energiankulutukseen. Tutkimuksen lopuksi on yhteenveto tehdyistä havainnoista.

2. LÄMPÖ

2.1 Termodynamiikan pääsäännöt

Termodynamiikassa lämmöllä tarkoitetaan lämpötilaerojen vaikutuksesta johtuvaa energian siirtymistä paikasta toiseen (Law & Rennie 2015). Termodynamiikassa on neljä tärkeää pääsääntöä.

Termodynamiikan nollas pääsääntö määrittää, että kahden samassa lämpötilassa olevan kappaleen välillä vallitsee terminen tasapaino. Jos suljetussa systeemissä oleva kappale C on termisessä tasapainossa kappaleiden A ja B kanssa, täytyy myös kappaleiden A ja B olla keskenään termisessä tasapainossa. Pääsäännön tärkeys ymmärrettiin vasta termodynamiikan muiden pääsääntöjen nimeämisen jälkeen. Tärkeytensä vuoksi sääntö haluttiin sijoittaa ennen muita pääsääntöjä ja se nimettiin nollanneksi säännöksi. (Young & Freedman 2008, pp. 571–572)

Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaan kokonaisenergian määrä on vakio, mutta energia voi muuttaa muotoaan. Yksinkertaiselle suljetulle systeemille voidaan määrittää sisäenergian muutos, joka on systeemiin siirtyneen lämpöenergian ja siirtämiseen tarvittun työn summa. Termodynamiikan ensimmäinen pääsääntö on esitetty kaavassa (2.1). (Young & Freedman 2008, p. 652)

$$\Delta U = Q + W \quad (2.1)$$

jossa

ΔU	on sisäenergian muutos	[J]
Q	on siirtyneen lämpöenergian määrä	[J]
W	on lämmön siirtämiseen käytetty työ	[J]

Sisäenergia on systeemiin varastoitunutta energiaa ja sen absoluuttista määrää ei voida mitata. Systeemin sisäenergian määrä on riippuvainen lämpötilasta T , koska korkeamassa lämpötilassa systeemin atomit värähtelevät tai liikkuvat nopeammin kasvattaen sisäenergian määrää. (Struchtrup 2014, p. 36) Sisäenergian muutoksen laskennassa tulee tietää, kohdistuu työ ja lämpöenergian siirtyminen systeemiin vai pois siitä, jotta voidaan päätellä lisääntyykö vai väheneekö sisäenergian määrä (Young & Freedman 2008, p. 652)

Termodynamiikan toiseen pääsääntöön sisältyy useita termodynamiikassa tärkeitä ilmiöitä.

1. Lämpö siirtyy luonnostaan vain korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Päinvastainen suunta tarvitsee ulkoista työtä.
2. Suljettu systeemi pyrkii kohti suurempaa entropiaa.
3. On mahdotonta suorittaa sellaista prosessia, jossa kaikki lämpö muuttuisi työksi. (Young & Freedman 2008, pp. 682–691)

Entropia on epäjärjestyksestä kuvaava mitattava suure. Kaikki suljetut systeemit pyrkivät kohti suurinta mahdollista epäjärjestyksestä. Tämä ilmenee esimerkiksi lämmön siirtyessä korkeammasta matalampaan: Jos lähtötilanteessa molekyylit on jaoteltu kuumiin ja kylmiin molekyyleihin, lopputilanteessa ne ovat sekoittuneena toisiinsa muodostaen mahdollisimman sekalaisen kokoelman eri lämpöisiä molekyylejä. Samoin esimerkiksi kaasumolekyylit pyrkivät vapaassa tilassa laajenemaan mahdollisimman kauas toisistaan. (Young & Freedman 2008, pp. 682–691)

Absoluuttinen nollapiste (0 K, -273,15 °C) on alin teoreettisesti saavutettava lämpötila, jossa atomien ja molekyyliden energia on minimissään (Law & Rennie 2015). *Termodynamiikan kolmannessa pääsäännössä* määritetään, että absoluuttisen nollapisteen, (0 K lämpötilan) saavuttaminen on mahdotonta, koska kaikki molekyyliden liike ei voi pysähtyä. (Young & Freedman 2008, p. 690)

2.2 Lämmön siirtyminen

2.2.1 Yleistä

Lämpöä siirtyy kolmessa eri muodossa: johtumalla, säteilemällä ja konvektiossa. Huokoisissa lämmöneristeissä tapahtuva lämmön siirtyminen on yleensä yhdistelmä näistä (RIL 255-1-2014 2014, s. 345). Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaisesti lämmön siirtymissuunta ilman ulkoista työtä on korkeammasta lämpötilasta matalampaan.

Siirtyneen lämmön määrä, eli lämpövirran suuruus on yhdistelmä eri siirtymismuodoista. Sitä merkitään tunnuksella Φ [W]. Lämpövirran tiheyttä merkitään kirjaimella q [W/m²]. (Hagentoft 2001, pp. 3–4)

Lämpövirran tiheyttä q voidaan tutkia yksi- tai useampiulotteisessa tapauksessa. Lämpövirran suuntaa osoittava vektori on

$$\mathbf{q} = (q_x, q_y, q_z) \quad (2.2)$$

Lämpövirran tiheyden suuruus on lämpövirran suuntaa osoittavan vektorin pituus. (Hagentoft 2001, s. 6)

$$|\mathbf{q}| = \sqrt{q_x^2 + q_y^2 + q_z^2} \quad (2.3)$$

Lämpövirran suuruus määritetään kaavan (2.4) mukaan eri siirtymismuodolla tapahtuvien lämpövirran tiheyksien ja lämpöä läpäisevän pinta-alan A avulla.

$$\Phi = \mathbf{q} \cdot A \quad (2.4)$$

jossa

A on lämpöä läpäisevä pinta-ala [m²]

2.2.2 Johtuminen

Johtuminen eli konduktio tapahtuu aineessa. Lämpöä siirtyy johtumalla esimerkiksi silloin kun metalliputken päätä kuumennetaan ja hetken kuluttua myös putken toinen pää alkaa kuumentua lämmön siirryttyä johtumalla metalliputkea pitkin kohti putken kylmää päätä. Atomitasolla johtumisilmiössä on kyse siitä, että kuumen pään atomeissa on enemmän liike-energiaa kuin kylmän pään atomeissa ja liike-energia pyrkii tasoittumaan koko kappaleessa samanlaiseksi. Paikallaan olevassa ilmassa tapahtuu hyvin vähän johtumista ja tämän vuoksi monen lämmöneristeen eristävyys perustuu paikallaan olevaan ilmaan. (Young & Freedman 2008, pp. 592–593)

Johtumalla homogeenisessä tai isotrooppisessa materiaalissa tapahtuva lämpövirta noudattaa Fourierin lain mukaista yhtälöä (2.5)

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla T = -\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \lambda \frac{\partial T}{\partial y}, \lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (2.5)$$

missä

λ on lämmönjohtavuus [W/m·K]

T on lämpötila [K] tai [°C]

Yhtälöstä voidaan päätellä, että lämmön siirtymissuunta on suuremmasta lämpötilasta kohti matalampaa, koska se on gradienttiin ∇T nähden vastakkaisuuntainen. (Hagentoft 2001, p. 15)

Tässä tutkimuksessa tutkitaan vain yksiulotteista tapausta, jolloin lämpövirran tiheyden yhtälö yksinkertaistuu muotoon

$$q = q_x = -\lambda \frac{\Delta T}{d} \quad (2.6)$$

missä

ΔT on pintojen välinen lämpötilan muutos [K] tai [°C]
 d on lämpöä läpäisevän ainekerroksen paksuus [m]

Koska lämmönjohtavuus on riippuvainen pintojen välisestä lämpötilaerosta, tulee lämmönjohtavuusmittausten tuloksia käsiteltäessä ilmoittaa käytetty lämpötilaero.

2.2.3 Konvektio

Konvektiossa lämpö siirtyy kaasun tai nesteen virtauksen mukana ja se voi olla pakotettua tai luonnollista. (Young & Freedman 2008, p. 595) Konvektio syntyy lämpötilasta tai ulkoisesta voimasta aiheutuvien ilmanpaine-erojen vaikutuksesta. (Siikanen 2014, s. 34–35)

Rakenteissa tapahtuvaa konvektiota esiintyy avohuokoisissa lämmöneristeissä, kuten villaeristeissä. Suurin osa siitä on pakotetun ja luonnollisen konvektion yhdistelmää. Pehmeiden villojen tulee olla rakenteen sisällä, riittävästi suojattuna, jotta ilma pysyy niiden sisällä paikallaan ja saadaan pienennettyä konvektion vaikutusta lämmöneristävyyteen. (Siikanen 2009 s. 219–220)

Konvektiolla siirtyvä lämpövirran tiheys noudattaa yhtälöä (2.7)

$$q_c = h_c(T_s - T_a) \quad (2.7)$$

jossa

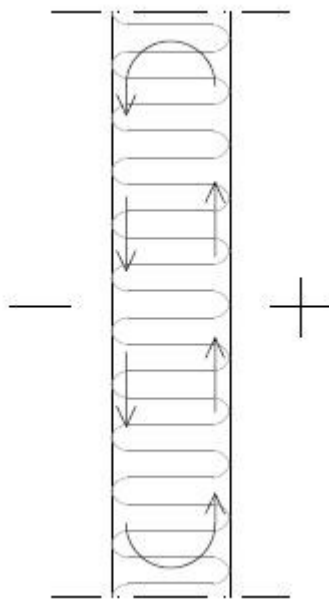
h_c on konvektion lämmönsiirtokerroin [W/(m²K)]
 $T_s - T_a$ on lämpötilaero lämpötilaero pinnan ja ympäröivän ilman välillä [K] tai [°C]

Konvektion lämmönsiirtokerroin vaihtelee riippuen pinnasta, johon konvektio kohdistuu. Konvektio on sitä suurempaa, mitä suurempi lämpötilaero pinnan ja ympäristön välillä vallitsee. (Hagentoft 2001, pp. 43–45)

Luonnollista konvektiota tapahtuu avohuokoisissa eristeissä. Luonnollisessa konvektiossa lämpötilaerot aiheuttavat tiheyseroja rakenteessa olevaan kaasuun ja sen myötä ilman tai muun kaasun liikettä eristekerrokseen kuvan 2.1 mukaisesti. Konvektio alkaa kun eristekerroksen lämpimässä pinnassa oleva ilma nousee lämmitessään ylöspäin.

Vastaavasti kylmässä pinnassa oleva ilma jäähtyy ja laskeutuu painovoiman vaikutuksesta alaspäin, jolloin ilma alkaa kiertyä rakenteessa. (Siikanen 2014, s. 35)

Konvektion osuus lämmönjohtavuudesta on olematon tai hyvin pieni, jos avoimuuden eristekerroksen paksuus on pieni (Hagentoft 2001, p. 45). Eristekerroksen tulee olla yleensä yli 125 mm paksu, jotta siinä ilmenee luonnollista konvektiota. Eristepaksuuden kasvattaminen voimistaa luonnollista konvektiota pintojen välisen lämpötilaeron kasvaessa. (Siikanen 2014, s. 35) Konvektiota voidaan ehkäistä jakamalla eristekerros esimerkiksi höyrynsulkumuovin avulla kahteen ohuempaan osaan.



Kuva 2.1. Luonnollinen konvektio seinärakenteessa (Siikanen 2014, s. 35).

Pakotettu konvektio aiheutuu ulkopuolisesta voimasta, kuten tuulesta tai ilmanvaihdosta. Pakotetussa konvektiossa ilma virtaa rakenteen läpi, joten rakenteissa tulee olla epätiiviyttä, jotta pakotettua konvektiota tapahtuu. (Siikanen 2014, s. 35)

2.2.4 Säteily

Lämpösäteilyssä energia siirtyy valon nopeudella etenevän sähkömagneettisen aalto liikkeen mukana. Säteilemällä tapahtuvaan lämmön siirtymiseen ei tarvita väliainetta ja se onkin tehokkainta tyhjiössä. (Young & Freedman 2008, p. 596)

Lämpösäteilyn osuessa johonkin pintaan, osa lämmöstä heijastuu pois pinnasta ja osa lämmöstä absorboituu pintaan lämmittäen kyseistä kappaletta. Osa säteilystä voi myös läpäistä kappaleen. Kaikki absoluuttisen nollopisteen yläpuolella olevat kappaleet emittoivat, eli lähettävät lämpösäteilyä. Kappaleita, jotka imevät kaiken itseensä kohdistuvan säteilyn kutsutaan mustiksi kappaleiksi. Mustat kappaleet myös säteilevät poikkeuksetta eniten. (Young & Freedman 2008, p. 597)

Säteily voi olla lyhyt- tai pitkäaaltoista. Kaikkein lyhytaaltoisimmat säteet ovat gammasäteitä ja pisimmät ovat mikroaaltoja. Lämpösäteily on aallonpituudeltaan 0,1–100 μm . Myös näkyvä valo osuu tälle välille säteiden ollessa 0,4–0,7 μm pitkiä. (Hagentoft 2001, p. 46)

2.3 Lämmönjohtavuus

Materiaalin lämmönjohtavuus kertoo kuinka paljon lämpöä sen läpi voi siirtyä eri siirtymismuodoilla. Sitä merkitään kreikkalaisella kirjaimella λ ja sen yksikkö $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ kuvaa lämpövirran tiheyttä pituusyksikön paksuisen tasa-aineisen raakerroksen läpi, kun lämpötilaero ainekerroksen pintojen välillä on yksikön suuruinen. Lämmönjohtavuuden arvo on sitä pienempi, mitä tehokkaampi eriste on kyseessä. Lämmöneristeinä käytettävien materiaalien lämmönjohtavuus on pieni, tyypillisesti alle 0,050 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Esimerkiksi betonille arvo on noin 1 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ja teräkselle 50 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. (Siikanen 2014, s. 41–45)

Terminä lämmönjohtavuus on hieman harhaanjohtava. Etenkin silloin kun testataan eristemateriaalien kaltaisia tuotteita, joilla on pieni lämmönjohtavuus, on saatu mittaus-tulos yhdistelmä materiaalisesta tapahtuvasta johtumisesta ja säteilystä, joissain tapauk-sissa myös konvektiosta. Lisäksi mittaustulokseen vaikuttaa esimerkiksi materiaalis-sa oleva kosteus. Tarkalleen ottaen kyse onkin siis lämmön siirtymismäärästä materiaalis-sa. (SFS-EN 12667, Annex A 2001)

Lämpötilaa, jossa lämmönjohtavuus on mitattu, merkitään alaindeksillä. Esimerkiksi lämmönjohtavuudesta +10 °C lämpötilassa käytetään merkintää λ_{10} .

Materiaalivalmistajat ilmoittavat jokaiselle lämmöneristet tuotteelleen lämmönjohta-vuusarvon, jota kutsutaan nimellä λ_D . Arvo perustuu lämmönjohtavuuden mittaustulok-siin +10 °C keskilämpötilassa. Saatuihin mittaustuloksiin lisätään mittaussmäärästä riip-puva epävarmuuskerroin. Jokaisen lämmöneristeiden tulee täyttää sille määritelty λ_D -arvo. (SFS-EN ISO 13787 2003)

λ_D -arvon määrittämistapa vaihtelee eristeiden ominaisuuksien mukaan. CE-merkinnän vaatimuksissa on määritetty jokaiselle eristemateriaaleille oma tapa arvon määrittämi-seksi. Eroavuuksia arvon määrittämisessä on esimerkiksi eristelevyjen säilytysolosuh-teissa. Joidenkin eristeiden ominaisuudet muuttuvat ajan kuluessa ja ne tulee vanhentaa ennen mittausta kullekin materiaalikohtaisin ohjein. Vanhentamisella pyritään havain-nollistamaan eristeiden lämmönjohtavuusominaisuuksia 25 vuoden kuluttua (SFS-EN 13164 2015, SFS-EN 13166 2013, EN 14308 2015).

Lämmönjohtavuuden määrittämiseen on olemassa runsaasti eri menetelmiä. Läm-möneristeiden lämmönjohtavuuden määrittämisessä käytetään yleensä joko lämpövirta-levylaitetta (engl. heat flow meter) tai suojattua kuumalevylaitetta (engl. guarded hot

plate). (RIL 255-1-2014 2014, s. 345). Tässä tutkimuksessa käytetään kumpaakin mittalaitetta. Niiden toimintaperiaatteet esitetään luvussa 3.4 Mittalaitteet.

2.4 Lämmönläpäisykerroin

Rakenteiden energiatehokkuutta kuvataan rakenteen lämmönläpäisykerroimella, eli U-arvolla. U-arvon yksikkö on $W/(m^2K)$ ja se kuvaa rakennusosan läpäisevän lämpövirran tiheyttä, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolien välillä on yksikön suuruinen (Siikainen 2014, s. 50). U-arvo on sitä pienempi, mitä vähemmän rakenne läpäisee lämpöä, eli mitä tehokkaammin se eristää. Lämmönläpäisykerroin määritetään jokaiselle rakenneosalle erikseen. Eri rakenneosien U-arvoja hyödynnetään muun muassa rakennuksen energiankulutuksen laskennassa.

Lämmönläpäisykerroimen laskentaan on ohjeet muun muassa Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C4 (luonnos 2012). Rakentamismääräyskokoelmasta on saatavissa myös yleisimmin käytetyille rakennusmateriaaleille lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvot λ_U lämmönläpäisykerroimen laskentaa varten. Suunnittelu-arvoina kuitenkin voidaan käyttää taulukoitujen arvojen lisäksi myös materiaalivalmistajien ilmoittamia arvoja tai materiaalille mitattuja lämmönjohtavuusarvoja (SFS-EN ISO 10456:2008). Tässä tutkimuksessa suunnittelu-arvoina käytetään mitattuja lämmönjohtavuuden arvoja.

U-arvo määritetään eri rakennekerrosten lämmönjohtavuuksien ja kerrosten paksuuden avulla. Lisäksi otetaan huomioon rakenteen ulko- ja sisäpinnassa oleva pintavastus, joka riippuu ilman liikkumissuunnasta. Laskettuun U-arvoon lisätään tarvittaessa rakenteen eristävyyttä heikentävät vaikutukset, kuten kiinnikkeiden aiheuttamat kylmäsillat ja rakenteen sisäinen konvektio avoahuokoisia ja paksuja lämmöneristekerroksia käytettäessä. Heikennykset otetaan huomioon käyttämällä korjauskertoimia. Arvoa, jossa korjaustekijät on otettu huomioon, kutsutaan korjatuksi U-arvoksi U_c .

Yhdestä aineesta koostuvan rakennekerroksen lämmönvastus R lasketaan kaavalla (2.8)

$$R = \frac{d}{\lambda_U} \quad (2.8)$$

jossa

λ_U on ainekerroksen lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvo [W/(m·K)]

Jos samassa rakennekerroksessa on useampaa ainetta – esimerkiksi puurunko ja lämmöneriste – lasketaan rakennekerroksen lämmönvastus eri materiaalien pinta-alaosuuksien avulla. Menetelmä esitetään tarkemmin muun muassa rakentamismääräyskokoelmassa.

Tyypillisesti rakenteessa on useita ainekerroksia lämpövirran suuntaan nähden peräkkäin. Rakenteen kokonaislämmönvastus on rakenneosien lämmönvastuksien ja rakenteen pintavastuksien R_{si} ja R_{se} summa.

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (2.9)$$

jossa

R_T	on rakennusosan kokonaislämmönvastus	$[\text{m}^2\text{K}/\text{W}]$
R_{si}	on sisäpuolen pintavastus	$[\text{m}^2\text{K}/\text{W}]$
R_{se}	on ulkopuolen pintavastus	$[\text{m}^2\text{K}/\text{W}]$

Rakenteen lämmönläpäisykerroin on rakenteeseen kuuluvien kerrosten lämmönvastusten ja rakennusosan pintavastuksien summa, eli kokonaislämmönvastuksen käänteisluku.

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (2.10)$$

jossa

U	on rakenteen lämmönläpäisykerroin	$[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$
-----	-----------------------------------	-----------------------------------

Lämmönläpäisykerrointa laskettaessa tulee ottaa huomioon, ettei lämmöneristävyyttä heikentävää luonnollista konvektiota esiinny liikaa lämmöneristekerroksessa. Tämän varmistamiseksi lämmöneristekerrokselle lasketaan muunnettu Rayleighin luku Ra_m , joka ei saa ylittää rakentamismääräyskokoelmassa ilmoitettuja raja-arvoja. Jos arvot ylittyvät, tulee haitallinen konvektio estää rakenteellisesti tai lämmöneristemateriaalin vaihdolla. (RakMk C4, luonnos 2012)

Muunnettu Rayleighin luku lasketaan kaavalla (2.11).

$$Ra_m = k \frac{d\kappa\eta\Delta T}{\lambda} \quad (2.11)$$

jossa

k	on kerroin $3 \cdot 10^6$	$[-]$
κ	on lämmöneristeen ilmanläpäisevyys	$[\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})]$
η	on ilman dynaaminen viskositeetti $10 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa	$[\text{Pa} \cdot \text{s}]$

Muunnetun Rayleighin luvun laskennassa käytetään sisä- ja ulkoilman välisenä lämpötilaerona $50 \text{ }^\circ\text{C}$. (RakMk C4, luonnos 2012)

Rakentamismääräyskokoelmassa on esitetty määräykset rakennusosien U-arvoille. Yksittäiset rakennusosat voivat kuitenkin olla määräystasoa heikompia, jos ominaisuuden kompensoimiseksi jonkin muun rakennusosan U-arvo on määräystasoa parempi. (RIL 255-1-2014 2014, s. 26)

2.5 Kosteuden vaikutus lämmönjohtavuuteen

Veden lämmönjohtavuus on noin 20-kertainen ilman lämmönjohtavuuteen verrattuna, joten lämmöneristeen huokosissa oleva kosteus kasvattaa lämmönjohtavuutta (RIL 117 1979, s. 55). Vaikutuksen määrä on kuitenkin materiaalikohtainen: Esimerkiksi mineraalivilloilla vesihöyryn vaikutus lämmönjohtavuuteen on hyvin pieni, kun taas puupohjaisilla materiaaleilla vaikutus on merkittävämpi (Vinha et al. 2005, s. 41). Vesihöyryn aiheuttaman lämmönjohtavuuden lisääntyminen aiheutuu enimmäkseen kosteuden mukanaan kuljettamasta lämmöstä. Lisäksi kosteus vaikuttaa materiaalien lämmönjohtavuuteen merkittävämmän, jos vesihöyry tiivistyy vedeksi rakenteen sisällä. (RIL 117 1979, s. 55)

Käytännössä rakenteessa oleva vesihöyry ei kasvata ratkaisevasti materiaalin lämmönjohtavuutta. Rakenteen kylmissä osissa lämmönjohtavuus on tyypillisesti pienimmillään ja vastaavasti suhteellinen kosteus suurimmillaan ja lämpimissä osissa lämmönjohtavuus puolestaan on suurempi ja suhteellinen kosteus pienempi, joten myös erot vaikutuksissa tasaantuvat. (Vinha et al. 2005, s. 41)

3. LÄMMÖNERISTEIDEN OMINAISUUDET

3.1 EPS

EPS valmistetaan pienistä paisutettavista polystyreenihelmistä, joiden sisällä on ponna-kaasua. Kaasu on yleensä pentaania. Esipaisutusvaiheessa polystyreenihelmet paisute-taan kuumassa vesihöyryssä, jolloin polystyreenihelmen pinta pehmenee ja pentaani laajenee. Paisutuksessa helmistä tulee noin 40–50 -kertaisia alkuperäiseen kokoonsa verrattuna. Paisutusprosessin aikana suurin osa helmen sisällä olevasta pentaanista korvautuu ilmalla. Paisutetut helmet varastoidaan suuriin siiloihin tasaantumaan. (Barnetson 2004, pp. 39–40)

Seuraavassa vaiheessa irtonaisista helmistä muotoillaan kiinteä eristekappale lämmön ja vesihöyryn avulla. Muotoilu voi tapahtua suuressa blokimuotissa, minkä jälkeen valmiista EPS-blokista leikataan halutun muotoisia kappaleita, esimerkiksi lämmöneristelevyjä. Vaihtoehtoisessa valmistustavassa eriste muotoillaan muotissa haluttuun muotoonsa, jolloin erillistä leikkaamista ei tarvita. (Barnetson 2004, pp. 39–40)

EPS:n lämmöneristävyys perustuu helmien sisällä olevaan liikkumattomaan ilmaan. Valmiista tuotteesta on noin 98% ilmaa ja rakenne on umpisoluinen (Barnetson 2004, pp. 38). EPS:n lämmönjohtavuus on riippuvainen eristeen tiheydestä ja on parhaimmillaan noin tiheydeltään 30-50 kg/m³ olevilla tuotteilla. Tätä kevyemmissä ja painavammissa tuotteissa lämmönjohtavuus kasvaa. (Barnetson 2004, pp. 45–46) Mittauksissa käytetään eri tiheyksien EPS-eristeitä, jotta havaitaan mikä on tiheyden vaikutus lämmönjohtavuuteen muissa tutkittavissa lämpötiloissa.

EPS on yleensä väriltään valkoista tai harmaata. Harmaan EPS:n raaka-aineeseen on sekoitettu lämpösäteilyä absorboivia lisäaineita, tyypillisesti grafiittia tai nokimustaa lämmönjohtavuuden pienentämiseksi. Tässä diplomityössä harmaista EPS-eristeistä käytetään työn tilaajan käyttämää markkinointinimeä Platina.

Kuvassa 3.1 on EPS-eristettä läheltä kuvattuna. Valmiissa EPS:ssä toisiinsa takertuneet polystyreenihelmet muodostavat hunajakennomaisen rakenteen.



Kuva 3.1. EPS-eristeen rakenne.

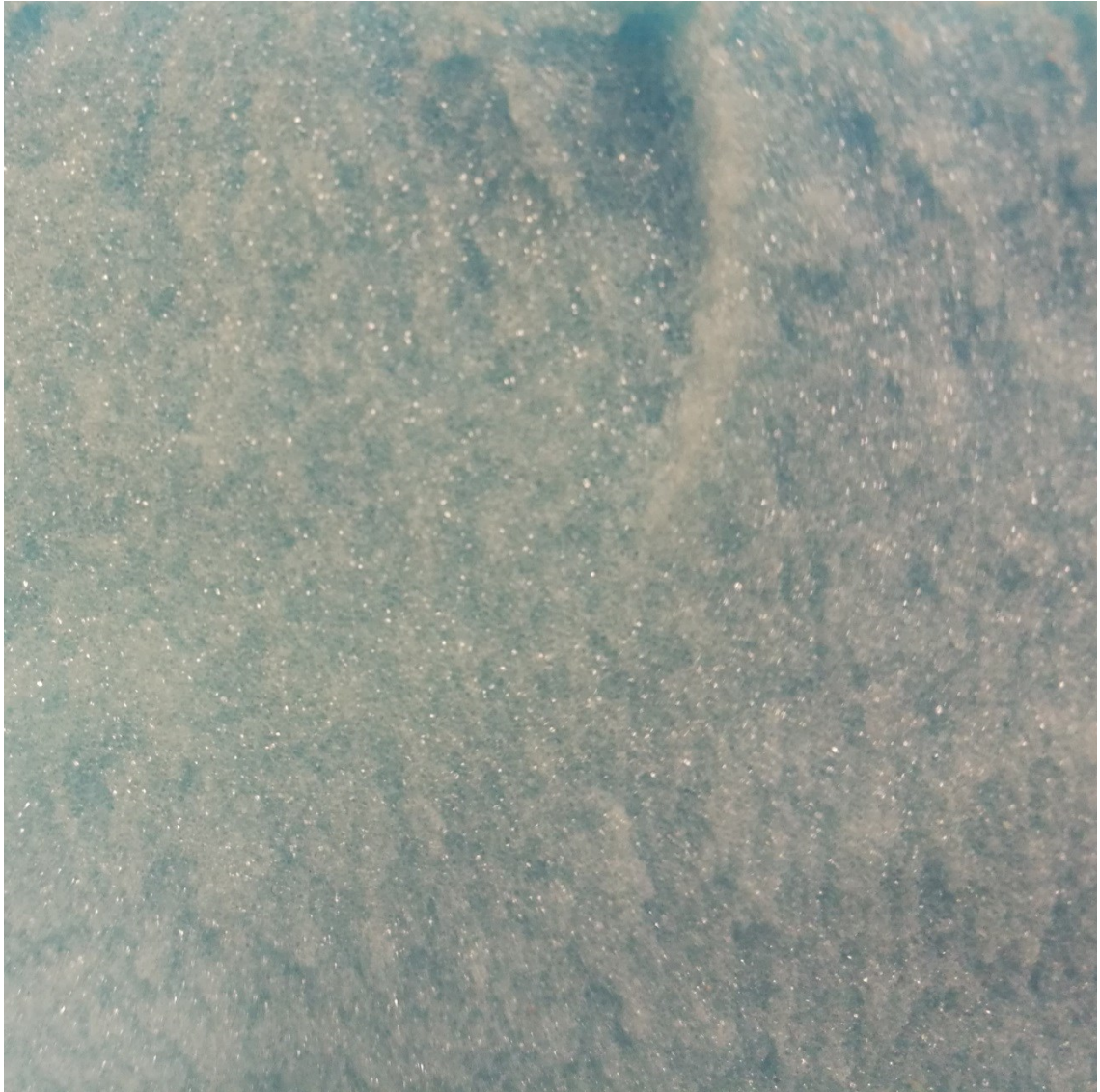
3.2 XPS

Suulakepuristetun polystyreenin (XPS, engl. extruded polystyrene) valmistuksessa korkeassa paineessa olevaan sulatettuun polystyreeniin sekoitetaan ponneainetta. Ponneaine on nykyään tyypillisesti hiilidioksidia. Sula massa puristetaan syöttöaukon läpi normaaliin ilmanpaineeseen, jolloin massa paisuu ponneaineen kaasuuntumisen vaikutuksesta. XPS-levy paisutetaan haluttuun paksuuteen ja annetaan jäähmettyä. (RIL 255-1-2014 2014, s. 265)

XPS-eristeen solurakenteeseen jää valmistuksen jälkeen jonkin verran ponneainetta, joka haihtuu jonkin ajan kuluttua. Tästä syystä se tulee vanhentaa materiaalin tuotestandardissa esitettyjen ohjeiden mukaan, jotta ylimääräinen kaasu korvaantuu ilmalla (SFS-EN 14934 2007).

XPS-lämmöneristeen lämmöneristävyys perustuu eristeen sisällä olevaan liikkumattomaan ilmaan. Valmiin, umpisoluisen eristerakenteen tilavuudesta noin 97 % on ilmaa. Valmistusmenetelmästä johtuen XPS-lämmöneristeen lämmönjohtavuus kasvaa eristelevyn paksuuden kasvaessa. Sen vuoksi lämmöneristävyysominaisuudet ovat paksuissa XPS-levyissä heikommät kuin ohuissa. (RIL 255-1-2014 2014, s. 265)

Kuvassa 3.2 on kuvattu XPS-eristeen rakennetta. EPS-eristeeseen verrattuna eristeessä olevat solut ovat huomattavasti pienempiä ja kidemäisempiä.



Kuva 3.2. XPS-eristeen rakenne.

3.3 Polyuretaanieristeet

Polyuretaanivaahdon raaka-aineita ovat isosyanaatit ja polyoli. Yhdessä raaka-aineet muodostavat polyisosyanaatteja, jotka ponneaineen kanssa reagoidessaan muodostavat eksotermisessä reaktiossa polyuretaanivaahtoa. (Eaves 2004, p. 55)

Polyuretaanieristeet voidaan jakaa tavalliseen polyuretaaniin (PUR, engl. polyurethane foam) ja polyisosyanuraattia sisältävään eristeeseen (PIR, engl. polyisocyanurate foam). Molempien eristetyyppien raaka-aineena käytetään isosyanaattia, mutta PIR-eristeissä isosyanaatin määrä on merkittävästi PUR-eristeessä käytettyä määrää suurempi. Lisäksi PIR-eristeen valmistuksessa täytyy käyttää erillistä katalyyttiä, jotta eksoterminen reaktio saadaan aikaan. (Eaves 2004, p. 56)

Valmiissa PIR-eristeessä on polyuretaania ja reaktiotuotteena syntynyttä polyisosyanuraattia, kun PUR-eristeessä on pelkkää polyuretaania. PIR-eristeissä on paremmat lämmön- ja palonkesto-ominaisuudet kuin PUR-eristeessä, mutta toisaalta se on eristetyypeistä hauraampi. (Eaves 2004, p. 56) Tässä tutkimuksessa mitataan PIR-eristeen lämmönjohtavuusominaisuuksia. PIR-eristeen rakenne on kuvassa 3.3. Eristeen rakenne muistuttaa XPS-eristeen rakennetta pienen solurakenteensa vuoksi. Tutkituissa PIR-näytteissä oli myös hieman kuvan 3.4 mukaisia onkaloita. Lisäksi eristeen ja pintakalvon välillä oli pieniä ilmataskuja.



Kuva 3.3. PIR-eristeen solurakenne.

Polyuretaanieristeet voidaan valmistaa tekemällä muotissa suuri kappale ja leikkaamalla se sopivaan muotoon. Tyypillisempää on kuitenkin tehdä molemmilta pinnoiltaan laminoituja levyjä. Pinnoitteilla saadaan vaikutettua eristeen ominaisuuksiin ja käyttötarkoituksiin: ohut tiivis pintakalvo voi toimia höyrynsulkuna ja paksumpia pintalevyjä käyttämällä voidaan tehdä esimerkiksi elementtejä. Pinnoitteilla laminoitaessa reaktio-

vaiheessa oleva sekoite pursotetaan pinnoitelevyjien väliin ja se laajenee pystysuunnassa haluttuun paksuuteen. (Eaves 2004, pp. 73–74)

Polyuretaanivaahdot ovat kovia, umpisoluisia reaktiotuotteita. Ponneaine, joka on tyypillisesti pentaania, jää suljettuihin soluihin. Koska pentaanin lämmönjohtavuus on ilmaa pienempi, se vaikuttaa eristeen lämmönjohtavuusominaisuuksiin parantavasti ja tekee PIR-eristeistä tehokkaampia lämmöneristeitä kuin ilman eristävyteen perustuvat lämmöneristeet. (Eaves 2004, p. 56, 68) Ponnekaasun ominaisuuksien lisäksi polyuretaanin lämmönjohtavuuteen vaikuttaa eristeessä olevien solujen määrä eli materiaalin tiheys (RIL 255-1-2014 2014, s. 266).

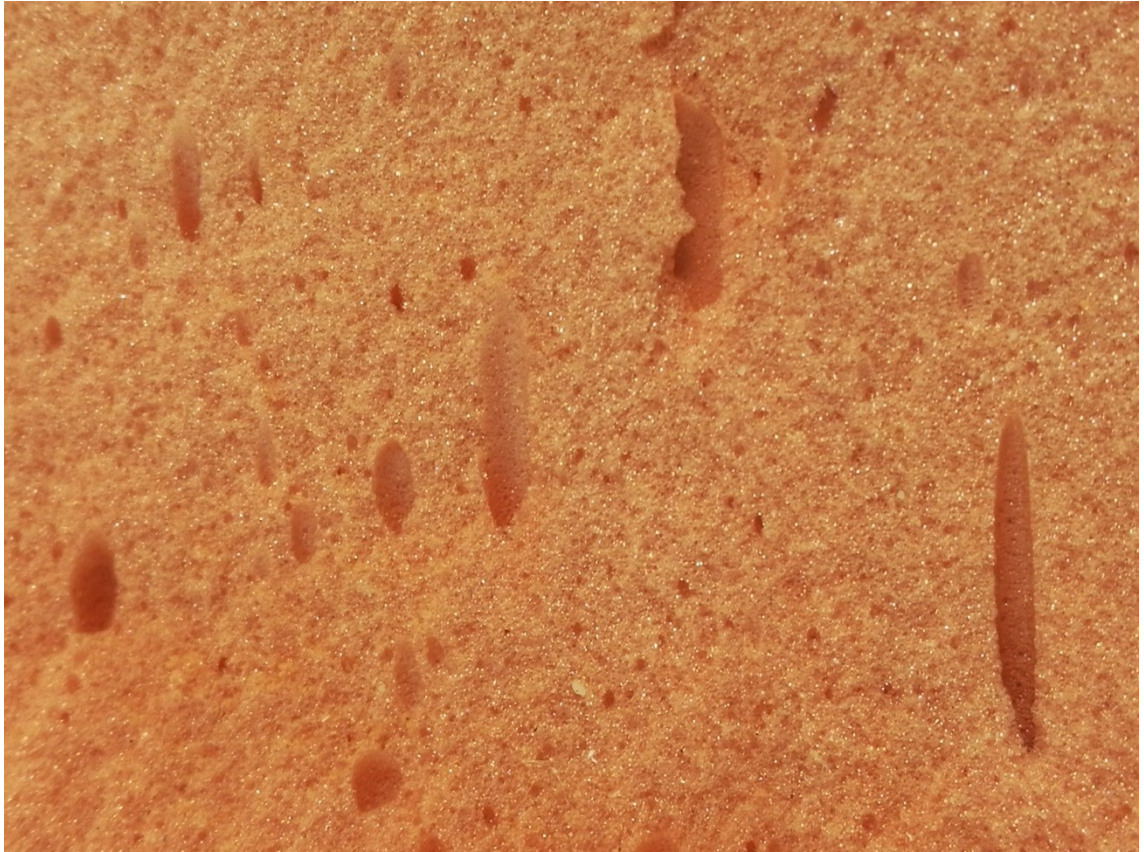
Polyuretaanin pitkäaikaista lämmönjohtavuusarvoa heikentää ilman hidas diffuusio soluihin. Diffuusio tasaantuu noin kolmen vuoden kuluessa, jonka jälkeen lämmönjohtavuus ei enää juuri muutu. Lämmönjohtavuuden heikkenemisen vuoksi λ_D -arvon määrittämiseksi lämmöneristeet vanhennetaan eristeen tuotestandardissa esitettyjen ohjeiden mukaan. (RIL 255-1-2014 2014, s. 266)

3.4 Fenolieristeet

Fenolieristeen (PF, engl. phenolic foam) pääraaka-aineina käytetään hartsia, emulgointiainetta (engl. emulsifier) ja ponneainetta, sekä happoa reaktion katalysaattorina. Kun aineet sekoitetaan keskenään, syntyy pieniä kaasukuplia, jotka jäävät eristeeseen seoksen muuttuessa nesteestä geeliksi ja vähitellen kovettuessa vaahdoksi. Ennen kovettumistaan eriste voidaan pursottaa pinnoitemateriaalien väliin haluttuun paksuuteen, kuten polyuretaanieristeet. Vaihtoehtoisesti kovettuneesta vaahdosta voidaan leikata eristelevyjä. (Cornick 2010 p. 190, 193)

Fenolieristeet ovat umpisoluisia eristeitä. Materiaalin eristävyys perustuu soluissa olevaan kaasuun, jolla on pieni lämmönjohtavuus. Nykyään käytettävä kaasu on kustannus- ja ympäristösyistä tyypillisesti pentaania, mutta myös muunlaisia kaasuja on käytetty. Kuten polyuretaani- ja XPS-eristeiden, myös fenolieristeiden eristävyys heikkenee ajan kuluessa, joten lämmönjohtavuuden heikkeneminen otetaan huomioon valmistajan ilmoittamassa lämmönjohtavuusarvossa tuotestandardien mukaisesti. (Cornick 2010 p. 189, 206)

Kuvassa 3.4 oleva fenolieriste on rakenteeltaan pienisoluista, kuten XPS- ja PIR-eristeet. PIR- ja XPS-eristeet olivat kuitenkin rakenteeltaan melko tasaisia, kun fenolieristeessä on selkeästi havaittavissa runsaasti onkaloita.



Kuva 3.4. Fenolieristeen rakenne.

3.5 Mineraalivillat

Kivi- ja lasivilla ovat mineraalivilloja (MW, engl. mineral wool). Kivivilla (engl. stone wool) valmistetaan sulatetuista emäksisistä kiviaineksista. Lasivilla (engl. glass wool) valmistetaan kvartsihiekkasta, soodasta ja kalkkikivestä. Lasivillan raaka-aineesta 50–60 % on kierrätyslasia. Molempien villaeristeiden valmistusperiaate on samanlainen: Sulatettu massa valutetaan pyöriville linkopyörille, jolloin pisarat venyvät kuiduiksi voimakkaan ilmavirtauksen vaikutuksesta. Tämän jälkeen kiviaines laitetaan karkaisuuniin, jossa lämmöneriste saa lopullisen tiheydensä. Valmiin kivivillakuidun pituus on 2-4 mm ja lasivillakuidun 5-10 mm. (Siikanen 2009, s. 217, Eurima) Mineraalivillojen tilavuudesta n. 92–99 % on ilmaa (RIL 255-2-2014 2014, s. 261).

Kuvassa 3.5 on lasivillaeristeen avosoluinen rakenne. Rakenne on kerroksittainen ja siinä on havaittavissa eristeen kuitumainen rakenne. Kivivillaeriste on rakenteeltaan samankaltainen kuin lasivilla.

Tämän tutkimuksen mittauksissa lämpövirran suunta eristeessä on sama kuin yleensä mineraalivillaeristetyissä rakenteissa, eli eristekerrosten suuntaan nähden kohtisuoraan. Kuvassa 3.5 lämpövirran suunta olisi ylhäältä alas tai alhaalta ylös.



Kuva 3.5. Lasivillaeristeen rakenne.

Mineraalivillan ominaisuuksiin vaikuttaa eristeen tiheys, kuitujen suunta, pituus ja paksuus, sekä sideaineen määrä. Mineraalivilloissa lämpöä siirtyy konvektiossa, säteilemällä ja johtumalla. Johtumista tapahtuu villan kuituja ja materiaalin ilmahuokosia pitkin. (RIL 255-1-2014 2014, s. 261) Eristeessä tapahtuva lämmön siirtyminen riippuu eristeen tiheydestä ja lämpötilasta: Lämpötilan noustessa säteilyn ja johtumisen osuus kasvaa ja konvektion osuus pienenee. Lämmönjohtavuus pienenee villan tiheyden kasvaessa, kunnes tietyn pisteen jälkeen lämmönjohtavuus alkaa jälleen kasvaa. (Siikanen 2009, s. 219–220)

Mineraalivillan lämmöneristävyys perustuu siihen, että eristeen sisällä vähennetään lämpösäteilyllä siirtyvää lämpövirtaa ja pyritään saamaan ilma seisomaan paikallaan. Tästä syystä on erittäin tärkeää estää ilman liikkuminen eristekerroksessa. (RIL 255-2-2014 2014, s. 261) Mineraalivillat ovat avojuokoisia ja tästä syystä niitä käytettäessä tulee estää rakenteen sisäinen konvektio.

3.6 Puukuitueristeet

Puukuitueristeitä valmistetaan kierrätysmateriaaleista ja puukuidusta. Kierrätysmateriaali on tyypillisesti puhdasta sanomalehtipaperia, johon lisätään kuiduttamisen yhteydessä boorimineraaleja sisältävää palonestoainetta. Puukuidusta valmistettu eriste tehdään puupohjaisista, happivalkaistuista ja bakteerittomista sellukuiduista ligniinin toimiessa sideaineena. Näiden lisäksi raaka-aineeseen sekoitetaan lisäainetta palonkestävyyden ja biologisen kestävyuden saavuttamiseksi. (RIL 255-1-2014 2014, s. 262–263)

Avohuokoisen puukuitueristeen eristävyys perustuu paikallaan seisovaan ilmaan. Kuten mineraalivilloilla, eristeen tiheys vaikuttaa merkittävästi materiaalin lämmönjohtavuuteen. (RIL 255-1-2014, s. 263) Kuten mineraalivillaeristeissä, myös puukuitueristeissä esiintyy sisäistä konvektiota, joka tulee ottaa huomioon rakenteiden suunnittelussa.

Kuvassa 3.6 on puukuitueristeen rakenne. Mineraalivillaeristeiden kaltaisesti rakenteesta on havaittavissa vaakasuuntaisia kerroksia ja lämmöneristekäytössä lämpövirta kulkee kerrokseen nähden kohtisuoraan. Eristeen rakenteesta voidaan helposti havaita valmistuksessa käytetty sanomalehtipaperi.



Kuva 3.6. Puukuitueristeen rakenne.

3.7 Muut lämmöneristemateriaalit

Aiemmin on käytetty monenlaisia luonnonmateriaaleihin perustuvia lämmöneristeitä, kuten sahanpurua, korkkia tai olkilevyjä. Niistä on kuitenkin luovuttu muun muassa tehokkaampien eristemateriaalien yleistyttyä.

Edellisissä luvuissa on lueteltu lämmöneristemateriaaleja, joiden ominaisuuksia mitataan tässä tutkimuksessa. Markkinoilla on myös muita lämmöneristemateriaaleja, kuten kierrätyslasin käyttöön pohjautuvat solu- ja vaahtolasieristeet, erilaisia kerroksia sisältävät multifoil-eristeet, aerogeelit sekä tyhjiöeristeet.

Solu- ja vaahtolasit valmistetaan pääasiassa puhdistetusta kierrätyslasista. Solulasieristeisiin sekoitetaan valmistusvaiheessa myös muita ainesosia. Solulasia käytetään useimmiten eristelevyinä suurta puristuslujuutta vaativissa kohteissa. Vaahtolasi on murskemaista kevytkiviainesta ja sitä käytetään esimerkiksi routaeristyksissä ja sisäpuolisissa täytöissä. Solulasin lämmöneristävyys vaihtelee runsaasti ollen suuruusluokaltaan 0,035–0,055 W/(m·K). Kuivan vaahtolasin eristävyys on tutkimuksen lämmöneristeitä heikempi ollen kuivana noin 0,1 W/(m·K). (RIL 255-1-2014, 2014, s. 268-269)

Multifoil-eristeet koostuvat useista polyeteenipintaisista kalvoista ja niiden välissä olevista vanu- ja vaahtomassakerroksista. Eristeen toiminta perustuu säteilyn- ja konvektion rajoittamiseen ja useisiin toisistaan alumiinikalvojen avulla erotettuihin eristekerrokseen. Multifoil-eristeiden lämmönjohtavuus on samaa luokkaa polystyreenieristeiden kanssa – noin 0,33–0,35 W/(m·K). (RIL 255-1-2014, 2014, s. 270)

Aerogeelit ovat geelimäisiä materiaaleja, joiden rakenne koostuu pienistä silikapartikkeleista, joista on poistettu nestemäinen faasi. Rakentamisen sovellutuksissa käytettävät aerogeelit koostuvat silikapartikkelien lisäksi kuitumaisesta huopamateriaalista. Aerogeelien lämmöneristävyys on huomattavasti parempi kuin yhdenkään tässä tutkimuksessa käytetyn eristeen ollen noin 0,014–0,015 W/(m·K). Toistaiseksi aerogeeliä käytetään rakentamisessa lähinnä yhdessä jonkin toisen eristeen kanssa, koska se on huomattavan kallista. Aerogeelin käyttökohteet ovat tyypillisesti lisälämmöneristäminen ja käyttö kylmäsiltoja katkaiseva kerroksena. (RIL 255-1-2014, 2014, s. 270–271)

Tyhjiöeristeiden eristävyys perustuu valmistusvaiheessa eristeen tehtyyn alipaineeseen. Alipaineen avulla saadussa tyhjiössä lämmön johtuminen huokosilmassa on huomattavasti pienempää kuin lämmönjohtavuus ilmassa normaalissa ilmanpaineessa. Eristelevyt ovat rakenteeltaan elementtimäisiä. Rakenteensa vuoksi niitä ei voida esimerkiksi leikata työmaalla käyttökohteeseen sopivaksi, koska tyhjiö korvautuisi ilmalla ja materiaalin lämmöneristävyysominaisuudet heikkenisivät. Tyhjiöeristeiden lämmönjohtavuusominaisuuksille ei ole vielä suomalaista tai eurooppalaista standardia, joten niille ilmoitetut laskenta-arvot ovat materiaalivalmistajien itsensä määrittämiä. Tyhjiöeristeiden läm-

mönjohtavuusarvo on hyvin pieni, suuruusluokaltaan 0,006–0,008 W/(m·K). (RIL 255-1-2014, 2014, s. 271–272)

3.8 Eristävät aineet

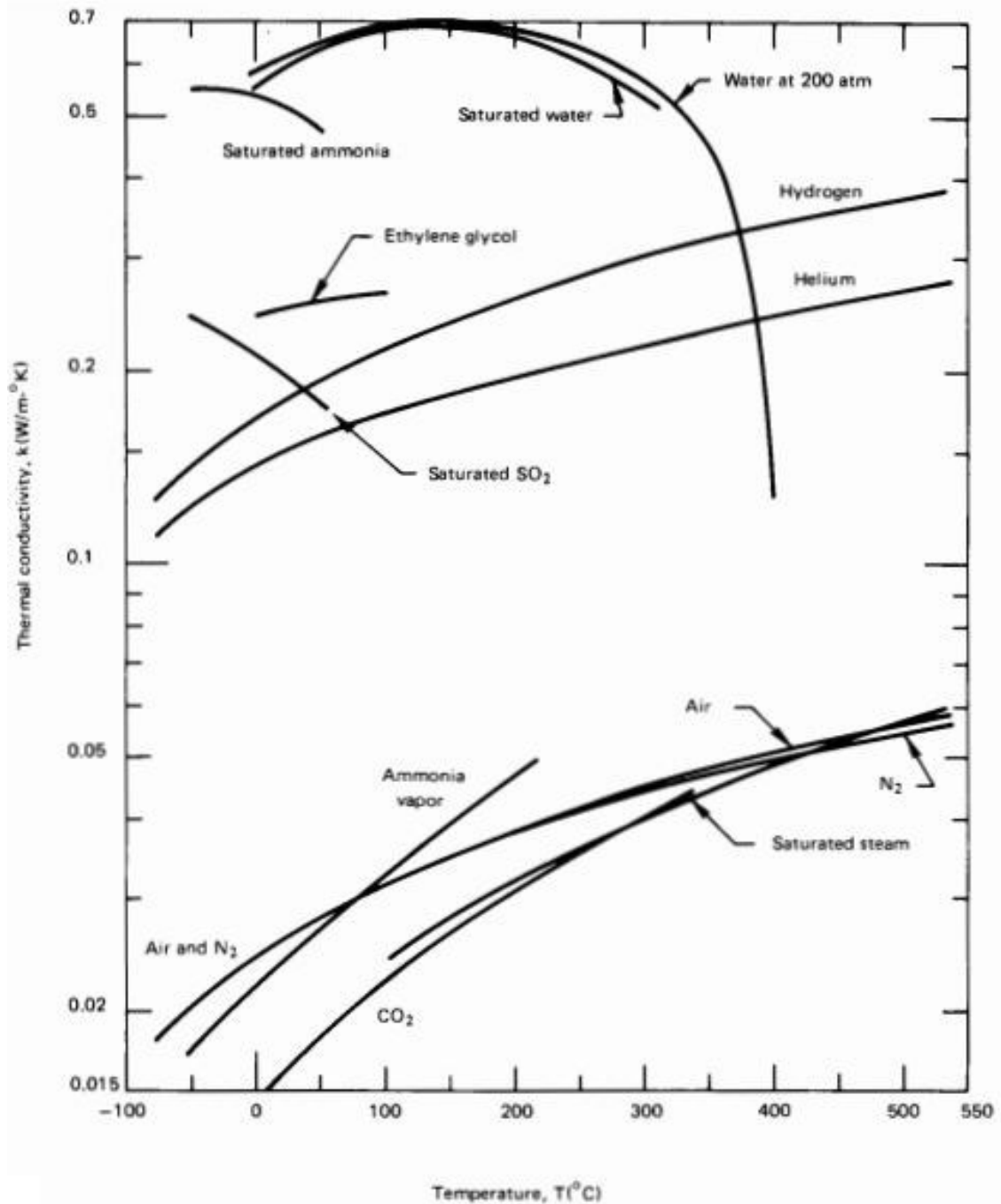
Tyypillisimmin lämmöneristeiden eristävyysominaisuudet perustuvat paikallaan seisovaan ilmaan, tyhjiöön tai johonkin kaasuun. Tässä tutkimuksessa useimpien eristeiden sisällä on vain ilmaa. Lisäksi oletetaan, että kaasua sisältävissä eristeissä käytetyt kaasut ovat pentaania ja hiilidioksidia (RIL 255-1-2014 2014, s. 265, Eaves 2004, p. 56). Useissa tapauksissa kaasun pieneen lämmönjohtavuuteen perustuvissa eristeessä voi olla kaasun lisäksi myös ilmaa joko valmistusprosessin jäljiltä tai ilman siirryttyä diffuusiolla solujen sisään. Ilman tai käytetyn kaasun lämmönjohtavuusominaisuuksien lisäksi materiaalin eristävyysominaisuuksiin vaikuttaa eristemateriaalin kiinteässä osassa tapahtuva lämmön johtuminen, joten kaasujen ominaisuudet eivät täysin kerro eristeen ominaisuuksista. Kaikkien testattavien eristemateriaalien tilavuudesta suurin osa on kuitenkin kaasua, joten kaasujen ominaisuudet tuntemalla voidaan arvioida, millaisia mittaustuloksia on odotettavissa.

Eristemateriaalin huokosrakenteet vaikuttavat merkittävästi sen lämmöneristävyys- ja kosteuskäyttämiseen. Huokoisessa aineessa lämpö siirtyy tyypillisesti

1. Johtumalla kiinteän osan kautta
2. Johtumalla huokosissa olevan ilman, kaasun tai veden kautta
3. Konvektiossa vesihöyryn mukana, mikäli aineessa on vettä ja siinä vallitsee lämpötilagradientti
4. Säteilynä pintojen välillä. (RIL 117, 1979, s. 53–54)

Kun aineen huokoisuus on suuri, kuten eristemateriaaleilla tyypillisesti on, suurin merkitys materiaalin lämmönjohtavuuteen on eristeessä olevalla kaasulla, ei niinkään kiinteän osan lämmönjohtavuus (RIL 117, 1979, s. 53–54) Tästä syystä mittaustuloksissa tulee todennäköisesti merkitsemään eniten ilman tai kaasun lämmönjohtavuuskäyttämisen. Siten kaikkien ilmaa sisältävien eristeiden lämmöneristävyuden muutos tulee olemaan keskenään samankaltainen. Eristeen kiinteän osan lämmönjohtavuudesta ja tiheydestä riippuu eristemateriaalin lämmönjohtavuuden muutosnopeus.

Lämpötilan laskiessa kaikkien eristemateriaalien lämmönjohtavuuden oletetaan pienevän, koska ilman ja muiden kaasujen lämmönjohtavuus pienenee normaalissa ilmapaineessa lämpötilan laskiessa (RIL 255-1-2014 2014, s. 260, Lienhard & Lienhard 2011, p. 53). Kuvassa 3.7 on joidenkin kaasujen lämmöneristävyysominaisuuksien muutoksia lämpötilasta riippuen. Tutkittavissa eristeissä olevista kaasuista kuvaajassa on ilman ja hiilidioksidin lämmönjohtavuusominaisuuksia.



Kuva 3.7. Lämpötilan vaikutus kaasujen lämmönjohtavuuteen (Lienhard & Lienhard 2011, p. 53).

Kuvasta 3.7 nähdään, että kaasujen lämmönjohtavuus kasvaa lämpötilan kasvaessa. Sen sijaan saturaatiopisteensä saavuttaneiden ja nesteeksi muuttuneiden kaasujen lämmönjohtavuus käyttäytyy vastakkaisesti. Nesteiden lämmönjohtavuus pienentyy lämpötilan noustessa ja kasvaa lämpötilan laskiessa, kunnes se kääntyy jälleen laskuun. Kaasun muuttuessa nesteeksi eristeen lämmönjohtavuusominaisuudet siis heikkenevät.

Ilma tai XPS-eristeen valmistuksessa käytettävä hiilidioksidi ei kuvan 3.7. perusteella saavuta saturaatiopistettään tutkittavalla lämpötila-alueella. Voidaan siis olettaa, että

hiilidioksidia ja ilmaa sisältävien eristeiden lämmönjohtavuus pienenee jotakuinkin lineaarisesti lämpötilan laskiessa.

Kuvassa ei ole tietoa pentaanin käyttäytymisestä eri lämpötiloissa. Normaalisissa ilmanpaineissa pentaanin tiivistymislämpötila on noin 28–50 °C (Eaves 2004, p. 21). Kuitenkin eristeessä oleva pentaani on kaasua (RIL 255-1-2014 2014, s. 265), joten solun sisällä olevan pentaanin täytyy olla sekoitettuna jonkin muun kaasun kanssa tai solun sisällä on vallittava ympäristöön verrattuna alipaine, jotta pentaani ei tiivisty normaaleissa käyttölämpötiloissa. Koska pentaanin tiivistymislämpötila on melko korkea, on mahdollista, että pentaania sisältävien kaasujen lämmöneristävyys heikkenee, jos kaasu muuttuu nesteeksi mittausalueella.

Muita lämmöneristemateriaaleissa käytettyjä ilmaa tehokkaammin eristäviä kaasuja ovat muun muassa argon, krypton ja ksenon. Nämäkään kaasut eivät kuitenkaan ole eristävyydeltään yhtä tehokkaita kuin edellisessä kappaleessa mainittu tyhjiö. (Jelle 2011) Samoja kaasuja käytetään myös esimerkiksi ikkunoiden eristyslaseissa (VTT 1999, s. 22).

3.9 Aiemmat tutkimukset

Lämpötilan vaikutusta lämmönjohtavuuteen ovat tutkineet muun muassa U. Berardi & M. Naldi tutkimuksessaan *The impact of the temperature dependent thermal conductivity of insulating materials on the effective building envelope performance* (2017). Tutkimuksessa selvitettiin tässä tutkimuksessa käsitellyistä materiaaleista kivivillan, PIR-eristeen ja XPS:n lämmönjohtavuutta eri lämpötiloissa. Tutkimuksessa havaittiin, että kivivillan ja XPS:n lämmönjohtavuus pieneni lineaarisesti lämpötilan laskiessa. Tutkimustulosten perusteella PIR-eristeen lämmönjohtavuus sen sijaan kasvaa siirryttäessä +20 °C lämpötilasta sekä korkeampaan että matalampaan. Lämmönjohtavuuden kasvun syyksi todettiin eristävän kaasun tiivistyminen nesteeksi ja siten lämmönjohtavuuden kasvu.

M. Koru on tutkimuksessaan *Determination of Thermal Conductivity of Closed-Cell Insulation Materials That Depend on Temperature and Density* (2016) selvittänyt lämpötilan ja eristeiden tiheyden vaikutusta umpisoluisten muovieristeiden lämmönjohtavuuteen. Tässä tutkimuksessa käytetyistä materiaaleista Koru on mitannut EPS:n ja XPS:n ominaisuuksia. Tutkimuksessa tarkasteltiin myös PUR-eristeen lämmönjohtavuutta. EPS- ja XPS-eristeissä Koru on päätenyt samaan lopputulokseen kuin Naldi, eli eristeiden lämmönjohtavuus muuttuu lineaarisesti lämpötilan muuttuessa. PUR-eristeen mittaustulos sen sijaan poikkesi PIR-eristeen ominaisuuksista, sillä myös sen lämmönjohtavuus muuttui lineaarisesti mittausalueella.

J. Vinha et al. on tutkinut julkaisussa *Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona* (2005) lämpötilan ja kosteu-

den vaikutusta erilaisiin rakennusmateriaaleihin. Lämmöneristemateriaaleista tutkimuksessa selvitettiin lasivilla, kivivilla ja puukuitueristelevyjen lämmönjohtavuuden muutosta lämpötilan muuttuessa. Tutkimuksessa havaittiin, että kuivien villalevyjen lämmönjohtavuus kasvaa lämpötilan kasvaessa, kuten ilmaa sisältävillä eristeillä oli oletettavissa.

4. MITTAUKSET

4.1 Tutkittavat materiaalit

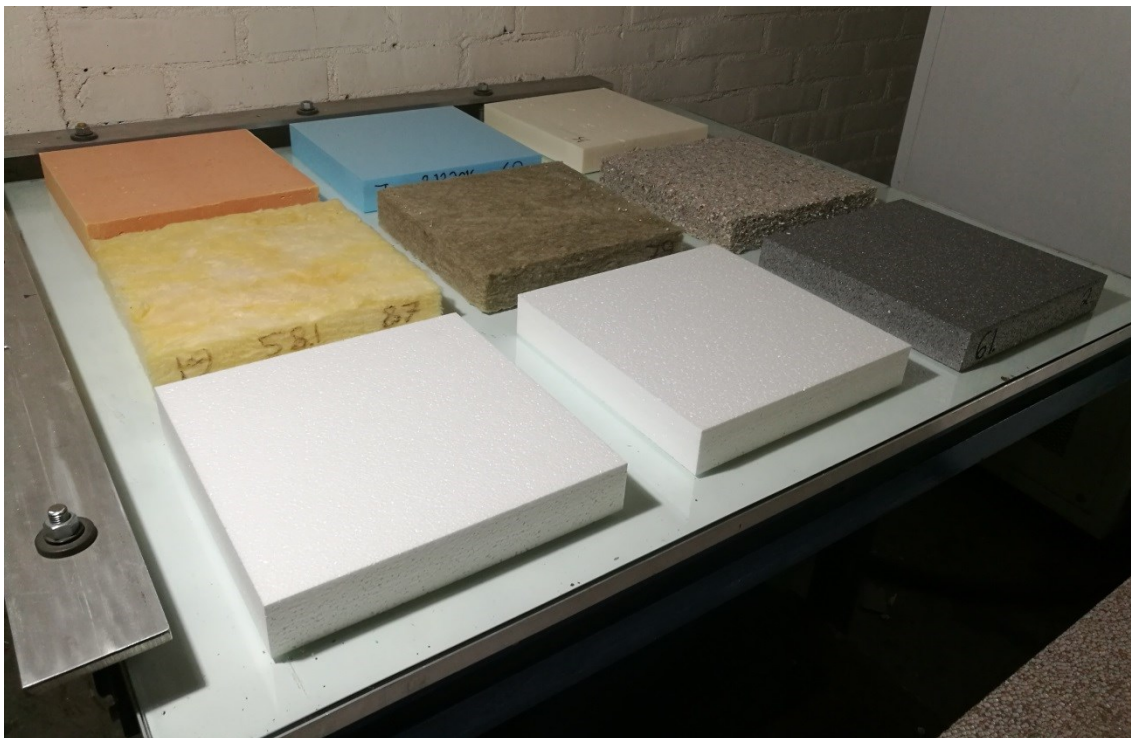
Tutkimukseen valittiin sellaisia eristelaatuja, joita käytetään Suomessa tyypillisesti lämmöneristemateriaalina. Työn tilaajana on EPS-lämmöneristevalmistaja, joten tilaajan mielenkiinto kohdistuu erityisesti erilaisten EPS-lämmöneristeiden ominaisuuksiin. Tämän vuoksi EPS-eristeistä tutkitaan useita laatuja. Samalla saadaan havainnollistettua eristeen tiheyden vaikutusta materiaalin lämmönjohtavuuteen.

Tutkimukseen valittiin seuraavat lämmöneristetuotteet:

- EPS: ThermiSol EPS 60S Lattia
- EPS: ThermiSol EPS 100S Lattia
- EPS: ThermiSol Platina Lattia
- XPS: BEWI XPS 300
- PIR: Kingspan Therma TP10
- Fenoli: Kingspan Kooltherm K15
- Kivivilla: Paroc eXtra
- Lasivilla: Isover KL37
- Puukuitueriste: Ekovilla Levy

Mittauksia varten hankittiin kutakin tutkittavaa materiaalia kolme myyntipakkausta. Paketit pyrittiin valitsemaan mahdollisuuksien mukaan eri valmistuseristä, jotta saatiin pienennettyä valmistuseräkohtaisien erojen vaikutusta tuotelaadussa. Fenolieristelevyn paksuudeksi jouduttiin saatavuusongelmien vuoksi valitsemaan 120 mm. Muiden tutkittavien eristeiden nimellinen paksuus oli 50 mm. Tutkittavat näytteet hankittiin lokakuun 2016 ja helmikuun 2017 välisenä aikana. Niiden valmistusajankohta vaihtelee elokuun 2015 ja helmikuun 2017 välillä.

Kuvassa 4.1 on määrämittaan leikatut näytekappaleet. Kuvassa takarivissä vasemmalla oranssinvärinen levy on fenolieristettä. Fenolilevyn vieressä ovat XPS- ja PIR-eristelevyt. Keskimmaisessä rivissä vasemmalla kellertävä levy on lasivillalevy, keskellä kivivilla ja oikealla puukuitulevy. Eturivissä on kaksi valkoista EPS-levyä ja harmaa EPS Platina –levy. Kuhunkin levyyn kirjattiin leikkaamisen yhteydessä näytteen numero.



Kuva 4.1. Näytekappaleet 300x300 mm².

4.2 Mittausten suorittaminen

Mittauslämpötiloiksi valittiin -30 °C, -10 °C, 0 °C, +10 °C ja +30 °C keskilämpötilat. Valittu alue kattaa tyypilliset lämmöneristämiseen liittyvät tilanteet Lapin pakkasista kesän hellepäivien olosuhteisiin.

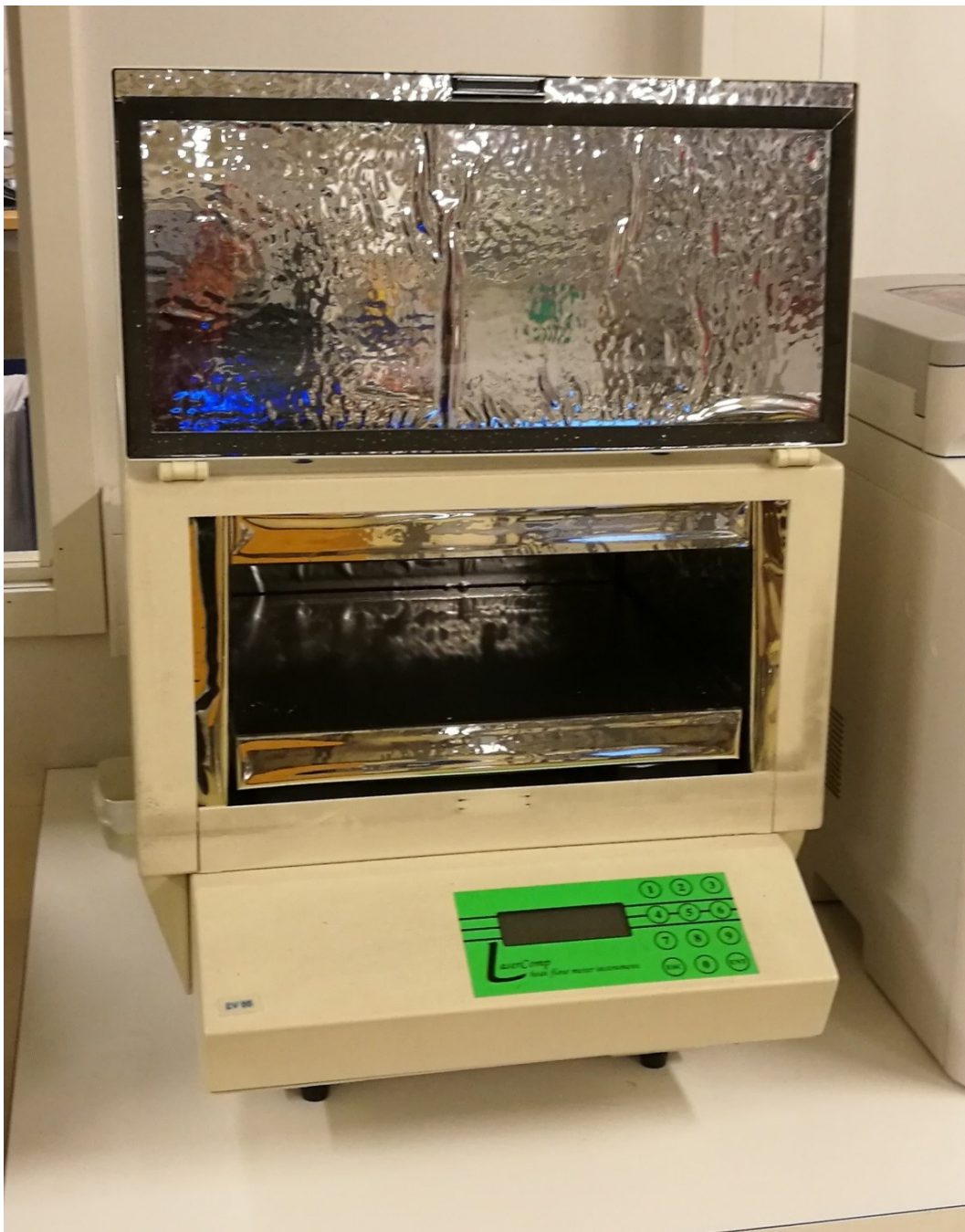
Ennen mittausten aloittamista, näytteitä säilytettiin lämpimissä sisätiloissa, noin +21 °C lämpötilassa useiden viikkojen ajan. Määrämittoihin leikatut näytteet punnittiin ja niiden paksuus mitattiin ennen mittauksia. Mittaukset suoritettiin laboratorio-olosuhteissa. -10 °C – +30 °C lämpötiloissa tapahtuvat mittaukset tehtiin ThermiSol Oy:n laboratoriossa FOX 314 -lämpövirtalevylaitteella. FOX 314 -laitteella voidaan alimmillaan mitata lämmönjohtavuuksia -10 °C lämpötilassa, joten -30 °C lämpötilassa suoritettavat mittaukset täytyi tehdä muualla. Mittauslaboratorioksi valittiin Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) Ranskassa, jossa on käytettävissä suojattu kuumalevylaitte. Ranskassa olisi ollut mahdollista tehdä kaikki mittaukset, mutta ne päätettiin tehdä kahdessa eri paikassa ajan ja kustannusten säästämiseksi.

Suojatulla kuumalevylaitteella tehtiin yhdelle EPS 100S -näytteelle lämmönjohtavuusmittaukset kaikissa tutkittavissa lämpötiloissa. Saaduista mittaustuloksista koottiin vertailukäyrä, jonka avulla saatiin selvitettyä kahden eri mittalaitteen mittaustarkkuuksista johtuva tulosten välinen ero. Vertailukäyrää tarkastellaan luvussa 5.2.

4.3 Mittalaitteet

4.3.1 Lämpövirtalevyalaite

ThermiSolilla tehtävissä mittauksissa käytettävä mittalaite on standardin ISO 8301 mukainen lämpövirtalevyalaite. Laitteen valmistaja on TA Instruments ja malli FOX 314. Mittalaite on kuvassa 4.2. Kuvassa laitteen luukku on auki. Mittaustilanteessa luukku on kiinni ja laite sulkee näytteen sisäänsä. Tutkittava näyte asetetaan lämpövirtalevyjen väliin ja mittaustilanteessa levyt painuvat tutkittavaa näytettä vasten.

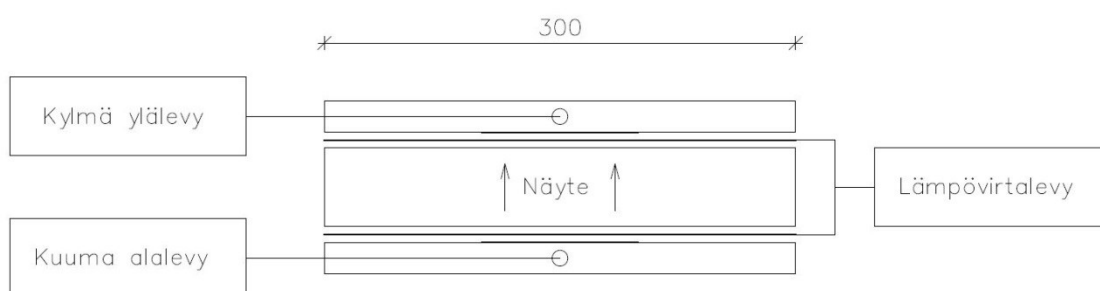


Kuva 4.2. Lämpövirtalevyalaite.

Mittalaite on kalibroitu 50 mm paksuille näytteille ja kaikille mittauksessa käytettäville lämpötiloille. Tulosten tarkkuuden varmistamiseksi laite kalibroidaan kuukausittain 50 mm paksulla EPS-levyllä, jonka lämmönjohtavuusominaisuudet on määritelty VTT:n laboratoriossa. Laitevalmistaja on ilmoittanut mittalaitteen mittaustarkkuudeksi ± 2 %. Mittalaitteessa käytettävän näytteen koko on 300×300 mm² ja laitteen mittausalue on näytteen keskellä 100×100 mm² suuruinen alue (TA Instruments 2017).

Lämpövirtalevyalaite koostuu kuvan 4.3 mukaisesti ylä- ja alalevystä, jotka voidaan kuumentaa tai jäähdyttää. Näytteen molemmilla puolilla on lämpövirtalevy. Levyjen ympärillä on suojakuori. Mittausta suoritettaessa ylä- ja alalevyn välille asetetaan lämpötilaero, jolloin niiden väliin syntyy lämpövirta. Lämpövirran suuruus saadaan mitattua lämpövirtalevyillä ja sen avulla selvitetään materiaalin lämmönjohtavuus. Tutkittava mittaustilapötila on ylä- ja alalevyn välinen keskilämpötila ja lämmönjohtavuus on lämpövirtalevyjen mittaamien lämmönjohtavuusarvojen keskiarvo. (RIL 255-1-2014 2014, s. 345)

Tutkimuksessa lämpövirran suunta kulkee alhaalta ylöspäin, eli alalevy on lämpimämpi kuin ylälevy. Kuvaan 4.3 lämpövirran suunta on merkitty nuolella. Levyjen väliseksi lämpötilaeroksi on tässä tutkimuksessa määritetty 20 °C kaikissa tutkittavissa lämpötiloissa.



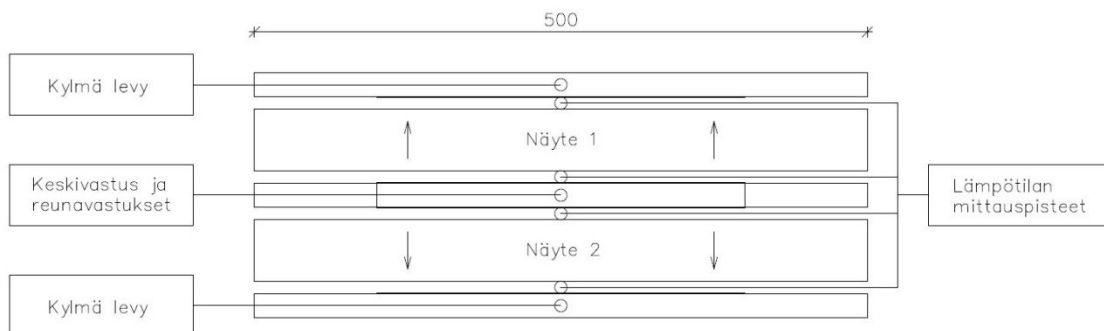
Kuva 4.3. Lämpövirtalevylaitteen rakenne (SFS-EN 12667 2001).

Esimerkiksi λ_{10} eli lämmönjohtavuus $+10$ °C lämpötilassa mitataan siten, että mittauksen aikana alalevyn lämpötila on $+20$ °C ja ylälevyn lämpötila 0 °C. Laite mittaa lämmönjohtavuuden arvon näytteen alapinnassa ja yläpinnassa ja ilmoittaa arvon λ_{10} , joka on näiden arvojen keskiarvo.

4.3.2 Kuumalevylaitte

Ranskassa, LNE:n mittaustaliossossa käytettävä mittalaite on standardin ISO 8302 mukainen suojattu kahden näytteen kuumalevylaitte. Laitteen mittaustarkkuus -30 °C lämpötilassa on ± 4 %. Laitetta ei tarvitse kalibroida, koska siinä lämmönjohtavuuden määrittäminen tapahtuu suoraan mitatuista arvoista (RIL 255-1-2014 2014, s. 346).

Kuumalevylaitteen rakenne on esitetty kuvassa 4.4. Laitteessa on lämpöä tuottava keskivastus ja sitä suojaavat reunavastukset. Laitteiston ylä- ja alapinnassa on niin sanotut kylmät levyt. Vastuksien ja kylmien levyjen pinnassa on lämpötilaa mittaavat anturit. Lämpövirran suunnat on merkitty kuvaan 4.4 nuolella. (SFS-EN 12667 2001, RIL 255-1-2014 2014, s. 346)



Kuva 4.4. Kuumalevylaitte (SFS-EN 12667 2001).

Koekappaleet asetetaan keskivastuksen molemmiin puolin. Mittaustilanteessa keskivastusta lämmitetään tietyllä teholla. Reunavastuksiin asetetaan sama lämpötila kuin keskivastukseen, jotta kaikki lämpövirta tapahtuisi suoraan koekappaleen läpi, eikä keskivastuksesta reunavastukseen. Kylmien levyjen ja keskivastuksen välinen lämpötilaero on 20 °C. Mittaus on valmis, kun koko koejärjestelyssä on tasapaino lämpötilan suhteen. Koekappaleen lämmönjohtavuus määritetään kulutetun lämpöenergian, lämpötilaeron ja koekappaleen paksuuden perusteella. (SFS-EN 12667 2001, RIL 255-1-2014 2014, s. 346)

4.4 Virhelähteet

Mittausvirheitä voi aiheutua muun muassa tutkittavien materiaalien mittauspintojen epätasaisuuden, laitteen tarkkuuden ja mitattavan materiaalin kosteuspitoisuuden vuoksi. Virheen suuruutta mittaustuloksissa on pyritty vähentämään tekemällä paljon mittauksia eri valmistuserien tuotteille.

Tulosten analysoinnissa mittaustulokset sovitetaan samaan kuvaajaan. Materiaalien lämmönjohtavuusarvo -30 °C lämpötilassa saattaa olla hieman virheellinen muihin mittaustuloksiin verrattuna, koska mittaustilasto on eri kuin muilla näytteillä. Virheen suuruutta pyritään kuitenkin arvioimaan vertailukäyrän avulla ja tarvittaessa pyritään löytämään sopiva kerroin, jolla mittaustulos -30 °C lämpötilassa saadaan muutettua vertailukelpoiseksi muiden mittaustulosten kanssa.

Villaeristeiden mittaustulokset voivat erota hieman materiaalin oikeasta lämmönjohtavuudesta, sillä muista tutkittavista eristeistä poiketen materiaali ei ole tasalaatuista vaan siinä on paljon epätasaisuuksia esimerkiksi kuitujen asettumisessa. Tämä saattaa aiheuttaa joillakin paikoin suurempaa ja joillakin kohdin pienempää lämpövirtaa materiaalin

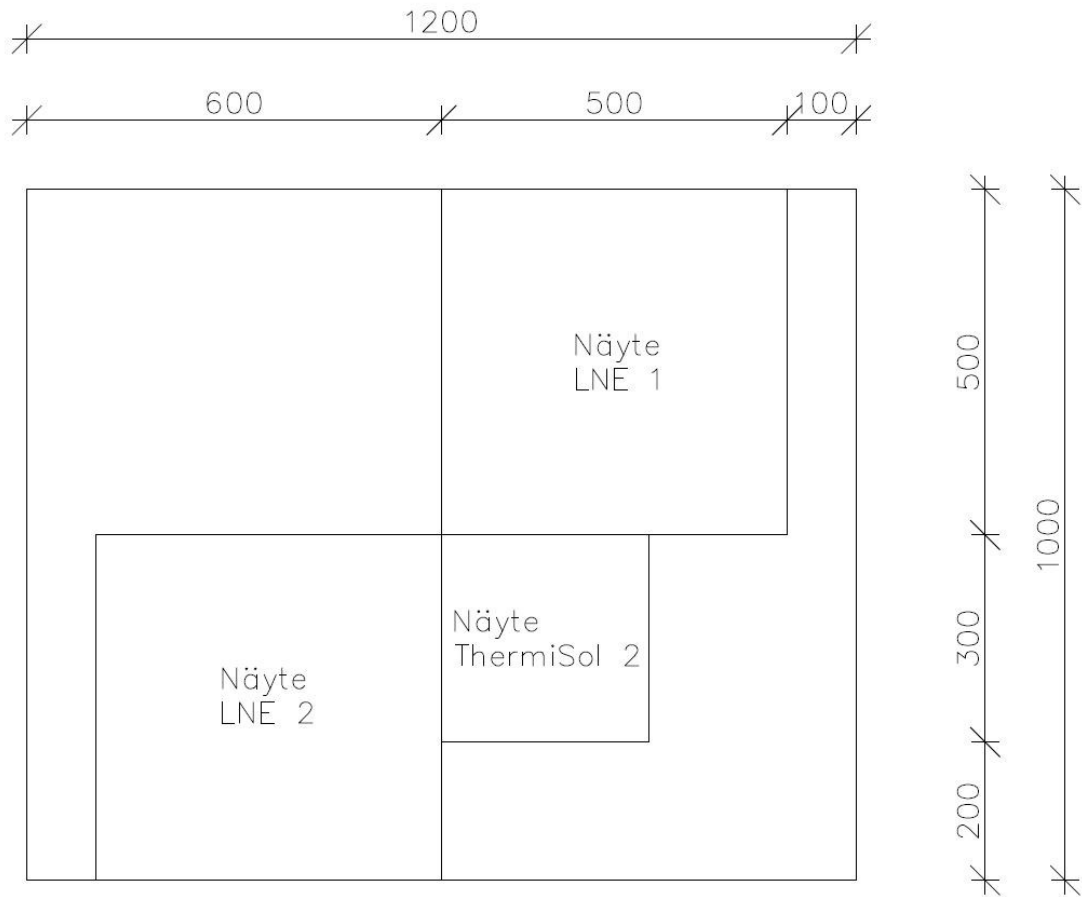
läpi kuin keskimäärin. Tätä virhettä pystytään kuitenkin tasoittamaan suurella näyttemäärällä.

Lämpövirtalevylaitteen toimittajan mukaan mineraalivilla- ja puukuitueristeiden lämmönjohtavuutta mitataan tyypillisesti isommalla laitteella ja näytekoolla kuin FOX 314 –laitteeseen mahtuu. Mittausalueen ollessa suurempi materiaalin epätasaisuudet eivät aiheuta niin merkittävää epätarkkuutta tuloksessa.

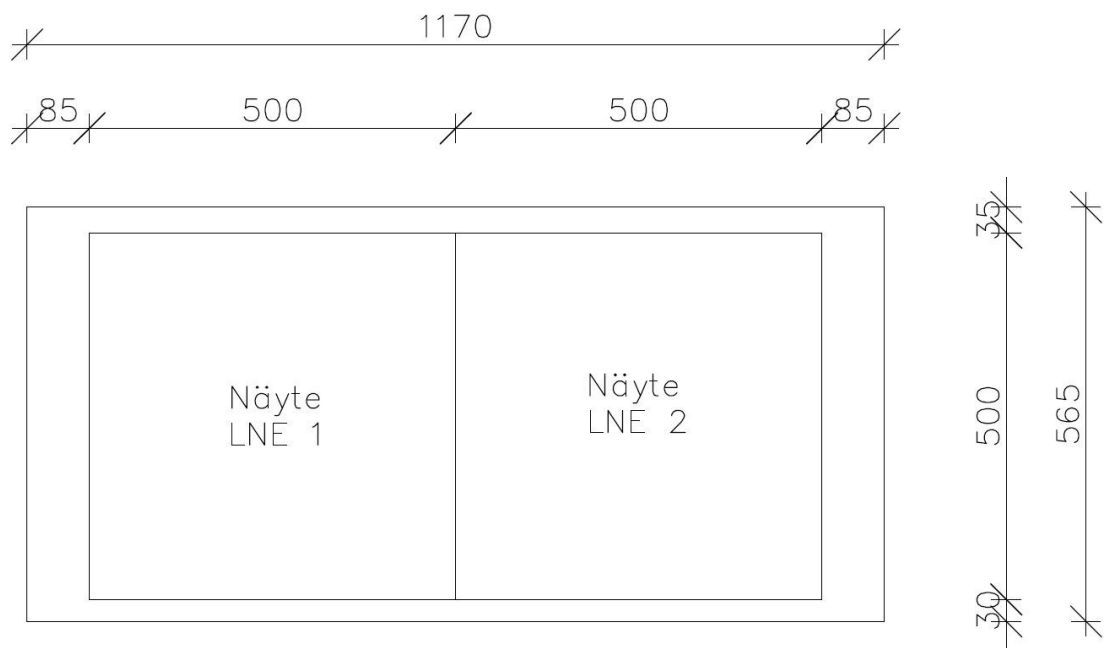
4.5 Näytteet

Mittauksia varten tehtiin kahdenlaisia näytteitä, koska -30 °C lämpötilassa tehtävät mittaukset suoritettiin eri laboratorioissa ja erilaisella mittalaitteella kuin muut mittaukset. Kuumalevylaitteella -30 °C lämpötilassa tehtäviä mittauksia varten otettiin kustakin eristepaketista keskimäinen levy, josta leikattiin kaksi suuruudeltaan $500\times 500\text{ mm}^2$ olevaa näytepalaa. Näytteitä otettiin kustakin materiaalista yhteensä kuusi kappaletta ja niillä saatiin tehtyä kolme mittausta, koska kussakin mittauksessa tarvitaan kaksi näytettä. Yhdessä mittauksessa testataan molemmat yksittäisestä levystä otetut näytteet samanaikaisesti ja mittauksia tehdään kolme kustakin materiaalista. Mittaustapa esiteltiin tarkemmin luvussa 4.3.2.

Muissa lämpötiloissa tehtäviä mittauksia varten otettiin kolmesta paketista kolme näytettä kustakin. Näytteet olivat kooltaan $300\times 300\text{ mm}^2$. Näytteet otettiin mahdollisuuksien mukaan paketin keskimmaisesta eristelevystä, sekä paketin toiseksi ylimmästä ja toiseksi alimmasta eristelevystä. Joissakin materiaaleissa keskimäinen levy kului kokonaisuudessaan kuumalevylaitteessa käytettäviin näytteisiin. Näissä tapauksissa otettiin keskimmaisesta levystä nähden seuraava levy ja leikattiin näyte sen keskiosasta. Kuvassa 4.5 on esitetty $1000\times 1200\text{ mm}^2$ suuruisen levyn leikkaustapa. Tällä tavoin leikattiin esimerkiksi EPS-eristelevyt. Kuvassa 4.6 on pienemmän, $565\times 1170\text{ mm}^2$ kokoisien levyn leikkaustapa. Samaa leikkaustapaa sovellettiin $600\times 1200\text{ mm}^2$ suuruisiin levyihin. Kaksi suurempaa näytepalaa leikattiin levyistä kuvan 4.6 mukaisesti ja pienempi näyte otettiin seuraavan levyn keskeltä. Muun muassa kivivilla ja XPS-eristeet leikattiin kuvan 4.6 mukaisesti.

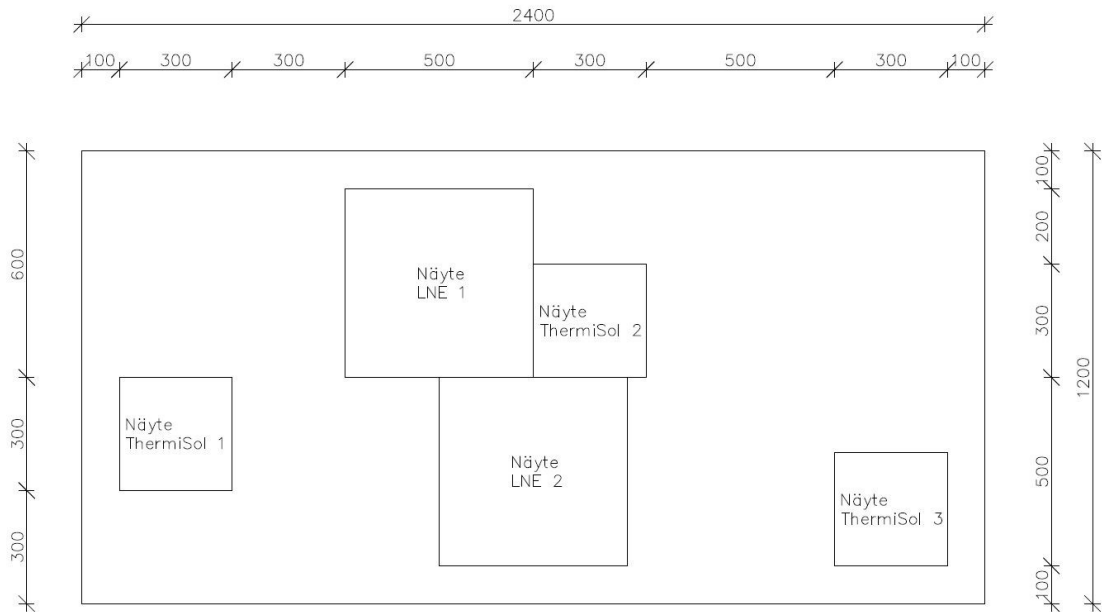


Kuva 4.5. Näytteenotto $1000 \times 1200 \text{ mm}^2$ kokoisesta levystä.



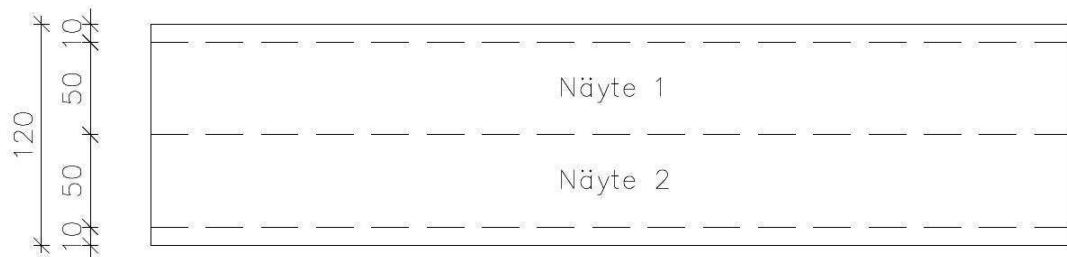
Kuva 4.6. Näytteenotto $565 \times 1170 \text{ mm}^2$ kokoisesta levystä.

Polyuretaanieristeet myydään isoina, 1200x2400 mm², kokoisina levyinä. PIR-levyjä ostettiin kolme kappaletta ja yksittäisen valmistuserän kaikki näytteet otettiin saman levyn eri kohdista kuvan 4.7 mukaisesti.

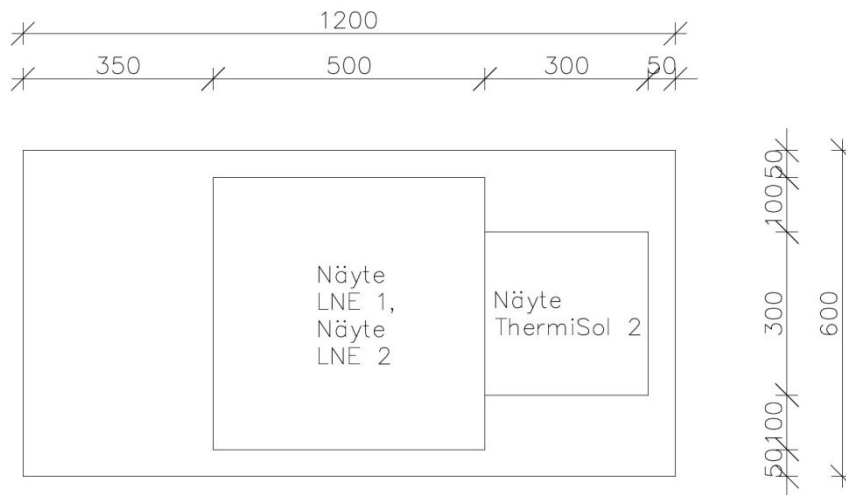


Kuva 4.7. Näytteenotto polyuretaanilevyistä.

Fenolieristeestä oli saatavilla vain 120 mm paksuja levyjä, joten ne jouduttiin ohentamaan 50 mm paksuiseksi kuvassa 4.8 esitetyllä tavalla. Leikkaustavan valinnassa tehtiin oletus, että materiaali olisi levyn keskilinjän molemmilta puolilta tiheyden ja lämmönjohtavuusominaisuuksien osalta symmetrinen. Tällöin yksittäiseen näytteeseen on mahdollista saada kaikki materiaalissa olevat eristetihetydet, jos niissä on vaihtelua ja siten luotettava arvo materiaalin lämmönjohtavuudelle. Suojattua kuumalevylaitetta käytettäessä käytettiin molemmat saadut 50 mm paksut näytteet. ThermiSolilla tehtävissä mittauksissa, joissa käytetään lämpövirtalevylaitetta, käytettiin vain näytettä 2. Fenolieristeen näytepalojen leikkaus on esitetty kuvassa 4.9.



Kuva 4.8. Fenolinäytteen ohentaminen.



Kuva 4.9. Näytteenotto fenolieristelevystä.

Tutkittavista näytteistä PIR- ja fenolieristelevyt olivat pinnoitettu foliomaisella pinnoitelevyllä. Mittausten valmistelussa oletettiin, että kalvoilla ei ole vaikutusta eristelevyn lämmönjohtavuuteen, koska ne ovat ohuita ja niiden lämmönjohtavuus oletettiin merkittävästi eristelevyn lämmönjohtavuutta suuremmaksi. Fenolieristeen pintakalvo poistettiin näytteen leikkauksen yhteydessä. Polyuretaanieristeestä irrotettiin pintakalvot repimällä. Eristemateriaalin pinta oli epätasainen, joten kalvon alla ollut epätasainen pinta myös hiottiin riittävän tasaiseksi, jotta mittalaitteen mittauspinta saatiin tiiviisti eristelevyä vasten. Mikäli mittauspintojen väliin olisi jäänyt suuria ilmakuplia, ei mittaus onnistuisi tai saatu mittaustulos voisi olla virheellinen.

4.6 Tutkimuksen rajaukset

XPS-, PIR- ja fenolieristeiden tuotestandardit vaativat, että tuotteet vanhennetaan ennen mittausta, koska niiden lämmönjohtavuusominaisuudet muuttuvat eristeiden ikääntyessä. Eristeiden tuotestandardissa on määritetty, miten tuotteet tulee vanhentaa.

Standardeissa määritetty ensimmäinen mittaajankohta on materiaalista riippuva. Tyyppillisesti vanhennus tehdään kuitenkin vain joitain päiviä tai viikkoja vanhalle eristeelle. Tässä tutkimuksessa käytettävät eristeet ovat pääasiassa huomattavasti vanhempia: Esimerkiksi fenolieristeiden valmistamisesta oli mittausten aikaan jo n. 1,5 vuotta. Vanhentamisprosessi olisi myös vienyt diplomityön valmistumisen kannalta liian paljon aikaa tutkimukselle, joten eristeiden lämmönjohtavuudet mitattiin vanhentamattomana.

Vanhentamattomilla eristeillä saadaan havainnollistettua lämmönjohtavuuden muutoksia voimakkaammin kuin vanhennetuilla, koska niissä on enemmän ilmaa tehokkaammin lämpöä eristävää kaasua. Berardi ja Naldi havaitsivat tutkimuksessaan (2017), että PIR-eristeen lämmönjohtavuus heikkenee kylmässä. Voidaan olettaa, että lämmönjohtavuuden heikentyminen vanhentamattomalla eristeellä on voimakkaampaa kuin mitä se

olisi vanhennetulla eristeellä, koska vanhentamattomassa eristeessä pentaanin osuus solun sisällä olevasta kaasusta on suurempi. Vanhennetuilla eristeillä mittaustulokset olisivat luultavasti lähempänä niiden eristeiden mittaustuloksia, joiden lämmöneristävyys perustuu ilmaan, koska vanhentamisella pyritään ilmentämään pitkän ajan kuluessa tapahtuvaa ilman diffuusiota eristeen soluihin (RIL 255-1-2014 2014, s. 266).

Mittauksista on myös rajattu pois kosteuden vaikutus lämmönjohtavuuteen. Kuten luvussa 2.5 todettiin, ilmassa olevalla kosteudella ei ole havaittu olevan merkittävää vaikutusta mineraalivillaeristeiden lämmönjohtavuuteen. Puupohjaisille materiaaleille kosteudella sen sijaan on havaittu heikentävä vaikutus lämmönjohtavuuteen. (Vinha et al. 2005, s. 41) Tässä tapauksessa kaikkia näytteitä säilytettiin samassa kuivassa huonetilassa useita viikkoja, joten oletetaan, että kaikkien materiaalien kosteus ja lämpötila olivat mittauksen alkaessa sama ja siten tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään. Huonetilan lämpötila oli noin 21–23 °C ja suhteellinen kosteus noin 30–60 % RH. Tutkimuksessa ei myöskään selvitetty vaikutusta, mikä olisi, jos eriste kastuisi esimerkiksi vesi- tai lumisateessa rakennusvaiheessa. Jatkotutkimuksissa olisi syytä selvittää eristeen kastumisen ja jään aiheuttamaa vaikutusta lämmöneristävyteen myös muovieristeillä.

Mittaustulosten analysoinnissa keskitytään saatujen mittaustulosten käytännön hyödyn-tämismahdollisuuksiin rakennesuunnittelussa. Syvempi paneutuminen esimerkiksi kaasujen ominaisuuksiin eri lämpötiloissa, kaasujen koostumus tai lämmön siirtymisosuudet eri siirtymistapojen välillä kuuluvat materiaalitekniikan osa-alueeseen.

5. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

5.1 Valmistajan ilmoittama lämmönjohtavuus

Taulukossa 5.1 on esitetty valmistajien myyntipakkauksissaan ilmoittamat CE-merkinnän mukaiset lämmönjohtavuusarvot tutkittaville materiaaleille. Lisäksi taulukoon on kirjattu eristeille LNE:n laboratoriossa näytteille mitattujen tiheyksien keskiarvo. Eristeiden lämmönjohtavuudet ovat keskenään hyvin erilaisia vaihdellen fenolieristeen arvosta 0,020 W/(m·K) EPS 60 -eristeen ja puukuitueristeiden arvoon 0,039 W/(m·K).

Taulukko 5.1. Ilmoitetut lämmönjohtavuudet ja materiaalien tiheys.

Materiaali	Tuotenimi	λ_D [W/(m·K)]	tiheys [kg/m ³]
EPS	ThermiSol EPS 60S Lattia	0,039	16,3
EPS	ThermiSol EPS 100S Lattia	0,036	19,3
EPS	ThermiSol Platina Lattia	0,031	16,0
XPS	BEWi XPS 300	0,034	28,4
PIR	Kingspan Therma TP10	0,022	28,9
Fenoli	Kingspan Kooltherm K15	0,020	36,5
Kivivilla	Parox eXtra	0,036	33,8
Lasivilla	Isover KL37	0,037	14,9
Puukuitu	Ekovilla Levy	0,039	44,3

Ilman lämmönjohtavuus on noin 0,024 W/(m·K) (Young & Freedman 2008, p. 592). Ilman eristävyteen perustuvista materiaaleista EPS Platina –eristeellä on pienin ilmoitettu lämmönjohtavuus. Kuitenkin myös Platinan lämmönjohtavuus on noin 30 % suurempi kuin ilman lämmönjohtavuus. Suurin lämmönjohtavuus on puukuitueristeellä ja EPS 60 –eristeellä, joiden lämmönjohtavuus on yli 60 % suurempi kuin ilman lämmönjohtavuus. Voidaan siis todeta, että tutkittavien lämmöneristemateriaalien kiinteän osan tiheydellä ja lämmönjohtavuudella on merkitystä eristeiden lämmönjohtavuuteen. EPS-materiaalista todettiinkin luvussa 3.1, että sen lämmöneristävyys on parhaimmillaan, kun materiaalin tiheys on 30–50 kg/m³.

Diplomityön tekstissä esitetään vain keskiarvoja saaduista mittaustuloksista. Liitteeseen A on koottu kaikki ThermiSolilla saadut mittaustulokset. Liitteenä B on LNE:n tutkimusraportti.

5.2 Vertailukäyrä

Koska mittauksia suoritettiin kahdessa eri paikassa, haluttiin selvittää mittaustulosten välinen ero Ranskassa ja ThermiSolin laboratoriossa tehdyissä mittauksissa. Tästä syystä 30.1.2017 valmistetun ThermiSol EPS 100S Lattia –eristepaketin keskimmäisen levyyn lämmönjohtavuus mitattiin Ranskassa kaikissa tutkittavissa lämpötiloissa (-30 °C, -10 °C, 0 °C, +10 °C ja +30 °C). Levy vastaa ThermiSolilla tutkittua näytettä numero 29.

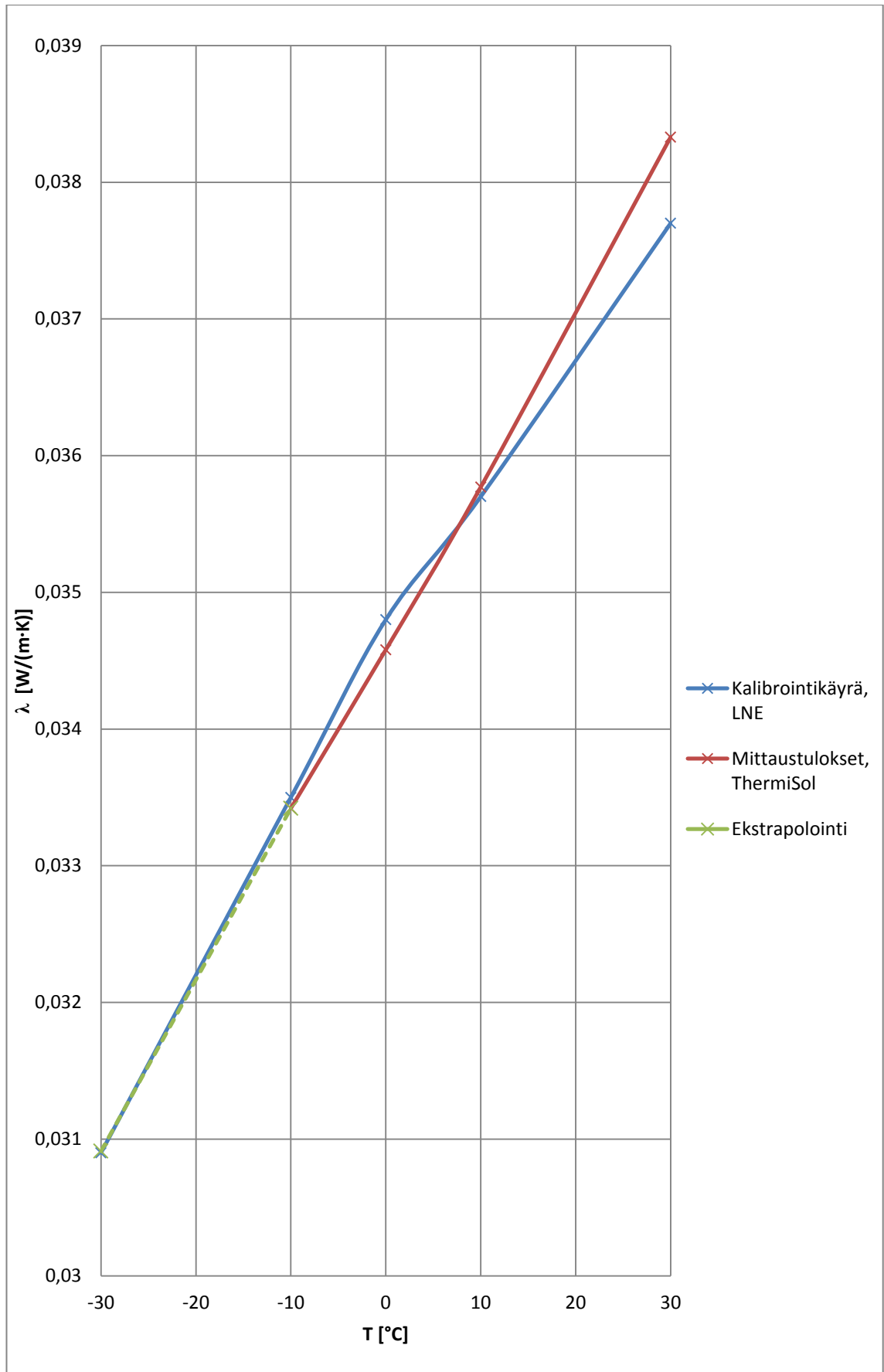
Taulukossa 5.2 ja kuvassa 5.1 on Ranskassa mitatun vertailukäyrän arvot ja ThermiSolilla saadut mittaustulokset samasta eristelevystä leikatuille näytteille. Aiemmissa tutkimuksissa on havaittu, että lämpötilan vaihtelun aiheuttama muutos lämmönjohtavuudelle EPS:llä on lineaarinen.

ThermiSolin laboratoriossa saadut mittaustulokset muodostavat kuvassa 5.1 suoran. Sen sijaan Ranskassa saadut mittaustulokset sen sijaan eivät asetu suoralle, joten oletetaan, että ThermiSolin laboratoriossa mitatut tulokset ovat luotettavia ilman korjauskerrointen käyttöä. Tätä puoltaa myös Ranskan mittalaitteen suurempi epätarkkuus.

ThermiSolilla tehtyjen mittausten tuloksia on ekstrapoloitu käyttäen Excelin suuntausfunktiota. Funktion avulla saatiin arvio ThermiSolin mittalaitteen ilmoittamasta lämmönjohtavuudesta -30 °C lämpötilassa, jos laitteen mitta-alue ylettyisi riittävän kylmään. Tämä tulos on merkitty taulukkoon 5.2 harmaalla taustalla ja kuvaan 5.1 katkoviivalla. Suuntausfunktion avulla arvioitu tulos on sama kuin Ranskassa mitattu lämmönjohtavuuden arvo, joten oletetaan, että mittaustuloksia käsiteltäessä molemmissa laboratorioissa saatuja mittaustuloksia voidaan hyödyntää sellaisenaan ilman korjauskertoimia.

Taulukko 5.2. Mittaustulokset EPS 100S ThermiSolilla ja Ranskassa.

	λ_{-30}	λ_{-10}	λ_0	λ_{10}	λ_{30}
LNE	0,0309	0,0335	0,0348	0,0357	0,0377
ThermiSol	0,0309	0,0334	0,0346	0,0358	0,0383
ERO (%)	0,04	0,24	0,64	0,20	1,64



Kuva 5.1. Kalibrintikäyrä.

-30 °C lämpötilassa saatujen mittaustulosten soveltamista sellaisenaan arvioitiin koko tutkimuksen ajan, kun tutkittiin muiden materiaalien mittaustuloksia. Kaikilla materiaaleilla, joiden mittaustulokset muodostavat suoran tai lähes suoran, Ranskassa mitattu lämmönjohtavuus -30 °C lämpötilassa sopi samaan kuvaajaan melko hyvin. Voidaan siis olettaa, että -30 °C lämpötilan mittaustulosta voidaan käyttää sellaisenaan.

5.3 Mittaustulokset

5.3.1 Mittaustulosten yhteenveto

Taulukossa 5.3 on mittaustulosten keskiarvot kussakin lämpötilassa. Yksittäisten mittaustulosten arvot ja keskihajonnat ovat nähtävillä liitteissä A ja B.

Taulukko 5.3. Mittaustulosten keskiarvo.

	λ_{-30} [W/(m·K)]	λ_{-10} [W/(m·K)]	λ_0 [W/(m·K)]	λ_{10} [W/(m·K)]	λ_{30} [W/(m·K)]
ThermiSol EPS 60S Lattia	0,033	0,036	0,037	0,038	0,041
ThermiSol EPS 100S Lattia	0,031	0,033	0,034	0,035	0,038
ThermiSol Platina Lattia	0,027	0,029	0,030	0,031	0,033
BEWI XPS 300	0,030	0,033	0,034	0,035	0,038
Kingspan Therma TP 10	0,027	0,024	0,022	0,021	0,023
Kingspan Kooltherm	0,022	0,021	0,019	0,020	0,022
Paroc eXtra	0,028	0,032	0,033	0,035	0,038
Isover KL-37	0,029	0,032	0,034	0,036	0,040
Ekovilla Levy	0,032	0,036	0,038	0,039	0,042

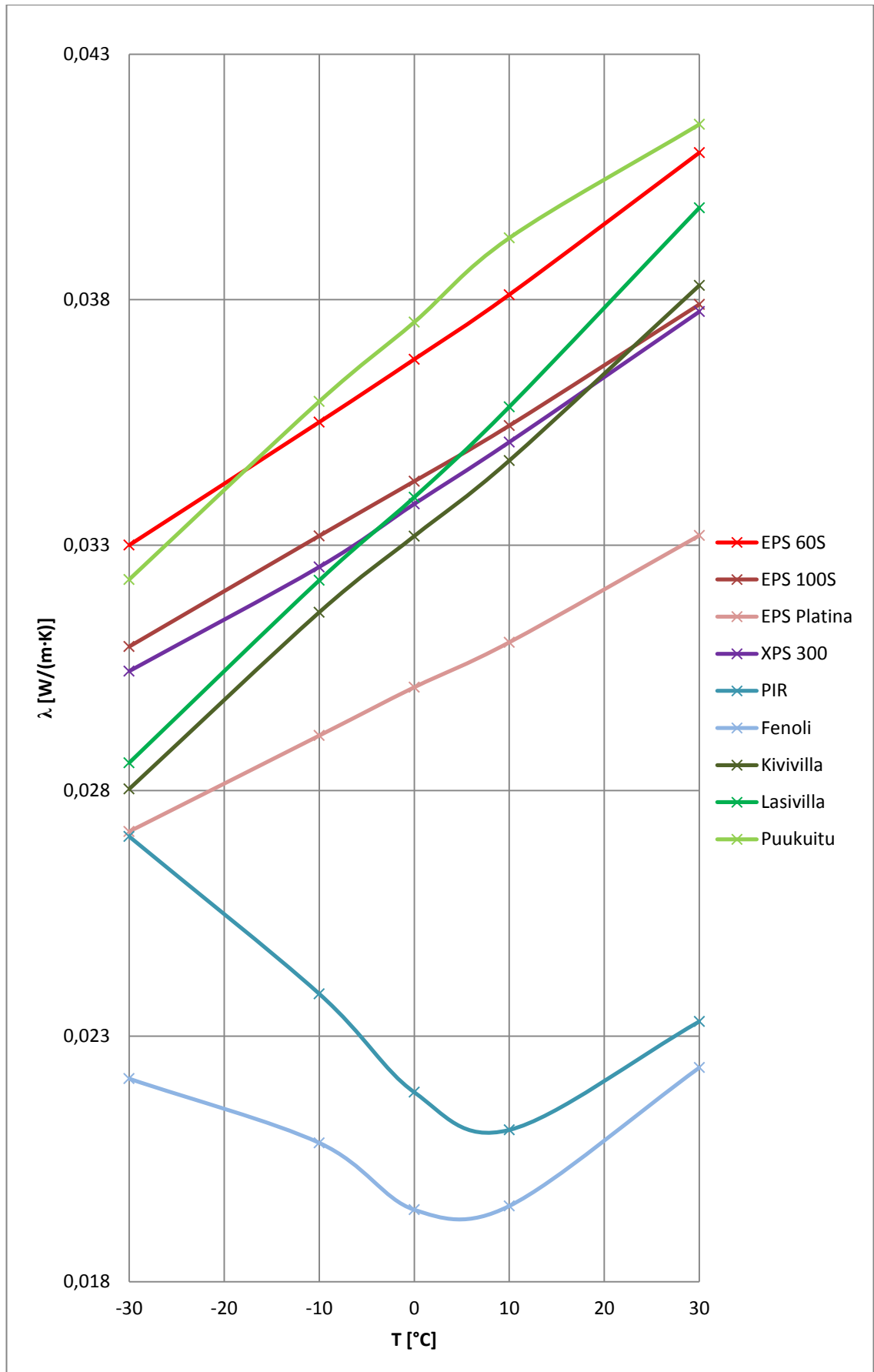
Kuvassa 5.2 on esitetty graafisesti eristeiden lämmönjohtavuuden muutos lämpötilan funktiona. Kuvassa 5.2 ja muissa tutkimuksen kuvaajissa olevat arvot ovat kussakin lämpötilassa saatujen mittaustulosten keskiarvoja. Materiaalikohtaiset mittaustulokset on eritelty luvuissa 5.3.2–5.3.4, jotta yksittäisten materiaalien mittaustuloksia on helpompi tutkia.

Kaikille tutkituille materiaaleille on yhteistä, että lämmönjohtavuus kasvaa lämpötilan noustessa. Ilmiö johtunee ensisijaisesti eristeessä olevan ilman tai muun kaasun lämmönjohtavuuden kasvamisesta lämpötilan noustessa (kuva 3.7) ja toissijaisesti eristemateriaalia pitkin tapahtuvasta lämmön johtumisen lisääntymisestä.

Kuvasta 5.2 havaitaan, että kylmissä lämpötiloissa materiaalien eristävyysominaisuudet eroavat toisistaan merkittävästi. Useimpien materiaalien lämmönjohtavuus pieneni kylmässä, kuten alun perin oletettiin. Näillä materiaaleilla lämmönjohtavuuden muutos oli myös lineaarinen. Polyuretaani- ja fenolieristeiden mittaustulokset poikkesivat merkit-

tävästi muista tuloksista, koska niiden lämmönjohtavuudet kasvoivat kylmissä lämpötiloissa ja kuvaaja muistutti paraabelia. Ilmiö on sama, mikä havaittiin PIR-eristeelle U. Berardin ja M. Naldin (2017) tutkimuksessa.

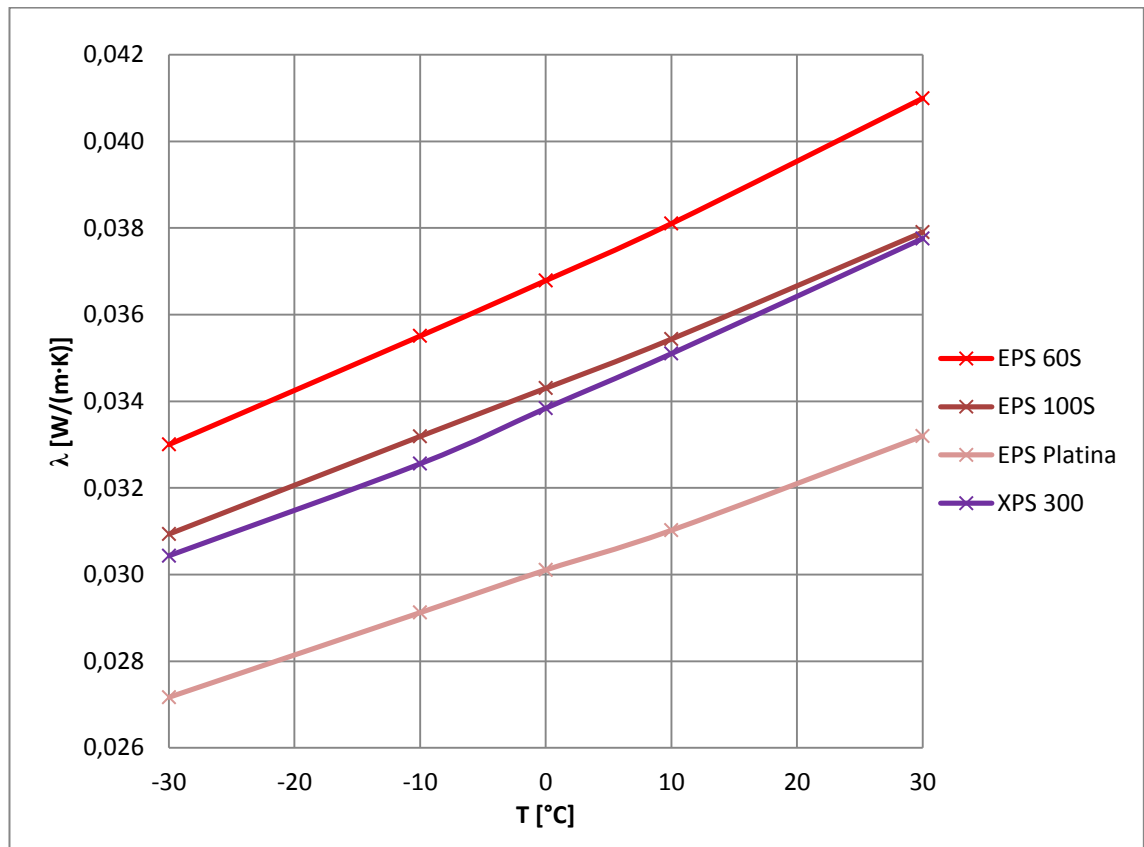
Keskenään samankaltaisten materiaalien lämmönjohtavuuden muutokset tapahtuvat jotakuinkin samalla muutosnopeudella. Polystyreenipohjaiset EPS- ja XPS-eristeet muodostavat muutosnopeuden perusteella ryhmän keskenään. Toinen ryhmä koostuu mineraalivilloista ja puukuitueristeestä. PIR- ja fenolieristeet käsitellään kolmantena ryhmänä. Luvuissa 5.3.1–5.3.3 analysoidaan saatuja mittaustuloksia ryhmäkohtaisesti.



Kuva 5.2. Yhteenveto mittaustuloksista.

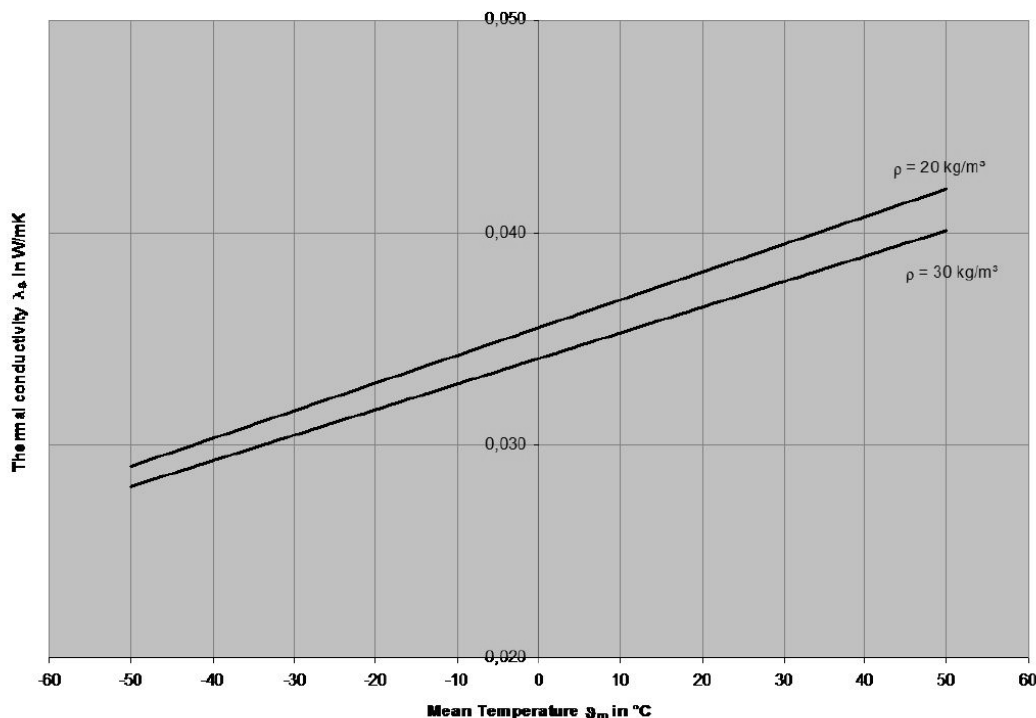
5.3.2 EPS- ja XPS-eristeet

EPS- ja XPS-eristeiden lämmönjohtavuuden muutoksen mittaustulokset on esitetty kuvassa 5.3. Lämmöneristeiden lämmönjohtavuus kasvaa lineaarisesti lämpötilan kasvaessa riippumatta eristeen tiheydestä. Lämmönjohtavuuden muutoksen kulmakerroin kuitenkin riippuu EPS-eristeen väristä ja tiheydestä. XPS-eristeen lämmönjohtavuus kasvaa hieman EPS-eristeiden lämmönjohtavuutta nopeammin.



Kuva 5.3. EPS- ja XPS-eristeiden mittaustulokset.

Mittaustulosten mukaan tiheämmän EPS 100S:n arvot kasvavat hieman hitaammin kuin 60S:n. Sama ilmiö voidaan havaita kuvasta 5.4, jossa on Euroopan EPS-järjestö EU-MEPS:n ilmoittamia arvoja lämmönjohtavuuksille eri lämpötiloissa kahdella eri tiheydellä. Tutkitun EPS 60S -eristeen tiheys oli $16,3 \text{ kg/m}^3$ ja EPS 100S -eristeen tiheys $19,3 \text{ kg/m}^3$. Tehdyissä mittauksissa EPS:n tiheyden ja lämmönjohtavuuden välinen yhteys on pienissä tiheyksissä raskaammalle eristeelle optimaalisempi kuin kevyemmälle, kuten luvussa 3.1 määritettiin.



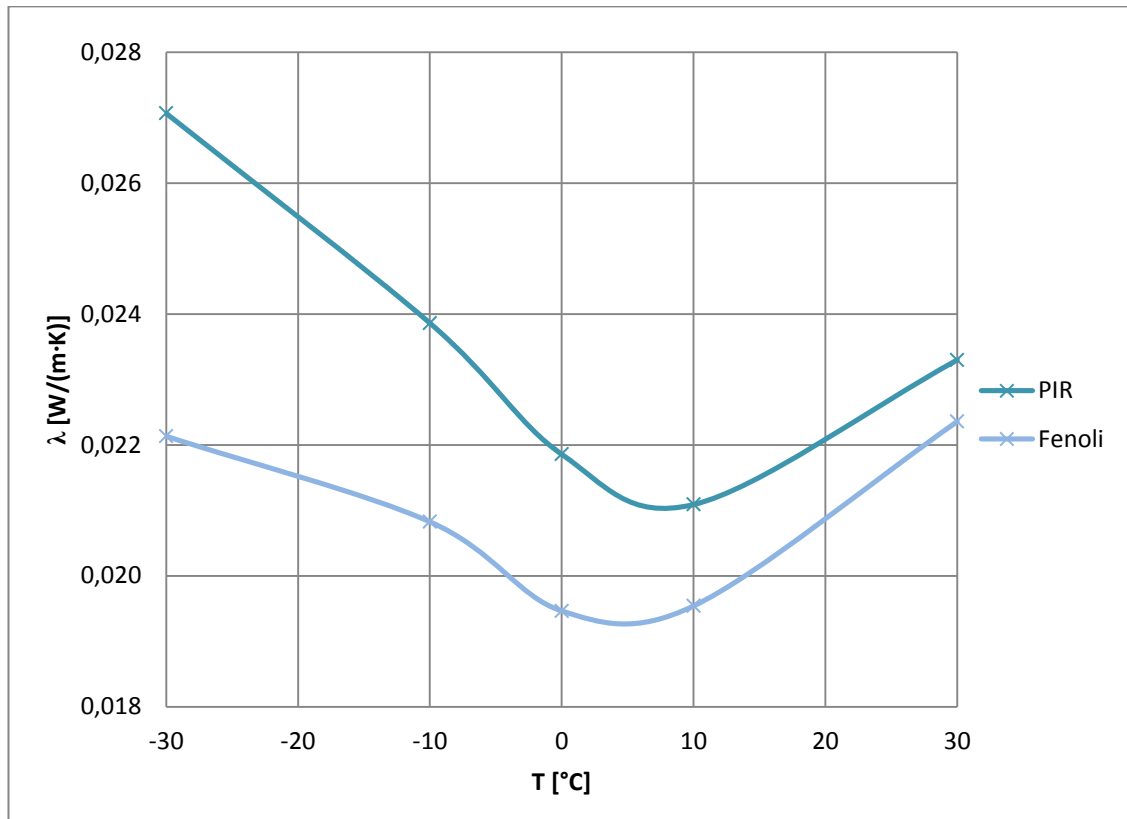
Kuva 5.4. Lämmönjohtavuus eri lämpötiloissa (Eumeps 2016, s. 22).

XPS:n lämmönjohtavuus kasvaa hieman nopeammin kuin EPS:n. Syy nopeampaan lämmönjohtavuuden kasvuun lienee XPS:ssä käytetty ponnekaasu, hiilidioksidi, jota eristeessä saattaa olla vielä jonkin verran, vaikka suurin osa siitä onkin jo korvaantunut diffuusion vaikutuksesta ilmalla. Kuvasta 3.7 havaittiin, että hiilidioksidin lämmönjohtavuus on ilmaa pienempi, mutta lämmönjohtavuus kasvaa hieman ilman lämmönjohtavuutta nopeammin. Molempien materiaalien raaka-aineena toimii polystyreeni. Lisäksi XPS on huomattavasti EPS-eristettä tiheämpää, jolloin materiaalin kiinteän osan lämmönjohtavuuden muutokset vaikuttavat enemmän materiaalin lämmönjohtavuuteen kuin EPS:llä.

XPS-eristeen tutkitut näytekappaleet eivät täyttäneet taulukossa 5.1 esitettyä lämmönjohtavuudelle ilmoitettua λ_D -arvoa $+10 \text{ °C}$ lämpötilassa. Kyseessä voi olla virhe mittalaitteistossa, mutta koska kaikki yksittäiset mittaustulokset antoivat jotakuinkin saman arvon ja myös Ranskan mittaustulos sopii suoralle, oletetaan että tulokset ovat oikein. Jos oletetaan, että tuotteet olisivat täyttäneet valmistajan niille ilmoittamat vaatimukset lämmönjohtavuuden muutosta kuvaavan kulmakertoimen pysyessä samana, olisivat kaikki mitatut arvot olleet noin $0,001 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ pienempiä ja XPS:llä ollut -30 °C lämpötilassa sama lämmönjohtavuus kuin lasivillalla $\lambda_{-30}=0,029 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

5.3.3 PIR- ja fenolieristeet

Pentaania sisältävien PIR- ja fenolieristeiden lämmönjohtavuus poikkeaa merkittävästi pelkkää ilmaa tai hiilidioksidia sisältävien eristeiden lämmönjohtavuudesta, sillä kuvan 5.5 mukaisesti niiden lämmönjohtavuus kasvaa siirryttäessä +10 °C lämpötilasta lämpimämpään ja viileämpään.



Kuva 5.5. PIR- ja fenolieristeiden mittaustulokset.

Polyuretaanin ja fenolin lämmönjohtavuus on parhaimmalla tasolla noin +4 – +8 °C lämpötilassa ja heikkenee sekä tätä lämpimämmässä että kylmemmässä lämpötilassa. Fenolieristeiden lämmönjohtavuus kasvaa kuitenkin kylmässä hieman hitaammin kuin PIR-eristeiden. Vastaavasti lämpimässä fenolin lämmönjohtavuus kasvaa nopeammin.

Kylmässä eristeiden lämmöneristävyysominaisuuksien heikkeneminen vaikuttaa vähitellen hidastuvan. Jatkotutkimuksissa olisikin hyvä selvittää lämmönjohtavuuden muutoksia vielä kylmemmissä lämpötiloissa: Miten pitkään lämmönjohtavuuden heikkeneminen jatkuu ja alkaako lämmönjohtavuus jopa pienentyä jossain vaiheessa?

Molempien eristeiden sisällä olevan kaasun oletetaan olevan pentaania lähdetietojen ja eristeiden samanlaisen lämpötilakäyttäytymisen perusteella. Tiedossa ei kuitenkaan ole, onko eristeiden sisältämä pentaani koostumukseltaan samanlaista vai onko niissä eroja, jotka selittäisivät kylmässä lämmönjohtavuuden kasvun kulmakertoimen eron. Jos pentaani on molemmissa eristeissä samanlaista, fenoli- ja PIR-eristeiden käyrien eroa kyl-

mässä selittävät erot eristeiden kiinteän osan lämmönjohtavuuksissa. Lisäksi fenolieristeet olivat pakkausten pakkausmerkintöjen mukaan mittaushetkellä yli kaksi vuotta vanhoja ja siten diffuusio on saattanut vaikuttaa eristävyysominaisuuksiin enemmän kuin PIR-eristeissä, jotka todennäköisesti ovat tuoreempia. PIR-eristeiden myyntipakkauksessa ei ollut valmistuspäivämäärää. Kaikki levyt olivat kuitenkin samasta myyntierästä, joten niiden valmistuspäivä on kaikilla sama. Muut tutkimuksessa käytetyt, rautakaupassa myydyt eristeet olivat pääsääntöisesti vuoden 2016 lopussa tai 2017 alussa valmistettuja, joten voidaan olettaa, että myös PIR-eristeiden valmistusajankohta olisi fenolieristeitä tuorempi.

PIR- ja fenolieristeen lämmönjohtavuuden heikkenemisen todennäköinen syy on, että pentaani saavuttaa kyllästyspitoisuutensa ja muuttuu nesteeksi kylmässä lämpötilassa (Berardi & Naldi 2017). Tällöin materiaalin eristävyysominaisuudet heikkenevät, kun lämpö siirtyy nestettä ja eristesoluja pitkin (Lienhard & Lienhard 2011, p. 53). Ilmiö vaikuttaa tapahtuvan molemmilla eristeillä noin $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa. Oletuksen varmistamiseksi täytyisi tuntea tarkemmin eristävän kaasun ominaisuudet ja eristesolun sisällä oleva paine, jotta voitaisiin arvioida, missä lämpötilassa saturaatio tapahtuu. Pentaanin kiehumispiste normaalissa ilmanpaineessa on noin $28\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Eaves 2004, p. 21).

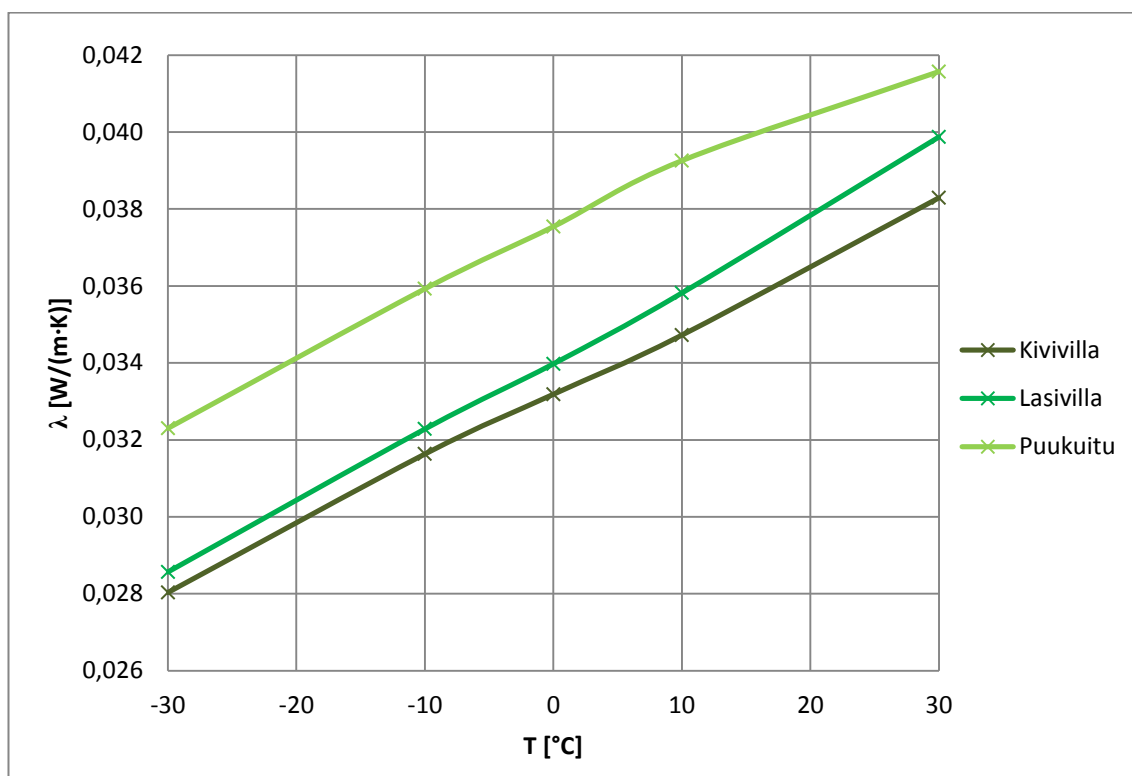
Kuvasta 5.2 nähdään, että polyuretaanin lämmönjohtavuus $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa on samalla tasolla harmaan EPS-eristeen kanssa ja vain hieman parempi kuin esimerkiksi mineraalivillaeristeillä. Jos oletetaan, että käyrät jatkavat käyttäytymistään mittausalueen ulkopuolella jotakuinkin samalla tavoin, PIR-eristeen lämmönjohtavuus on mittausaluetta kylmemmissä lämpötiloissa heikompi kuin useimpien tutkituista materiaaleista. Merkittävästi kylmempiin lämpötiloihin siirryttäessä muut eristeet saattavat saavuttaa myös fenolieristeen lämmönjohtavuuden.

Materiaaleille ilmoitettu lämmönjohtavuus ylittyy kylmiin lämpötiloihin siirryttäessä noin $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa ja siten esimerkiksi kylminä talvipäivinä käytetyn seinä- tai yläpohjarakenteen eristävyys saattaa siten olla oletettua pienempi. Tästä syystä rakennuksen lämmitystarve voi olla odotettua suurempi.

Berardin & Naldin tutkimuksessa (2017) havaittiin, että PIR-eristeen lämmönjohtavuus oli pienimmillään noin $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämmössä. Tutkimus on tehty Kanadassa, jossa lämmönjohtavuuden mittaustapa poikkeaa Suomen mittaustavasta siten, että lämmönjohtavuus mitataan $+23,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa. Mittaustuloksia vertaamalla vaikuttaa siltä, että tutkituissa eristeissä käytetyt kaasut olisivat pentaania, mutta ne eroavat toisistaan koostumukseltaan. (Berardi & Naldi 2017)

5.3.4 Mineraalivilla ja puukuitueriste

Kaikkien villamaisten eristeiden lämmönjohtavuus kasvaa lämpötilan noustessa ja vastaavasti laskee lämpötilan laskiessa. Polystyreenieristeisiin verrattuna käyrien kulmakerroin on kuitenkin jyrkempi. Eristeet siis muuttuvat lämpötilan laskiessa nopeammin tehokkaiksi ja vastaavasti lämpimässä niiden eristävyysominaisuudet heikkenevät nopeammin. Villojen mittaustulokset on koottu kuvaan 5.6.



Kuva 5.6. Villaeristeiden mittaustulokset.

Mittaustulosten mukaan puukuitueriste poikkeaa muista ilman eristävyteen perustuvista lämmöneristeistä, sillä sen lämmönjohtavuuden kasvu hidastuu +10 °C ja +30 °C lämpötilojen välillä. Kaikille muille materiaaleille muutos on lineaarinen koko mittausalueella.

Puukuitueristeiden lämmönjohtavuudelle olisi hyvä tehdä lisää mittauksia, jotta saataisiin selville, onko kyseessä mittalaitteen mittausrvirhe vai hidastuuko sen lämmönjohtavuuden kasvu korkeissa lämpötiloissa. Ekovillalevyille lämmönjohtavuusmittauksia jouduttiin tekemään samalle levyille useita, koska mittalaitteella oli vaikeuksia määrittää lämmönjohtavuusarvoa. Ilmiö saattaa siis selittyä myös mittaustarkkuuden muutoksella muihin mittauksiin nähden ja myös puukuitueristeiden kuvaaja saattaa todellisuudessa olla lineaarinen.

Vinha et al (2005) on mitannut tutkimuksessaan puukuitueristeiden lämmönjohtavuuksia eri lämpötiloissa ja kosteusolosuhteissa. Myös tässä tutkimuksessa puukuitueristeiden

lämmönjohtavuuskuvaajan kulmakerroin vaikutti pienenevän hieman $+10\text{ °C}$ ja $+20\text{ °C}$ lämpötilojen välillä.

5.4 Tulosten yhteenveto ja materiaalien välinen vertailu

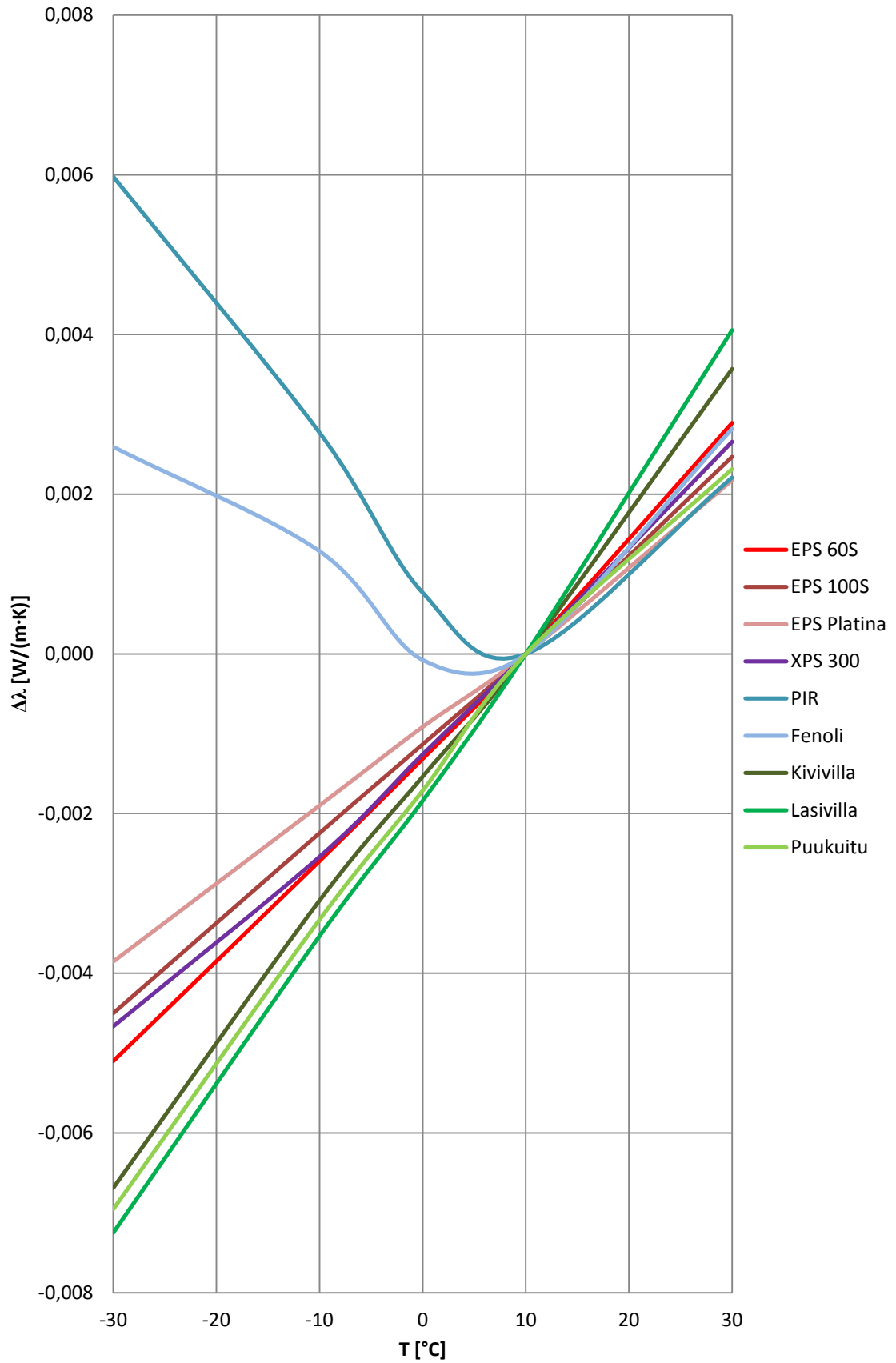
Mittaustuloksista havaittiin lähtöoletuksen mukaisesti, että eristeiden lämmönjohtavuus muuttuu lämpötilan muuttuessa. Useimpien tutkittujen materiaalien lämmönjohtavuus perustuu paikallaan seisovaan ilmaan ja siten niiden käyttäytyminen oli keskenään samankaltaista ja lämmönjohtavuuden muutos oli mitta-alueella lineaarinen tai lähes lineaarinen. PIR- ja fenolieristeiden mittaustulos poikkesi merkittävästi muiden tutkittujen eristeiden tuloksista, koska niiden lämmönjohtavuus kasvoi $+5\text{ °C}$ molemmilla puolilla.

Lämmönjohtavuuden muutosten vertailua varten kaikkien mitattujen lämmöneristeiden lämmönjohtavuudesta vähennettiin kullekin eristeelle $+10\text{ °C}$ lämpötilassa mitattu lämmönjohtavuus. Näin lämmönjohtavuudeksi $+10\text{ °C}$ lämpötilassa saatiin kaikille eristeille $0\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ja kuvaan 5.7 saatiin kuvattua eri materiaalien lämmönjohtavuuden muutos. Kuvaajasta havaitaan erityisesti jo aiemminkin mainittu ilmiö, että keskenään samankaltaiset materiaalit käyttäytyvät samoin eri lämpötiloissa. Kuvaajasta on selkeästi erotettavissa tässä luvussa aiemmin mainitut eri eristetyyppien muodostamat ryhmät.

Lämmönjohtavuutta mitattaessa mineraalivilla- ja puukuitueristeiden lämmönjohtavuus pieneni kylmässä eniten lähtötilanteeseen nähden. EPS- ja XPS-eristeiden muodostama ryhmä käyttäytyi kylmässä jotakuinkin samoin kuin villaeristeiden ryhmä, joskin lämmönjohtavuuden muutos oli hieman pienempi kuin villaeristeillä. Koska muutokset olivat kaikilla edellä mainituilla materiaaleilla lineaarisia tai lähes lineaarisia, lämpimällä puolella lämmönjohtavuus on villaeristeillä EPS- ja XPS-eristeitä suurempi.

PIR- ja fenolieristeiden ryhmä käyttäytyi kylmässä muista poiketen lämmöneristävyysheikentyessä. Lämpimässä eristeiden lämmönjohtavuuden kasvu noudatti jotakuinkin samaa lämmönjohtavuuden kulmakerrointa EPS- ja XPS-eristeiden kanssa. Voidaan siis todeta, että pentaanin lämmönjohtavuus on pienempi kuin ilman, mutta kaasumaisessa olomuodossa olevan pentaanin lämmönjohtavuuden muutoksen kulmakerroin on suunnilleen sama kuin ilmalla.

Suurin muutos lämmönjohtavuudessa $+10\text{ °C}$ mitattuun arvoon verrattuna oli lasivillalla, jonka lämmönjohtavuuden muutos 60 °C lämpötilaerossa oli kaikkiaan $0,011\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Pienin lämmönjohtavuuden muutos lineaarisesti käyttäytyvillä eristeillä oli EPS Platina-eristeellä. Platina-eriste on tiheydeltään jotakuinkin samaa kuin EPS 60S, joten eristeessä oleva grafiitti pienentää lämpötilan vaikutusta. Käytännössä rakennusfysikaalisen toiminnan kannalta merkittävin muutos on kuitenkin PIR-eristeellä, jonka lämmönjohtavuus heikkeni kylmässä $0,006\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ja fenolilla, jonka heikennys oli $0,003\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.



Kuva 5.7. Lämmönjohtavuuden muutos verrattuna lämmönjohtavuuteen +10°C lämpötilassa.

6. TULOSTEN SOVELTAMINEN KÄYTÄNTÖÖN

6.1 Tutkittava rakenne

Tässä luvussa on kolme yksinkertaistettua laskuesimerkkiä lämmönjohtavuuden muutoksen vaikutuksesta käytännön rakenteeseen. Laskenta tehdään saatuja mittaustuloksia hyödyntäen. Koska lämmönjohtavuus riippuu lämpötilaerosta kaavan (2.6) mukaisesti, saadaan laskentaesimerkeissä hieman todellisista tilanteista poikkeavia mittaustuloksia. Esimerkeissä pintojen välisen lämpötilaeron oletetaan olevan 20 °C. Käytännössä ero saattaa esimerkiksi pakkasvarastossa olla 40 °C, jos varaston sisällä on -20 °C ja ulkopuolella +20 °C.

Ensimmäisessä esimerkissä tutkitaan mikä on lämpötilan vaikutus rakenteen U-arvoon. Toinen esimerkki on jatkoa ensimmäiselle esimerkille. Siinä tutkitaan lämmönjohtavuuden muutoksen vaikutusta tilan energiankulutukseen. Viimeisessä esimerkissä tutkitaan, mikä tulisi seinärakenteen paksuuden olla käyttäen nykymääräysten mukaisia U-arvoja. U-arvojen laskenta on tehty Rakentamismääräyskokoelman osan C4 (luonnos, 2012) mukaan.

Laskenta, kuten mittauksetkin, keskittyvät erityisesti tyypillistä mittauslämpötilaa alemmissa lämpötiloissa tapahtuviin ilmiöihin. Alimmissa tutkituissa lämpötiloissa olevat rakenteet ovat esimerkiksi kylmä- ja pakkasvarastoja. Niiden suunnittelussa ja toteutuksessa on huolehdittava lämmöneristävyysarvojen laskennan lisäksi rakenteen oikeanlaisesta suunnittelusta ja toteutuksesta, koska rakenteen sisään ei saa päästä kosteutta esimerkiksi elementtien välisistä saumoista. Rakenteen sisään pääsevä kosteus saattaisi esimerkiksi jäätymä elementtien välisiin saumoihin aiheuttaen riskejä rakenteen toimivuudelle ja mahdollisesti heikentäen lämmöneristeiden eristävyysomaisuuksia, sekä rakenteen turvallisuutta ja terveellisyttä. (RIL 255-1-2014 2014, s. 184–185)

6.2 Lämpötilan muutoksen vaikutus rakenteen U-arvoon

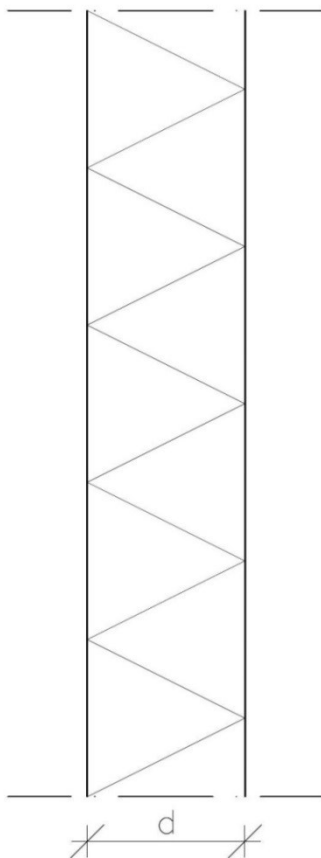
Valitaan tutkittavaksi rakenteeksi kuvan 6.1 teräsohuttelevypintainen sandwich-rakenne, jonka lämmöneristävyttä tutkitaan seinässä ja yläpohjassa. Rakenteen paksuus valitaan materiaalikohtaisesti siten, että seinärakenteen U-arvoksi saadaan 0,17 W/(m²K) ja yläpohjan U-arvoksi 0,09 W/(m²K) +10 °C lämpötilan mittaustuloksia hyödyntäen. Rakentamismääräyskokoelman osa D3 (2012) määrittää edellä mainitut U-arvot lämpimän, erittäin lämpimän tai jäähdytettävän kylmän tilan rakennusosien lämmönläpäisykertoimien vertailuarvoiksi.

Yksinkertaista peltisandwich-rakennetta käyttämällä saadaan havainnollistettua eristämateriaalin lämmönjohtavuuden muutoksen vaikutusta ilman muiden rakenneosien lämmönjohtavuusarvojen vaikutusta tulokseen. Sandwich-elementissä käytettävän teräsohuttelevyn lämmönjohtavuus on suuri ja materiaalipaksuus ohut, noin 0,5 mm, joten sen U-arvoa laskettaessa oletetaan, että pellin lämmönvastus $R_{peltti} = 0 \frac{m^2K}{W}$. Laskennassa oletetaan, että pintavastukset ovat vaakasuunnassa rakentamismääräyskokoelman osan C4 (luonnos 2012, s. 22) mukaiset $R_{si} = 0,13 \frac{m^2K}{W}$ ja $R_{se} = 0,04 \frac{m^2K}{W}$ sekä pystysuunnassa $R_{si} = 0,10 \frac{m^2K}{W}$ ja $R_{se} = 0,04 \frac{m^2K}{W}$ kaikissa lämpötiloissa.

Koska tutkittavassa rakenteessa ainoa lämmön siirtymistä vastustava osa on eriste, rakenteen U-arvo lasketaan kaavan (2.9) mukaan

$$U = \frac{1}{R_{si} + R_{eriste} + R_{se}} \quad (6.1)$$

ottaen huomioon pintavastuksien arvossa lämpövirran suunta.



Kuva 6.1. Peltisandwich-elementti.

Esimerkki lasketaan käyttäen ThermiSol EPS 100S Lattia ja Kingspan Therma TP10 -eristeiden mittaustuloksia. Nämä eristeet edustavat molempia mittauksissa havaittuja lämmönjohtavuuskäyrien muotoja. EPS- ja PIR-eristeiset peltisandwich-elementit ovat tyypillisesti käytettyjä ratkaisuja varistorakennuksissa. Lisäksi markkinoilla on kivivil-laytimisiä elementtejä, mutta ne noudattavat EPS:n kanssa samankaltaista lämmönjohtavuuden muutosta, joten ne jätetään pois tarkastelusta. Valmistajien käyttämät materiaalit elementtien eristeityksessä saattavat erota kuitenkin joiltain ominaisuuksiltaan käytetyistä eristeistä, joten laskennan tuloksia ei voida käyttää sellaisenaan rakenteiden suunnittelussa. Lisäksi laskennassa käytetään pienellä mittausmäärällä saatuja tuloksia, joten tuloksessa on epätarkkuutta verrattuna λ_D -arvoon.

Laskennassa ei oteta huomioon lämmönläpäisykertoimen korjaustekijöitä eli oletetaan, että U-arvon korjaustermi $U_C = 0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Todellisessa rakenteessa niillä saattaa kuitenkin olla vaikutusta etenkin tilan kokonaisenergiankulutukseen.

Tutkittavan rakenteen paksuus määritetään edellä mainitun U-arvon vaatimusten mukaisesti $+10 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa taulukossa 6.1. Lämpötilan muutoksen vaikutusta U-arvoon valitulla eristepaksuudella tutkitaan $-20 \text{ }^\circ\text{C}$, $0 \text{ }^\circ\text{C}$, ja $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötiloissa. Laskennan korkein ja matalin lämpötila rajoitettiin $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötiloihin, koska on haastavaa arvioida miten PIR-eristeen lämmönjohtavuus muuttuisi mittausalueen ulkopuolella ja siten mittaustuloksia $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $+30 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötiloissa ei voida käyttää sellaisenaan.

EPS:n lämmönjohtavuus laski lineaarisesti, joten laskennassa voidaan käyttää sille tutkittavasta lämpötilasta riippuen mitattuja arvoja tai niiden keskiarvoa. PIR-eristeen kuvaaja ei ollut suora, joten kaikkia lämmönjohtavuuden laskennassa käytettäviä arvoja ei voi laskea suoraan mittaustulosten keskiarvona.

Mittaustulosten perusteella muodostetun käyrän mukaan vaikuttaa siltä, että polyuretaanieristeen lämmönjohtavuus muuttuu lineaarisesti $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $-30 \text{ }^\circ\text{C}$, sekä $+10 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $+30 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilojen välillä, joten lämmönjohtavuutena käytetään $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötiloissa mitattujen arvojen keskiarvoa vastaavasti kuin EPS-rakenteessa.

PIR-eristeen lämmönjohtavuudelle tunnetaan $0 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilan ympäristössä useita arvoja. Oletetaan, että lämmönjohtavuus muuttuu lineaarisesti $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $0 \text{ }^\circ\text{C}$ sekä 0 ja $+10 \text{ }^\circ\text{C}$ välillä. Elementti jaetaan kahteen yhtä paksuun osaan ja oletetaan, että lämpötila muuttuu lineaarisesti tutkittavan rakenteen läpi siten, että rakenteen keskellä lämpötila on $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Tällöin puolet elementistä noudattaa lämmönjohtavuutta $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa ja puolet $+5 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa. Vastaavaa arviointia käytetään polyuretaanieristeen lämmönjohtavuuden määrittämiseksi $+10 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa. Tällä laskentatavalla saatava tulos poikkeaa hieman rakenteen todellisesta lämmönjohtavuudesta, koska lämmönjohtavuuden muutos ei ole lineaarinen ja tutkittavan materiaalin lämmönvastus vaihtelee. Tällä

laskentatavalla lämmönjohtavuutta arvioidessa saadaan kuitenkin suuntaa antava arvo rakenteen lämmönjohtavuudelle.

Edellä kuvatun perusteella voidaan myös todeta, että mikäli tulevaisuudessa lämmöneristeiden lämmönjohtavuusominaisuuksia alettaisiin hyödyntää tehokkaammin, PIR- ja fenolieristeille lämpötilasta riippuvan lämmönjohtavuusarvon määrittäminen olisi hankalaa lämmönjohtavuuskäyrän muutoksen vuoksi. Tarkkojen lämmönjohtavuuslaskelmien suorittaminen pentaanin lämmönjohtavuuteen perustuvilla eristeillä olisi hankalaa, ellei jopa mahdotonta yksinkertaisia menetelmiä käyttäen.

Koska eristeytimen paksuus halutaan valita U-arvon mukaiseksi, tutkittavilla EPS- ja kivivillaeristeisillä elementeillä kaava (2.10) johdetaan muotoon

$$d = \lambda \left(\frac{1}{U} - R_{si} - R_{se} \right) \quad (6.2)$$

Tutkittavan polyuretaanieristeisen elementin ytimen paksuus +10 °C lämpötilassa määritetään kaavan (5.3) mukaan

$$d = \frac{2\lambda_5\lambda_{15}\left(\frac{1}{U} - R_{si} - R_{se}\right)}{\lambda_5 + \lambda_{15}} \quad (6.3)$$

jossa

λ_5 on lämmönjohtavuus +5 °C lämpötilassa

λ_{15} on lämmönjohtavuus +15 °C lämpötilassa

Tutkittavat eristepaksuudet ovat taulukossa 6.1. Laskennassa käytetään eristepaksuuksia, jotka on saatu käyttämällä U-arvoa 0,17 W/(m²K) seinälle ja 0,09 W/(m²K) katolle ja pyöristämällä saadut tulokset 5 mm tarkkuuteen. Tarkasteltavat eristepaksuudet eivät noudata elementtivalmistajien tuotteissaan käyttämiä paksuuksia.

Koska PIR-elementin U-arvo laskettiin tässä käyttäen keskiarvoja, täytyy seinäelementin olla 125 mm paksu. Mitattua lämmönjohtavuutta +10 °C lämpötilassa käyttämällä olisi seinäelementin paksuus 120 mm. Sama ilmiö toistuu kattoelementissä. Lämmönjohtavuuden muutos tulisikin tästä syystä ottaa huomioon rakennepaksuuksien valinnassa.

Taulukko 6.1. Tutkittavat eristepaksuudet.

	d_{seinä} [mm]	d_{katto} [mm]
EPS	200	390
PIR	125	235

Rakenteelle laskettiin U-arvo kaavan (6.1) mukaisesti kussakin mittauslämpötilassa käyttäen EPS-eristeelle mittauspisteen lämmönjohtavuutta ja PIR-eristeelle mittaustulosten avulla arvioitua lämmönjohtavuutta vastaavasti kuin kaavassa (6.3) käytettiin eristepaksuuden määrittämisessä. U-arvot valituilla elementin ydinmateriaalin paksuudella ovat taulukoissa 6.2 ja 6.3.

Taulukko 6.2. Lämpötilasta riippuvat U-arvot seinäarakenteelle.

	-20°C	0°C	10°C	20°C
$U_{\text{EPS}}[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$	0,15	0,16	0,17	0,18
$U_{\text{PIR}}[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$	0,20	0,17	0,17	0,17

Taulukko 6.3. Lämpötilasta riippuvat U-arvot yläpohjarakenteelle.

	-20°C	0°C	10°C	20°C
$U_{\text{EPS}}[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$	0,08	0,09	0,09	0,09
$U_{\text{PIR}}[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$	0,11	0,09	0,09	0,09

Laskentatuloksista havaitaan, että EPS-elementin U-arvot pienenevät pakkasessa. Materiaalin U-arvo myös heikkenee lämpimässä, mikä oli havaittavissa jo mittaustulosten perusteella. Aiemmin jo todettiin, että PIR-eristeen lämmönjohtavuus kasvaa sekä kylmissä että kuumissa lämpötiloissa. Tämä ilmiö on erityisesti merkittävä kylmissä rakenteissa, koska useimmilla eristeillä lämmöneristävyys paranee kylmässä. Esimerkiksi pakkasvarasto, joka on suunniteltu tehtäväksi PIR-ytimisellä peltisandwich-elementillä, on todellisuudessa lämmöneristävyydeltään oletettua heikompi ja vaatisi tästä syystä esimerkiksi suuremman jäähdytyskaluston.

Laskennan perusteella todetaan, että pakkasvarastoissa ja rakenteissa, joiden keskilämpötila on pakkasen puolella, voitaisiin käyttää ohuempia EPS-elementtejä kuin tyypillinen +10 °C lämpötilassa tehtyihin mittauksiin tehtävä laskenta antaisi olettaa. Ohuemman eristepaksuuden valinta kuitenkin määrittäisi käyttötarkoitusta myöhemminkin: Varaston tai sen ympäröivän tilan käyttötarkoituksen muuttuessa pakkasvaraston elementit täytyisi vaihtaa paksumpiin tai tila tulisi lisäeristää, jos U-arvon haluttaisiin pysyvän samana.

PIR-elementeillä rakenteen tulisi sen sijaan olla yleensä laskettua U-arvoa paksumpi, jotta haluttu U-arvo täyttyy pakkasessa. Liian ohutta rakennetta käyttäessä lämpöhukka olisi arvioitua suurempi ja siten energiankulutus kasvaisi.

6.3 Lämmönjohtavuuden muutoksen vaikutus energiankulutukseen

Tässä esimerkissä hyödynnetään edellisen esimerkin tuloksia ja määritetään mikä on U-arvon muutoksen vaikutus kuvitteellisen varastotilan energiankulutukseen.

Lämpövirran tiheys q [W/m^2] rakenteen läpi on johdettu kaavasta (2.6).

$$q = \frac{\Delta T}{R_T} \quad (6.4)$$

Lämpöhäviö Φ rakenteen läpi lasketaan kaavan (2.4) mukaisesti yksiulotteisessa tapauksessa

$$\Phi = q \cdot A \quad (6.5)$$

Taulukossa 6.4 on lämpöhäviöt rakenteiden läpi viileässä tilassa sijaitsevassa pakkasvarastossa, jossa pakkasvaraston sisällä on -30 °C lämpötila ja ulkopuolella -10 °C lämpötila. Tällöin rakenteen keskilämpötila on -20 °C. Vertailukohtaksi on laskettu lämpöhäviön suuruus käyttäen lämmönjohtavuutta $+10$ °C lämpötilassa. Laskennassa neliön muotoisen varaston seinän pituudeksi on valittu 10 m ja varaston korkeudeksi 3 m. Laskennassa on käytetty eristepaksuutena taulukossa 6.1 esitettyjä paksuuksia ja U-arvoina taulukkojen 6.2 ja 6.3 mukaisia rakenteen U-arvoja -20 °C ja $+10$ °C lämpötilassa.

Taulukko 6.4. Käytetyn U-arvon vaikutus energiankulutukseen.

	Φ_{-20} [W]	Φ_{+10} [W]	$\Delta\Phi$ [W]	ero [%]	ΔQ [kWh/a]
EPS	533	588	55	9,3	480
PIR	692	588	-104	-17,6	-907

Laskennan tuloksista havaitaan, että käytetystä lämmönjohtavuusarvosta riippuva ero lämpöhäviöissä on valituilla lämpötiloilla merkittävä. Lämpöhäviö on EPS:llä 9,3 % pienempi kuin $+10$ °C lämpötilassa tehty laskenta antaa olettaa. PIR-eristeellä lämpöhäviö on 17,6 % suurempi kuin perinteisesti käytetty laskentatapa antaa olettaa. Arvo ei ole riippuvainen pinta-alasta. Laskennassa käytetty pakkasvarasto kuluttaa vuodessa EPS-eristettynä noin 500 kWh vähemmän energiaa kuin perinteinen laskentatapa olettaa. PIR-eristetyllä varastolla kulutus on sen sijaan 900 kWh suurempi.

6.4 U-arvon ja lämpötilan vaikutus rakennepaksuuteen

Taulukoihin 6.5 ja 6.6 on koottu eristepaksuudet, joita käyttämällä saataisiin U-arvoksi seinälle $0,17$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ja katolle $0,09$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ eri lämpötiloissa. Eristepaksuudet on laskettu soveltaen kaavoja (6.2) ja (6.3).

Taulukko 6.5. Eristepaksuus seinälle, jonka U -arvo on $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

	-20°C	0°C	10°C	20°C
d_{EPS}[mm]	185	195	200	210
d_{PIR}[mm]	145	125	125	125

Taulukko 6.6. Eristepaksuus katolle, jonka U -arvo on $0,09 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

	-20°C	0°C	10°C	20°C
d_{EPS}[mm]	350	375	390	400
d_{PIR}[mm]	280	245	235	245

Tuloksista havaitaan, että -20 °C lämpötilassa EPS-eristeillä eristetyin seinärakenteen eristepaksuus voisi olla 15 mm ohuempi kuin lämmönjohtavuusarvo $+10 \text{ °C}$ lämpötilassa antaa olettaa ja rakenne täyttäisi silti U -arvon asettamat vaatimukset. PIR-eristeellä eristeen paksuus tulisi puolestaan olla 20 mm paksumpi. Vastaavasti $+20 \text{ °C}$ lämpötilassa kaikilla materiaaleilla eristepaksuuden tulisi olla hieman suurempi kuin laskennallinen arvo antaisi olettaa. Katossa vaikutus on suurempi, koska rakenne saa läpäistä vähemmän lämpöä kuin seinä: EPS-eriste voisi olla 40 mm ohuempi ja PIR-eristeen tulisi olla 45 mm paksumpi kuin $+10 \text{ °C}$ mitatuilla lämpötiloilla voitaisiin olettaa.

Kylmissä lämpötiloissa ohuemman eristepaksuuden valinta mahdollistaisi säästöt EPS-elementtien hankintakuluissa. Toisaalta tavanomaista eristepaksuutta käyttämällä voidaan saada pitkäaikaisia säästöjä energiankulutuksessa, koska energiankulutus ei olisi niin suurta. Ominaisuutta voidaan hyödyntää myös jäähdytyslaitteen hankintahinnassa, kun voidaan valita teholtaan hieman pienempi jäähdytyskone. EPS-eristetyin elementin tapauksessa paras ratkaisu saattaisi olla paksun eristeen käyttäminen, koska se ei sulki myöhemmin pois tilan muita käyttötarkoituksia. Rakenteita suunniteltaessa tulee siis ottaa huomioon saavutettavat hyödyt tai ongelmat koko rakennuksen käyttöä ajalta.

PIR-eristeisen pakkasvaraston seinälle pitäisi sen sijaan valita suurempi eristepaksuus, koska tehokkaamman jäähdytyskoneen hankinta kasvattaisi energiakustannuksia, mikä ei ole nykytavoitteiden mukaista.

7. YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT

7.1 Teoria

Tutkimuksessa käsiteltiin lämpöä termofysikaalisena ilmiönä ja todettiin, että lämpö on lämpötilaerojen vaikutuksesta johtuvaa energian siirtymistä paikasta toiseen. Lämpö siirtyy johtumalla, säteilemällä ja konvektiossa. Siirtyminen tapahtuu korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Materiaaleilla, joilla on suuri lämmönvastus, kuten lämmöneristeillä, koostuu rakenteiden läpi siirtyvä lämpövirta kaikista näistä kolmesta siirtymismuodosta.

Useimpien lämmöneristeiden eristävyys perustuu paikallaan pysyvään ilmaan tai johonkin ilmaa tehokkaammin eristävään kaasuun. Kaasujen lämmönjohtavuus kasvaa lämpötilan noustessa. Kylmissä lämpötiloissa kaasu saattaa tiivistyä nesteeksi, jolloin materiaalin lämmönjohtavuus yleensä kasvaa.

Rakenteiden lämmönläpäisykerroin, eli U-arvo kuvaa rakenteen energiatehokkuutta ja arvo on sitä pienempi, mitä vähemmän rakenne päästää lämpöä lävitseen. Sen määrittämisessä käytetään rakenteiden lämmönjohtavuuksia ja paksuuksia. Lisäksi arvon laskennassa on tunnettava ilman liikkumissuunta rakenteeseen nähden. Laskettua arvoa korjataan erilaisilla korjauskertoimilla, jotka riippuvat esimerkiksi kiinnikkeiden aiheuttamista kylmäsilloista.

7.2 Mittaukset

Tutkimuksessa selvitettiin lämmöneristeiden lämmönjohtavuutta eri lämpötiloissa. Tutkimus suoritettiin käyttäen Suomessa yleisesti rakennuskäytössä olevia lämmöneristemateriaaleja.

Suomessa lämmönjohtavuusmittaukset tehdään yleensä +10 °C keskilämpötilassa. Tässä tutkimuksessa mitattiin eristemateriaalien lämmönjohtavuutta viidessä mittauspisteessä -30 °C ja +30 °C lämpötilojen välillä. Mittauksissa havaittiin, että kaikkien eristemateriaalien lämmönjohtavuus kasvoi lämpötilan noustessa. Kylmissä lämpötiloissa lämmönjohtavuus pieneni ilmaa ja hiilidioksidia sisältävissä lämmöneristeissä ja kasvoi pentaania sisältävissä lämmöneristeissä. Eri materiaaleilla, jotka kuitenkin sisälsivät samaa kaasua, oli eroja lämmönjohtavuuden muutosnopeudessa, joten pelkkä kaasu ei määritä eristeen ominaisuuksia vaan myös eristeen solurakenne.

EPS-eristeiden mittaustulosten perusteella voitiin myös todeta, että samasta materiaalista tehdyn eri tiheyksien eristeiden lämmönjohtavuus muuttui eri tahtiin. Muista materiaaleista ei vastaavaa vertailua voitu tehdä, mutta oletettavasti myös muilla materiaaleilla eristeen tiheyden muutos olisi vaikuttanut lämmönjohtavuuteen.

7.3 Tulosten soveltaminen käytäntöön

Laskentaesimerkeissä tutkittiin varastorakennusta, jonka seinät ja yläpohja oli tehty EPS- tai PIR-ytimisellä peltisandwich-elementillä. Niissä laskettiin rakentamismääräyskokoelman mukaisilla U-arvoilla tarvittava rakennepaksuus seinä- ja kattorakenteelle käyttäen mittaustuloksia eri lämpötiloissa. Lisäksi esimerkissä laskettiin, mikä olisi U-arvo eri lämpötiloissa käyttäen mitattuja lämmönjohtavuusarvoja ja U-arvon mukaista rakennepaksuutta. Lisäksi tarkasteltiin käytetyn arvon vaikutusta rakenteen energiankulutukseen.

Laskentaesimerkissä havaittiin, että EPS-ytimisen elementin käyttämisellä on U-arvoon pienentävää vaikutusta noin $0,02 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, kun verrattiin U-arvoa $+10 \text{ °C}$ ja -20 °C lämpötiloissa olevilla lämmönjohtavuusarvoilla. Saatuun parannukseen verrattuna erityisen merkittävää on PIR-eristeen eristävyuden heikkeneminen, jonka vaikutus U-arvoon oli rakenteesta riippuen $0,02 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) - 0,03 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Lopuksi todettiin, että lämmönjohtavuuksien tunteminen eri lämpötiloissa on tärkeää, jotta eristeiden ominaisuuksia voidaan hyödyntää rakenteiden suunnittelussa monipuolisesti. Myös materiaalin toiminnan tunteminen eri lämpötiloissa on tärkeää, mikä huomattiin erityisesti pentaania sisältävien eristeiden kohdalla: eriste olikin lähes kaikissa tutkituissa lämpötiloissa ominaisuuksiltaan heikompi kuin esimerkiksi materiaalivalmistajan ilmoittama λ_D -arvo kertoo. Materiaalin ominaisuuksien tuntemisella ja niiden vaikutuksen ymmärtämisellä voitaisiin saada energiatehokkaampia rakennuksia.

7.4 Tutkimuksen tarkastelu ja jatkotutkimusehdotukset

Mittauksia voisi laajentaa sisältämään myös vanhennettujen tuotteiden ominaisuudet. XPS-eristeiden lämmönjohtavuus oli melko lähellä EPS-eristeiden ominaisuuksia ja lämpötilakäyttäytyminen oli samankaltaista EPS-eristeiden kanssa, joten mittaustulosten perusteella voidaan olettaa, ettei eristeessä ollut enää merkittävää määrää hiilioksidia ja siten ne olivat vanhentuneet jo ajan saatossa.

Pentaania sisältävien eristeiden tulokset sen sijaan erosivat merkittävästi ilmaa sisältävien eristeiden lämmönjohtavuusarvoista. PIR- ja fenolieristeiden lämmönjohtavuuden muutoksen kulmakertoimet erosivat toisistaan merkittävästi. Suorittamalla mittaukset tuoreemmille eristeille ja sen jälkeen vanhentamalla ne, saataisiin havainnollistettua myös eristeiden vanhenemisen vaikutusta lämmönjohtavuuteen. Lisäksi pystyttäisiin

selvittämään paremmin, mikä vaikutus eristeessä on kaasulla ja mikä kiinteällä solurakenteella.

Tutkimus käsitteli vain lämmönjohtavuuden muutosta eri lämpötiloissa ja rajasi pois esimerkiksi kosteuden vaikutuksen materiaalien lämmönjohtavuuteen. Tutkimuksessa ei käsitelty myöskään lämpötilan tai lämmönjohtavuuden muutoksen vaikutusta kastepisteen sijaintiin. Kosteuden vaikutuksesta erityisesti kylmissä olosuhteissa tulisi tehdä tarkempia selvityksiä muun muassa laskuesimerkin pakkasvarastoissa: Ovatko rakenteet käytännössä riittävän tiiviitä ja jos eivät, miten niihin mahdollisesti tiivistyvä kosteus vaikuttaa rakenteiden lämmöneristävyysominaisuuksiin.

Tutkimuksessa ei selvitetty lämpötilan vaikutusta eristemateriaalien mekaanisiin ominaisuuksiin, koska mittalaitteet sulki näytteen sisäänsä mittauksen ajaksi. Mittauksen jälkeen materiaaleissa ei havaittu silmämääräisellä tarkastuksella esimerkiksi haurastumista tai muita vaurioita. Mikäli myös lujuusominaisuudet muuttuvat lämpötilan vaikutuksesta, on sillä vaikutusta esimerkiksi ulkoseinien ja yläpohjien kuormituskestävyyteen lumi- ja tuulikuorman alla.

Koska julkisia tutkimuksia näin kylmässä on saatavilla melko vähän, olisi mittauksia syytä tehdä runsaamminkin. Tutkimus oli rajattu melko suppealle lämpötila-alueelle tulosten loppuessa -30 °C ja $+30\text{ °C}$ lämpötiloihin. Monenlaisia erikoissovellutuksia, kuten erittäin kylmien aineiden säilytystä varten tai toisaalta esimerkiksi saunojen lämmöneristämistä ajatellen mittausaluetta voitaisiin laajentaa. Nyt havaittiin, että kaikkien eristeiden lämmöneristävyys heikkenee kuumassa. Jatkotutkimuksella voitaisiin saada selville, miten paljon materiaalien eristävydestä on jäljellä esimerkiksi $+80\text{ °C}$ lämpötilaan lämmitetyssä saunassa. Sopivan eristemateriaalin valinnalla voitaisiin vähentää saunan lämmityksen yhteydessä lämmön siirtymistä rakenteissa. Toisaalta huonosti eristetty sauna aiheuttaa lämpötilan muutoksia kaikissa rakenteissa ja siten mahdollisia kosteusvaikutuksia.

PIR- ja PUR-eristeiden välistä eroa lämmönjohtavuuksissa olisi syytä selvittää tarkemmin. Lähdemateriaalina käytettyjen tutkimuksien perusteella vaikuttaisi siltä, että PUR-eriste olisi turvallisempaa käyttää kylmissä lämpötiloissa, koska sen lämmönjohtavuus ei lähdetutkimuksen mukaan heikentynyt. Myös muiden eristekäytössä käytettyjen kaasujen lämmönjohtavuuden muutosten tunteminen on tärkeää, koska kaasuja käytetään myös esimerkiksi ikkunalaseissa ja ikkunat ovat merkittävä osa rakennusten vaipassa.

LÄHTEET

A. Barnetson (2004). Expanded Polystyrene: Development, Processing, Applications and Key Issues, in D. Eaves (ed), Handbook of Polymer Foams. Smithers Rapra Press. pp. 37–46.

U. Berardi, M. Naldi (2017). The impact of the temperature dependent thermal conductivity of insulating materials on the effective building envelope performance. Energy and buildings 144 (2017) pp. 262–275.

M. Cornick (2010). Foam, in L. Pilato (ed), Phenolic Resins: A Century of Progress. Springer Science & Business Media. pp. 189–208.

C4 Suomen rakentamismääräyskokoelma, luonnos (2012). Lämmöneristys. Ympäristöministeriö. Saatavilla: <http://www.ym.fi/download/noname/%7BE3549160-2ED6-4807-8556-230BDC60275B%7D/30749> (viitattu 10.8.2017).

D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma (2012). Rakennusten energiatehokkuus. Ympäristöministeriön asetus rakennusten energiatehokkuudesta. Saatavilla: http://www.finlex.fi/data/normit/37188-D3-2012_Suomi.pdf (viitattu 10.8.2017).

D. Eaves (2004). Rigid Polyurethane Foams, in D. Eaves (ed), Handbook of Polymer Foams. Smithers Rapra Press. pp. 55–78

EUMEPS (2016). EPS White Book: EUMEPS Background Information on standardisation of EPS. Version 19/10/16. Saatavilla: <https://eumeps.construction/content/8-downloads/2-eps-white-book/whitebook-revision-2014.pdf> (viitattu 9.8.2017)

Eurima (2016). Production Process. Saatavilla: <http://www.eurima.org/about-mineral-wool/production-process.html> (viitattu 10.10.16)

I. Heimonen, K. Hemmilä (1999). Eristyslasin täytekaasun ja lasin toimivuus ja toteaminen. VTT tiedotteita 1963. VTT Rakennustekniikka. 43s.

B. Jelle (2011). Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities. Energy and Buildings 43 (2011) pp. 2549–2563

M. Koru (2015). Determination of thermal conductivity of closed-cell insulation materials that depend on temperature and density. Arabian Journal for Science and Engineering 41 (2016). pp. 4337-4346. 10 p.

J. Law, R. Rennie (2015). A Dictionary of Physics. Oxford University Press.

J. Lienhard IV, J. Lienhard V (2011). A Heat Transfer Textbook. Dover Publications. 701 p.

Motiva (2017). Energian loppukäyttö. Saatavilla: https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto_suomessa/energian_loppukaytto. Versio 31.7.2017. Viitattu 1.8.2017.

RIL 117 (1979). Lämmön- ja kosteudeneristys. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 378 s.

RIL 255-1-2014 (2014). Rakennusfysiikka 1. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 500 s.

SFS-EN 12667 (2001). Rakennusmateriaalien ja -tuotteiden lämpötekniset ominaisuudet. Lämmönvastuksen määrittäminen kuumalevy- ja lämpövirtalevylaitteella. Tuotteet, joilla on korkea tai suhteellisen korkea lämmönvastus. Suomen Standardoimisliitto SFS. Rakennustuoteteollisuus. 54 s.

SFS-EN 13164 (2015). Lämmöneristetuotteet rakentamiseen. Tehdasvalmisteiset suula-kepuristetut polystyreenituotteet (XPS). Tuotestandardi. Suomen standardoimisliitto SFS. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. 93 s.

SFS-EN 13166 (2013). Thermal insulation products for buildings. Factory made phenolic foam (PF) products. Specification. Suomen standardoimisliitto SFS. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. 45 s.

SFS-EN 14308 (2015). Thermal insulation products for building equipment and industrial installations. Factory made rigid polyurethane foam (PUR) and polyisocyanurate foam (PIR) products. Specification. Suomen standardoimisliitto SFS. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. 53 s.

SFS-EN 14934 (2007). Lämmöneriste- ja kevyttäytetuotteet maa- ja vesirakentamiseen. Tehdasvalmistetut suula-kepuristetut polystyreenituotteet (XPS). Tuotestandardi. Suomen standardoimisliitto SFS. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. 50 s.

SFS-EN ISO 13787 (2003). Thermal insulation products for building equipment and industrial installations. Determination of declared thermal conductivity. Suomen standardoimisliitto SFS. Rakennusteollisuus RT ry. 22 s.

TA Instruments (2017). FOX 314. Saatavilla: <http://www.tainstruments.com/fox-314/#ffs-tabbed-13>. Viitattu 23.3.2017.

U. Siikanen (2014). Rakennusfysiikka: Perusteet ja sovelluksia. Rakennustieto. 256 s.

U. Siikanen (2009). Rakennusaineoppi. Rakennustieto, 328 s.

H. Struchtrup (2014). Thermodynamics and Energy Conversion. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 597 p.

J. Vinha, I. Valovirta, M. Korpi, A. Mikkilä, P. Käkälä (2005). Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. Tutkimusraportti 129. Tampereen Teknillinen Yliopisto. 100 s.

H. Young, R. Freedman (2008). University physics with modern physics. Pearson Education. 1551 p.

LIITE A: MITTAUSTULOKSET THERMISOL

Näytteet 300x300 mm², 1kpl

#	Materiaali	pvm		λ_{10} [W/(m·K)]	λ_0 [W/(m·K)]	λ_{10} [W/(m·K)]	λ_{30} [W/(m·K)]
28	ThermiSol EPS 100S Lattia	30.1.2017		0,03344	0,03460	0,03576	0,03832
29	ThermiSol EPS 100S Lattia	30.1.2017		0,03342	0,03458	0,03577	0,03833
30	ThermiSol EPS 100S Lattia	30.1.2017		0,03322	0,03433	0,03544	0,03788
31	ThermiSol EPS 100S Lattia	15.2.2017		0,03286	0,03394	0,03508	0,03748
32	ThermiSol EPS 100S Lattia	15.2.2017		0,03346	0,03458	0,03572	0,03822
33	ThermiSol EPS 100S Lattia	15.2.2017		0,03319	0,03432	0,03546	0,03796
34	ThermiSol EPS 100S Lattia	16.2.2017		0,03292	0,03399	0,03510	0,03749
35	ThermiSol EPS 100S Lattia	16.2.2017		0,03315	0,03424	0,03537	0,03781
36	ThermiSol EPS 100S Lattia	16.2.2017		0,03304	0,03413	0,03521	0,03764
keskiarvo				0,03319	0,03430	0,03543	0,03790
keskihajonta				0,00021	0,00024	0,00026	0,00031

#	Materiaali	pvm		λ_{10} [W/(m·K)]	λ_0 [W/(m·K)]	λ_{10} [W/(m·K)]	λ_{30} [W/(m·K)]
37	Kingspan Kooltherm	3.12.2015	paketti 1	0,02152	0,01934	0,01912	0,02196
38	Kingspan Kooltherm	3.12.2015	paketti 1	0,02025	0,01922	0,01944	0,02254
39	Kingspan Kooltherm	3.12.2015	paketti 1	0,02049	0,01914	0,01928	0,02192
40	Kingspan Kooltherm	3.12.2015	paketti 2	0,02149	0,01979	0,01958	0,02225
41	Kingspan Kooltherm	3.12.2015	paketti 2	0,02039	0,01936	0,01964	0,02266
42	Kingspan Kooltherm	3.12.2015	paketti 2	0,02059	0,01931	0,01948	0,02224
43	Kingspan Kooltherm	3.12.2015	paketti 3	0,02126	0,02018	0,01990	0,02241
44	Kingspan Kooltherm	3.12.2015	paketti 3	0,02078	0,01964	0,01973	0,02246
45	Kingspan Kooltherm	3.12.2015	paketti 3	0,02067	0,01920	0,01969	0,02279
keskiarvo				0,02083	0,01946	0,01954	0,02236
keskihajonta				0,00045	0,00032	0,00023	0,00028

#	Materiaali	pvm		λ_{-10} [W/(m·K)]	λ_0 [W/(m·K)]	λ_{10} [W/(m·K)]	λ_{30} [W/(m·K)]
46	ThemiSol EPS 60S Lattia	6.12.2016		0,03637	0,03774	0,03919	0,04226
47	ThemiSol EPS 60S Lattia	6.12.2016		0,03617	0,03747	0,03882	0,04183
48	ThemiSol EPS 60S Lattia	6.12.2016		0,03575	0,03706	0,03840	0,04136
49	ThemiSol EPS 60S Lattia	16.2.2017		0,03602	0,03729	0,03870	0,04167
50	ThemiSol EPS 60S Lattia	16.2.2017		0,03599	0,03734	0,03873	0,04176
51	ThemiSol EPS 60S Lattia	16.2.2017		0,03574	0,03707	0,03842	0,04136
52	ThemiSol EPS 60S Lattia	3.2.2017		0,03454	0,03576	0,03699	0,03968
53	ThemiSol EPS 60S Lattia	3.2.2017		0,03446	0,03563	0,03674	0,03945
54	ThemiSol EPS 60S Lattia	3.2.2017		0,03451	0,03571	0,03692	0,03957
keskiarvo keskihajonta				0,03551	0,03679	0,03810	0,04099
				0,00073	0,00079	0,00089	0,00104

#	Materiaali	pvm		λ_{-10} [W/(m·K)]	λ_0 [W/(m·K)]	λ_{10} [W/(m·K)]	λ_{30} [W/(m·K)]
55	ThermiSol Platina Lattia	15.9.2016		0,02910	0,03005	0,03100	0,03312
56	ThermiSol Platina Lattia	15.9.2016		0,02916	0,03011	0,03098	0,03310
57	ThermiSol Platina Lattia	15.9.2016		0,02916	0,03012	0,03097	0,03313
58	ThermiSol Platina Lattia	15.9.2016		0,02910	0,03006	0,03092	0,03307
59	ThermiSol Platina Lattia	15.9.2016		0,02899	0,02997	0,03085	0,03295
60	ThermiSol Platina Lattia	15.9.2016		0,02893	0,02994	0,03089	0,03306
61	ThermiSol Platina Lattia	16.2.2017		0,02935	0,03042	0,03140	0,03368
62	ThermiSol Platina Lattia	16.2.2017		0,02912	0,03011	0,03105	0,03328
63	ThermiSol Platina Lattia	16.2.2017		0,02918	0,03017	0,03113	0,03338
keskiarvo keskihajonta				0,02912	0,03011	0,03102	0,03320
				0,00011	0,00013	0,00016	0,00021

#	Materiaali	pvm		λ_{10} [W/(m·K)]	λ_0 [W/(m·K)]	λ_{10} [W/(m·K)]	λ_{30} [W/(m·K)]
64	BEWI XPS 300/50PP	1.12.2016		0,03252	0,03381	0,03507	0,03773
65	BEWI XPS 300/50PP	1.12.2016		0,03251	0,03378	0,03505	0,03764
66	BEWI XPS 300/50PP	1.12.2016		0,03255	0,03388	0,03520	0,03790
67	BEWI XPS 300/50PP	2.12.2016		0,03259	0,03391	0,03518	0,03782
68	BEWI XPS 300/50PP	2.12.2016		0,03261	0,03387	0,03511	0,03779
69	BEWI XPS 300/50PP	2.12.2016		0,03258	0,03392	0,03524	0,03793
70	BEWI XPS 300	2.12.2016		0,03255	0,03377	0,03497	0,03765
71	BEWI XPS 300	2.12.2016		0,03254	0,03378	0,03501	0,03763
72	BEWI XPS 300	2.12.2016		0,03256	0,03383	0,03506	0,03771
keskiarvo				0,03256	0,03384	0,03510	0,03776
keskihajonta				0,00003	0,00005	0,00009	0,00011

#	Materiaali	pvm		λ_{10} [W/(m·K)]	λ_0 [W/(m·K)]	λ_{10} [W/(m·K)]	λ_{30} [W/(m·K)]
73	Paroc eXtra	11.1.2017		0,03165	0,03320	0,03482	0,03847
74	Paroc eXtra	11.1.2017		0,03179	0,03330	0,03489	0,03868
75	Paroc eXtra	11.1.2017		0,03122	0,03267	0,03416	0,03767
76	Paroc eXtra	5.1.2017		0,03159	0,03315	0,03466	0,03827
77	Paroc eXtra	5.1.2017		0,03214	0,03389	0,03549	0,03891
78	Paroc eXtra	5.1.2017		0,03200	0,03366	0,03527	0,03897
79	Paroc eXtra	-		0,03160	0,03311	0,03464	0,03802
80	Paroc eXtra	-		0,03168	0,03319	0,03474	0,03847
81	Paroc eXtra	-		0,03102	0,03249	0,03383	0,03715
keskiarvo				0,03163	0,03318	0,03472	0,03829
keskihajonta				0,00033	0,00041	0,00048	0,00056

#	Materiaali	pvm		λ_{10} [W/(m·K)]	λ_0 [W/(m·K)]	λ_{10} [W/(m·K)]	λ_{30} [W/(m·K)]
82	Isover KL-37	12.1.2017		0,03234	0,03407	0,03592	0,04015
83	Isover KL-37	12.1.2017		0,03242	0,03418	0,03610	0,04029
84	Isover KL-37	12.1.2017		0,03172	0,03337	0,03517	0,03887
85	Isover KL-37	4.12.2016		0,03247	0,03420	0,03586	0,03985
86	Isover KL-37	4.12.2016		0,03316	0,03493	0,03694	0,04135
87	Isover KL-37	4.12.2016		0,03301	0,03482	0,03678	0,04125
88	Isover KL-37	8.11.2016		0,03150	0,03304	0,03476	0,03852
89	Isover KL-37	8.11.2016		0,03173	0,03325	0,03498	0,03870
90	Isover KL-37	8.11.2016		0,03219	0,03392	0,03584	0,03986
keskiarvo				0,03228	0,03398	0,03582	0,03987
keskihajonta				0,00054	0,00062	0,00071	0,00097

#	Materiaali	pvm		λ_{10} [W/(m·K)]	λ_0 [W/(m·K)]	λ_{10} [W/(m·K)]	λ_{30} [W/(m·K)]
91	Ekovilla Levy	17.10.2016		0,03589	0,03755	0,03923	0,04046
92	Ekovilla Levy	17.10.2016		0,03514	0,03704	0,03899	0,04049
93	Ekovilla Levy	17.10.2016		0,03563	0,03696	0,03875	0,04105
94	Ekovilla Levy	28.12.2016		0,03555	0,03695	0,03864	0,04189
95	Ekovilla Levy	28.12.2016		0,03610	0,03763	0,03933	0,04197
96	Ekovilla Levy	28.12.2016		0,03591	0,03726	0,03942	0,04158
97	Ekovilla Levy	12.8.2015		0,03604	0,03786	0,03927	0,04191
98	Ekovilla Levy	12.8.2015		0,03657	0,03844	0,04010	0,04216
99	Ekovilla Levy	12.8.2015		0,03650	0,03818	0,03957	0,04262
keskiarvo				0,03593	0,03754	0,03926	0,04157
keskihajonta				0,00043	0,00051	0,00042	0,00071

#	Materiaali	pvm		λ_{-10} [W/(m·K)]	λ_0 [W/(m·K)]	λ_{10} [W/(m·K)]	λ_{30} [W/(m·K)]
100	Kingspan Therma TP 10	-	levy 1	0,02402	0,02186	0,02102	0,02318
101	Kingspan Therma TP 10	-	levy 1	0,02421	0,02219	0,02135	0,02355
102	Kingspan Therma TP 10	-	levy 1	0,02417	0,02202	0,02119	0,02335
103	Kingspan Therma TP 10	-	levy 2	0,02295	0,02125	0,02070	0,02294
104	Kingspan Therma TP 10	-	levy 2	0,02338	0,02164	0,02102	0,02325
105	Kingspan Therma TP 10	-	levy 2	0,02365	0,02174	0,02098	0,02326
106	Kingspan Therma TP 10	-	levy 3	0,02419	0,02220	0,02135	0,02354
107	Kingspan Therma TP 10	-	levy 3	0,02391	0,02183	0,02101	0,02321
108	Kingspan Therma TP 10	-	levy 3	0,02428	0,02199	0,02119	0,02341
keskiarvo				0,02386	0,02186	0,02109	0,02330
keskihajonta				0,00043	0,00028	0,00019	0,00018

LIITE B: TUTKIMUSRAPORTTI LNE

Le progrès, une passion à partager

LABORATOIRE DE TRAPPES
29 avenue Roger Hennequin - 78197 Trappes Cedex
Tél. : 01 30 69 10 00 - Fax : 01 30 69 12 34

File P167902 - Document DE/1 - Page 1/6

TEST REPORT

Applicant:	THERMISOL OY Toravantie 18 38210 SASTAMALA FINLAND
Order reference:	Agreement : 03/09/2017 Quotation 2017/2687 : 02/17/2017
Subject :	Thermal conductivity
Reference document:	Standard ISO 8302
Samples identification:	Mineral wool, expanded polystyrene, extruded polystyrene foam, polyurethane or polyisocyanurate foam, phenolic foam, cellulose panel

The reproduction of this test report is only authorised in the form of a facsimile of the entire document. It comprises 6 pages.

Laboratoire national de métrologie et d'essais

Établissement public à caractère industriel et commercial • Siège social : 1, rue Gaston Boissier - 75724 Paris Cedex 15 • Tél. : 01 40 43 37 00
Fax : 01 40 43 37 37 • E-mail : info@lne.fr • Internet : www.lne.fr • Siret : 313 320 244 00012 • NAF : 743 B • TVA : FR 92 313 320 244
Barclays Paris Centrale IBAN : FR76 3058 8600 0149 7267 4010 170 BIC : BARCFRPP

Dossier P167902 - Document DE/1- Page 2/6

1. PRODUCT IDENTIFICATION AND SPECIMEN CHARACTERISTICS

The applicant sent to the Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) 27 pairs of specimen of isolation material. Its dimensions were 500 x 500 x 50 mm.

material	Sampling reference	Dimensions (mm) L x l	thickness (mm)	weight (g)	Density (kg/m ³)
expanded polystyrene (white) EPS	P167902-1R1	500 x 500	49.3	233	18.9
	P167902-1R2	500 x 500	49.2	239	19.4
	P167902-2R1	500 x 500	49.2	243	19.7
	P167902-2R2	500 x 500	49.2	236	19.2
	P167902-3R1	500 x 500	49.1	238	19.4
	P167902-3R2	500 x 500	49.2	233	18.9
phenolic foam PF	P167902-4R1	501 x 501	50.9	464	36.4
	P167902-4R2	500 x 499	51.0	483	38.0
	P167902-5R1	501 x 501	51.5	460	35.6
	P167902-5R2	501 x 500	50.9	468	36.6
	P167902-6R1	501 x 500	50.9	461	36.2
	P167902-6R2	501 x 501	50.9	466	36.5
expanded polystyrene (white) EPS	P167902-7R1	500 x 500	49.8	185	14.9
	P167902-7R2	500 x 500	49.8	183	14.7
	P167902-8R1	500 x 500	49.8	192	15.4
	P167902-8R2	500 x 500	49.8	188	15.2
	P167902-9R1	500 x 500	49.6	239	19.3
	P167902-9R2	500 x 500	49.6	229	18.5
polyurethane or polyisocyanurate foam PU	P167902-10R1	500 x 498	46.0	331	28.9
	P167902-10R2	500 x 498	46.0	331	28.9
	P167902-11R1	501 x 498	46.1	334	29.0
	P167902-11R2	500 x 498	46.1	333	29.0
	P167902-12R1	501 x 498	46.1	331	28.8
	P167902-12R2	501 x 498	46.0	332	28.9
extruded polystyrene foam XPS	P167902-13R1	500 x 499	49.6	349	28.2
	P167902-13R2	499 x 499	49.6	349	28.3
	P167902-14R1	500 x 499	49.3	350	28.5
	P167902-14R2	500 x 500	49.3	350	28.4
	P167902-15R1	500 x 499	49.3	350	28.5
	P167902-15R2	500 x 500	49.3	351	28.4

L = length

l = width

Table 1a : Specimen characteristics

Dossier P167902 - Document DE/1- Page 3/6

material	Sampling reference	Dimensions (mm) L x l	thickness (mm)	weight (g)	Density (kg/m ³)
expanded polystyrene (grey) EPS	P167902-16R1	501 x 500	49.9	207	16.5
	P167902-16R2	501 x 500	49.8	203	16.2
	P167902-17R1	501 x 501	49.8	202	16.1
	P167902-17R2	501 x 501	49.8	204	16.3
	P167902-18R1	500 x 500	49.5	191	15.5
	P167902-18R2	500 x 499	49.4	190	15.4
Mineral wool (Glass) MW	P167902-19R1	500 x 500	50.0	185	14.8
	P167902-19R2	500 x 500	50.0	217	17.3
	P167902-20R1	500 x 500	50.0	188	15.0
	P167902-20R2	500 x 500	50.0	171	13.7
	P167902-21R1	500 x 500	50.0	184	14.7
	P167902-21R2	500 x 500	50.0	175	14.4
cellulose panel	P167902-22R1	500 x 500	50.0	545	43.6
	P167902-22R2	500 x 500	50.0	542	43.4
	P167902-23R1	500 x 500	50.0	541	43.3
	P167902-23R2	500 x 500	50.0	434	42.8
	P167902-24R1	500 x 500	50.0	584	46.7
	P167902-24R2	500 x 500	50.0	575	46.0
Mineral wool (Stone) MW	P167902-25R1	500 x 500	50.0	416	33.3
	P167902-25R2	500 x 500	50.0	420	33.6
	P167902-26R1	500 x 500	50.0	418	33.4
	P167902-26R2	500 x 500	50.0	429	34.3
	P167902-27R1	500 x 500	50.0	433	34.6
	P167902-27R2	500 x 500	50.0	423	33.7

L = length l = width

Table 1b : Specimen characteristics

2. MEASUREMENT CONDITION

Measurements of thermal conductivity were carried out in accordance with the international standard ISO 8302 with a guarded hot plate.

Dossier P167902 - Document DE/1- Page 4/6

3. MEASUREMENT RESULTS

Sample identification P167902 -	Date measurement (mm.dd.yy)	Temperatures (°C)		Heat flow density (W/m ²) $\phi/2S$	Thermal resistance (m ² .K/W) R _{th}
		Average θ_m	Difference $\Delta\theta$		
		θ_m	$\Delta\theta_m$		
1R1 & 1R2	25.04.17	30.0	30.0	22.94	1.308
	25.04.17	10.0	38.0	27.52	1.381
	26.04.17	0.0	38.0	26.82	1.417
	26.04.17	-10.0	38.0	25.82	1.472
	27.04.17			16.30	1.595
2R1 & 2R2	28.04.17		26.0	16.38	1.587
3R1 & 3R2	02.05.17			16.33	1.592
4R1 & 4R2	03.05.17			7.07	2.262
5R1 & 5R2	04.05.17		16.0	6.84	2.338
6R1 & 6R2	05.05.17			6.92	2.314
7R1 & 7R2	09.05.17			17.44	1.491
8R1 & 8R2	12.05.17		26.0	17.44	1.491
9R1 & 9R2	15.05.17			16.88	1.540
10R1 & 10R2	16.05.17			9.46	1.690
11R1 & 11R2	17.05.17		16.0	9.37	1.708
12R1 & 12R2	18.05.17			9.39	1.705
13R1 & 13R2	22.05.17			14.67	1.636
14R1 & 14R2	23.05.17		24.0	14.85	1.616
15R1 & 15R2	24.05.17			14.84	1.617
16R1 & 16R2	29.05.17			14.09	1.846
17R1 & 17R2	30.05.17		26.0	14.25	1.824
18R1 & 18R2	31.05.17			14.30	1.818
18R1 & 19R2	01.06.17			14.77	1.761
20R1 & 20R2	07.06.17		26.0	14.82	1.754
21R1 & 21R2	08.06.17			14.98	1.736
22R1 & 22R2	12.06.17			16.59	1.567
23R1 & 23R2	13.06.17		26.0	16.69	1.558
24R1 & 24R2	09.06.17			17.11	1.520
25R1 & 25R2	20.06.17			14.61	1.779
26R1 & 26R2	19.06.17		26.0	14.56	1.786
27R1 & 27R2	16.06.17			14.56	1.786

$$\theta_m = (\theta_h + \theta_c) / 2$$

$$\Delta\theta = (\theta_h - \theta_c)$$

Table 2: thermal resistance measurement

Dossier P167902 - Document DE/1- Page 5/6

4. COMPILATION OF RESULTS

Product reference	Sample identification P167902 -	Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Thermal conductivity λ (mW/(m.K))	Uncertainty $\Delta\lambda$ (mW/(m.K))	Mean temperature (°C)
expanded polystyrene (white) EPS	1R1 & 1R2	49.3	19.2	30.9	± 1.2	-30
	2R1 & 2R2	49.2	19.4	31.0	± 1.2	
	3R1 & 3R2	49.1	19.2	30.9	± 1.2	
phenolic foam PF	4R1 & 4R2	50.9	37.2	22.5	± 0.9	
	5R1 & 5R2	51.2	36.1	21.9	± 0.9	
	6R1 & 6R2	50.9	36.3	22.0	± 0.9	
expanded polystyrene (white) EPS	7R1 & 7R2	49.8	14.8	33.4	± 1.3	
	8R1 & 8R2	49.8	15.3	33.4	± 1.3	
	9R1 & 9R2	49.6	18.9	32.2	± 1.3	
polyurethane or polyisocyanurate foam PU	10R1 & 10R2	46.0	28.9	27.2	± 1.1	
	11R1 & 11R2	46.1	29.0	27.0	± 1.1	
	12R1 & 12R2	46.0	28.9	27.0	± 1.1	
extruded polystyrene foam XPS	13R1 & 13R2	49.6	28.3	30.3	± 1.2	
	14R1 & 14R2	49.3	28.5	30.5	± 1.2	
	15R1 & 15R2	49.3	28.5	30.5	± 1.2	
expanded polystyrene (grey) EPS	16R1 & 16R2	49.8	16.4	27.0	± 1.1	
	17R1 & 17R2	49.8	16.3	27.3	± 1.1	
	18R1 & 18R2	49.5	15.5	27.2	± 1.1	
Mineral wool (Glass) MW	18R1 & 19R2	50.0	16.1	28.4	± 1.1	
	20R1 & 20R2	50.0	14.3	28.5	± 1.1	
	21R1 & 21R2	50.0	14.4	28.8	± 1.2	
cellulose panel	22R1 & 22R2	50.0	43.5	31.9	± 1.3	
	23R1 & 23R2	50.0	43.0	32.1	± 1.3	
	24R1 & 24R2	50.0	46.3	32.9	± 1.3	
Mineral wool (Stone) MW	25R1 & 25R2	50.0	33.4	28.1	± 1.1	
	26R1 & 26R2	50.0	33.9	28.0	± 1.1	
	27R1 & 27R2	50.0	34.2	28.0	± 1.1	

Table 3 : Compilation of results at -30°C

Dossier P167902 - Document DE/1- Page 6/6

Product reference	Sample reference	Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Mean temperature (°C)	Thermal conductivity λ (mW/(m.K))	Uncertainty $\Delta\lambda$ (mW/(m.K))
expanded polystyrene (white) EPS	P167902-1R1 & P167902-1R2	49.3	19.2	30.0	37.7	± 1.5
				10.0	35.7	± 1.1
				0.0	34.8	± 1.0
				-10.0	33.5	± 1.3
				-30.0	30.9	± 1.2

Table 4 : Compilation of results of EPS sample (P167902 1R1 &1R2)

Trappes, the July, 26th 2017

Test achievement
Yann GARCIA



Technical Manager

Alain KOENEN

The results which are quoted are only applicable to the sample, the product or material submitted to LNE and which is fully described in the document.