



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

**TUUKKA HAKKARAINEN**  
**UUSIEN LÄMMÖNERISTYS- JA FAASIMUUTOSMATERIAALIEN**  
**TOIMINTA RAKENNUKSISSA**

Diplomityö

Tarkastajat: Dosentti Juha Vinha ja  
TkT Jyrki Kesti  
Tarkastajat ja aihe hyväksytty  
Rakennetun ympäristön tiedekunta-  
neuvoston  
kokouksessa 7. huhtikuuta 2010

# TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennetun ympäristön tiedekunta

Rakennustekniikan koulutusohjelma

**HAKKARAINEN, TUUKKA:** Uusien lämmöneristys- ja faasimuutosmateriaalien toiminta rakennuksissa

Diplomityö, 176 sivua

Kesäkuu 2010

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastajat: Dosentti Juha Vinha, TkT Jyrki Kesti

Avainsanat: lämmöneriste, lämmönjohtavuus, faasimuutos, lämmön varastointi

Sekä kansallisesti että kansainvälisesti tunnetaan tällä hetkellä painetta pienentää rakennusten energiankulutusta lämmitys- ja jäähdytystarvetta pienentämällä. Tutkimuksen tavoitteena oli tehdä yleiskatsaus uudentyyppisten lämmöneristeiden ja faasimuutosmateriaalien tarjontaan, ominaisuuksiin ja soveltamiseen rakentamisessa.

Työ on luonteeltaan kirjallisuusselvitys, joka jakaantuu kahteen osioon: lämmöneristeisiin ja faasimuutosmateriaaleihin. Uusiksi lämmöneristeiksi työssä lasketaan tuotteet, joita ei ole käytetty laajamittaisesti rakennussovelluksissa Suomessa. Faasimuutosmateriaalit ovat materiaaleja, joilla voidaan tasata rakennuksen lämpötilaa käyttämällä hyväksi kyseisten materiaalien termodynaamisia prosesseja rakennuksen käyttölämpötila-alueella. Lämpötilan tasaaminen perustuu materiaalin kykyyn varastoida ja luovuttaa suuri määrä lämpöä faasimuutoksessa.

Osa tutkimuksessa käsitellyistä lämmöneristeistä osoittautui potentiaalisiksi vaihtoehdoiksi korvaamaan tavanomaisia lämmöneristeitä tai käytettäväksi niiden rinnalla. Markkinoilta löytyi myös lämmöneristeitä, joiden eristyskykyä on pidetty todellista parempana. Tutkimuksessa käsitellyistä lämmöneristeistä alhaisimmat lämmönjohtavuudet olivat tyhjiöeristeillä (0,008 W/(mK)) ja aerogeeli-eristeillä (0,014 W/(mK)). Pelkästään alhaista lämmönjohtavuutta ei voida pitää materiaalien paremmuuden mittarina, vaan tarkastelussa tulee ottaa huomioon kokonaisuus kuten esim. materiaalien kestävyys, hinta ja työtekniinen soveltuvuus. Tulevaisuudessa rakentamiseen käytettävien lämmöneristeiden kehityksessä tulisi panostaa pienihuokoisten eristemateriaalien kehittämiseen ja niiden valmistuskustannusten laskemiseen. Valoa läpäisevät lämmöneristeet ovat osoittautuneet potentiaalisiksi vaihtoehdoiksi muun muassa rakennuksen valaistuskustannusten pienentämisessä, sillä niiden lämmöneristävyysominaisuudet ovat parempia ikkunoihin verrattuna.

Faasimuutosmateriaalien käyttöä lyhyt- ja pitkäaikaiseen lämmönvarastointiin rakennussovelluksissa on tutkittu jo usean vuosikymmenen ajan lukuisissa tutkimuksissa ja todellisista kohteissa suoritetuilla mittauksilla. Ne ovat osoittaneet, että faasimuutosmateriaalien käyttö kasvattaa rakenteiden lämmönvaraamiskykyä merkittävästi. Sen ansiosta on mahdollista pienentää rakennuksen energiankulutusta käyttämällä jäähdytyksessä ja/tai lämmityksessä apuna luonnollista viileää ilmaa tai hukkalämpöä. Todellista arviota faasimuutosmateriaalien taloudellisesta kannattavuudesta eli jäähdytys- tai lämmitysenergiankulutuksen vähenemisestä on vaikeaa antaa. Näiden arviointi vaatisi laskeutumallien luomista, jotka ottaisivat huomioon useat rakennuksen lämmitys- ja jäähdytystarpeeseen vaikuttavat muuttujat.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

The Faculty of Built Environment

Master's Degree Programme in Civil Engineering

**HAKKARAINEN, TUUKKA:** Performance of new kinds of thermal insulation materials and phase change materials in building applications

Master of Science Thesis, 176 pages

June 2010

Major: Structural Engineering

Examiners: Adjunct Professor Juha Vinha, D. Sc. Jyrki Kesti

Keywords: thermal insulation, thermal conductivity, phase change, thermal energy storage

Due to the current state of energy politics, the pressure to reduce energy consumption by reducing the need for heating and cooling is known both nationally and internationally. The objective of the thesis is to make an overview of novel thermal insulation materials and phase change materials (PCMs) and to inspect the material suppliers, properties and their potential in building applications.

The thesis is a literature report, which is divided into two sections covering thermal insulation materials and PCMs. Here, the novel thermal insulations are defined as the products which have not yet been widely used in building applications in Finland. The PCMs are materials which can be used to stabilise the temperature of a building by exploiting the thermodynamic processes that occur in them. The temperature levelling properties of PCMs are based on their ability to store and release large amounts of energy in phase transition.

Some of the insulation materials discussed in the thesis proved to be potential alternatives to replace or to be used with the conventional insulation materials. On the other hand, the literature analysis revealed that some of the thermal insulation products on the market are considered to have better insulation properties than they really do. The lowest thermal conductivities of insulation products studied in the thesis are in the vacuum insulation panels (0,008 W/(mK)) and aerogel insulation materials (0,014 W/(mK)). However, just low thermal conductivity cannot be considered as a measure of superiority of an insulation material. Attention has to be paid also to the other material properties including durability, price and suitability to the construction work. In the future, the development of insulation materials should be concentrated on the production of small-pore insulation materials with low material and manufacturing costs. Transparent insulation materials have proved to be potential alternatives in the reducing lighting costs of the building because their insulation properties are better compared to the windows.

The use of PCMs in the building applications for short- and long-term heat storing has been examined already in numerous researches during several decades using laboratory and in-situ measurements from real buildings. The researches have shown that the use of PCMs significantly increases the thermal capacity of light-weight structures. Consequently, it is possible to reduce the cooling and/or heating need in the building using night ventilation or waste heat. The estimation of the economic viability PCMs would require computational examinations, which was not carried out in the thesis.

## ALKUSANAT

Tämä tutkimus on toteutettu Tampereen teknillisellä yliopistolla rakennustekniikan laitoksella. Työn tilaajana ja rahoittajana toimi Rautaruukki Oyj.

Työ suoritettiin dosentti Juha Vinhan ohjauksessa ja hän toimi myös työn toisena tarkastajana. Työn tilaajan edustajana ja työn toisena tarkastajana toimi tekniikan tohtori Jyrki Kesti Rautaruukki Oyj:stä. Haluan kiittää heitä työhön liittyvästä ohjauksesta ja asiantuntemuksesta sekä Rautaruukki Oyj:tä mielenkiintoisesta aiheesta.

Lisäksi haluan kiittää rakennustekniikan laitoksen työkavereitani, joita olen häirinnyt työhöni liittyvillä kysymyksillä.

Suuri kiitos rakkaille vanhemmilleni Annikille ja Askolle, jotka ovat tukeneet opiskelujani tarvittaessa sekä rakkaille sisaruksilleni, joilta olen saanut fysikaalista ja äidinkielellistä apua ongelmatilanteissa.

Lopuksi suuri kiitos kavereilleni, jotka ovat pitäneet ajatukseni koossa vaikeinakin hetkinä.

Tampereella, kesäkuussa 2010

---

Tuukka Hakkarainen

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	1
1.1	Tutkimuksen lähtökohdat.....	1
1.2	Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset .....	1
1.3	Tutkimuksen suoritus ja työn rakenne .....	2
2	TAUSTALLA OLEVA TEORIA .....	3
2.1	Lämmön siirtyminen .....	3
2.1.1	Johtuminen .....	3
2.1.2	Säteily.....	8
2.1.3	Konvektio.....	14
2.2	Faasimuutos .....	15
2.2.1	Aineiden olomuodot.....	15
2.2.2	Ominaislämpökapasiteetti .....	16
2.2.3	Faasimuutos .....	18
2.2.4	Entalpia .....	20
2.2.5	Lämmön varastointi .....	20
3	UUDENTYYPPISET LÄMMÖNERISTEET .....	23
3.1	Johdanto .....	23
3.2	VIP-eristeet .....	23
3.2.1	Toimintaperiaate ja rakenne.....	24
3.2.2	Eristeen ja runkoaineen valmistus.....	28
3.2.3	Vanheneminen .....	31
3.2.4	Kylmäsillat .....	34
3.2.5	Lämmönjohtavuuden suunnitteluvarvo.....	38
3.2.6	Kaupalliset tuotteet.....	40
3.2.6.1	va-Q-tec .....	41
3.2.6.2	Porextherm .....	46
3.2.6.3	Variotec GmbH .....	49
3.2.7	Käyttösovellukset ja asentaminen .....	51
3.2.8	Kustannukset ja niiden muodostuminen .....	56
3.3	Heijastavat lämmöneristeet.....	58
3.3.1	Multifoil-eristeet .....	59
3.3.1.1	Lämpötekniinen toiminta.....	60
3.3.1.2	Kaupalliset tuotteet.....	62
3.3.1.3	Lämpötekniisten ominaisuuksien testaus .....	70
3.3.1.4	Käyttösovellukset ja asentaminen .....	72
3.4	Aerogeeli-eristeet .....	76
3.4.1	Valmistus ja lämpötekniinen toiminta.....	76
3.4.2	Kaupalliset tuotteet.....	78
3.4.3	Aerogeeli-eristeiden soveltaminen rakentamisessa.....	79
3.5	Valoa läpäisevät lämmöneristeet.....	81

3.5.1	Toiminta ja soveltaminen.....	81
3.5.2	Kaupalliset tuotteet .....	83
3.6	Tutkittujen eristemateriaalien toiminta teräsrakenteisessa seinässä .....	87
3.6.1	Laskennassa käytetyt lämmöneristeet.....	87
3.6.2	Laskennan lähtötiedot ja oletukset.....	89
3.6.3	Tulokset.....	90
3.6.4	Taloudellisuus .....	91
3.7	Yhteenveto ja johtopäätökset.....	92
4	FAASIMUUTOSMATERIAALIT .....	94
4.1	Johdanto .....	94
4.2	Tuotteiden valintakriteerit.....	95
4.2.1	Lämpöfysikaaliset ominaisuudet.....	95
4.2.2	Kineettiset ominaisuudet.....	96
4.2.3	Kemialliset ominaisuudet.....	97
4.2.4	Taloudellisuus .....	98
4.3	Tuotteiden jaottelu .....	99
4.3.1	Epäorgaaniset materiaalit.....	100
4.3.2	Orgaaniset materiaalit .....	101
4.3.3	Eutektiset materiaalit.....	103
4.3.4	Yhteenveto .....	103
4.4	Kapselointi .....	105
4.4.1	Makrokapselointi .....	106
4.4.2	Mikrokapselointi .....	107
4.5	Kaupalliset tuotteet .....	109
4.5.1	Rubitherm GmbH.....	110
4.5.1.1	RT-parafiinit.....	110
4.5.1.2	SP (suolahydraattiparafiini).....	112
4.5.2	Climator Sweden AB .....	114
4.5.3	EPS Ltd .....	116
4.5.4	TEAP Energy Ltd .....	117
4.5.5	BASF.....	118
4.5.6	SGL Group – The Carbon Company .....	120
4.5.7	Dörken GmbH.....	122
4.5.8	Yhteenveto .....	124
4.6	PCM-materiaalien soveltaminen rakentamisessa.....	126
4.6.1	Käyttösovellusten jaottelu.....	126
4.6.2	PCM-materiaali betonissa tai laastissa.....	129
4.6.3	PCM-materiaali rakennuslevyssä.....	140
4.6.4	PCM-materiaali seinän ulko-osassa.....	143
4.6.4.1	Trombe wall .....	143
4.6.4.2	Solar wall.....	144
4.6.5	PCM-materiaali välipohjassa .....	149

4.7	Materiaalien soveltaminen teräsrakentamisessa .....	158
4.7.1	Sopiva PCM-materiaali välipohjasovellukseen .....	165
4.8	Yhteenveto ja johtopäätökset .....	167
LÄHTEET.....		169

# MERKINNÄT

A	pinta-ala	$m^2$
$E_b$	mustan kappaleen lähettämä säteilyteho	$W/m^2$
H	entalpia	J
L	sulamislämpö	J/kg
Q	lämpömäärä	J
R	lämmönvastus	$m^2K/W$
T	lämpötila	K
$T_f$	loppulämpötila	K
$T_i$	alkulämpötila	K
$T_m$	sulamispiste	K
$\Delta T$	lämpötilaero	K
U	lämmönläpäisykerroin	$W/(m^2K)$
U	sisäenergia	J
V	tilavuus	$m^3$
$a_m$	sulamisen aste (murtoluku)	(-)
c	ominaislämpökapasiteetti	J/(kgK)
$c_p$	ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa	J/(kgK)
$c_{pa}$	ilman ominaislämpökapasiteetti	J/(kgK)
d	paksuus	m
g	auringonsäteilyn kokonaisläpäisykerroin	(-)
$\Delta h_m$	sulamisententalpia	J/kg
m	massa	kg
p	paine	$N/m^2$
q	lämpövirran tiheys	$W/m^2$
$\Phi$	lämpövirta	W
$\alpha$	absorptiokerroin	-
$\alpha_{conv}$	konvektion lämmönsiirtokerroin	$W/(m^2K)$
$\alpha_{rad}$	säteilyn lämmönsiirtokerroin	$W/(m^2K)$
$\varepsilon$	emissiviteetti	-
$\lambda$	lämmönjohtavuus	$W/(mK)$
$\rho$	heijastuskerroin	-
$\sigma$	Stefan-Boltzmannin vakio ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/(m^2K^4)$ )	$W/m^2$
$\tau$	läpäisykerroin	-



## TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

<b>Alkaani</b>	Alkaani on hiilivety, jossa hiiliatomien välillä on vain yksinkertaisia kovalenttisia sidoksia. Alkaaneja kutsutaan myös tyydyttyneiksi hiilivedyiksi, sillä ne sisältävät suurimman mahdollisen määrän vetyä hiiliatomia kohden. ( $C_nH_{2n+2}$ )
<b>Dispersio</b>	Dispersio on kahden toisiinsa liukenemattoman aineen seos, jossa toinen aine on pieniksi osiksi jakaantuneena toisessa aineessa, dispersioväliaineessa.
<b>Emissiviteetti</b>	Emissiviteetti, $\epsilon$ , kuvaa materiaalin pinnan kykyä lähettää lämpösäteilyä verrattuna ns. mustan kappaleen lähettämään lämpösäteilyn määrään samassa lämpötilassa. Musta kappale lähettää eniten lämpösäteilyä ja sen emissiviteetti on 1,0. Muiden kappaleiden emissiviteetit vaihtelevat välillä 0...1.
<b>Esteri</b>	Esterit ovat orgaanisia yhdisteitä, jotka ovat muodostuneet orgaanisesta tai epäorgaanisesta haposta, jonka OH-ryhmä (hydroksidiryhmä) on korvautunut -O-alkyyli-ryhmällä. Muun muassa luonnosta saatavat vahat ja rasvat ovat estereitä.
<b>Eutektinen</b>	Eutektinen seos on kahden tai useamman aineen seos, jonka mooliosuudet ovat sellaiset, että seoksen sulamispiste on mahdollisimman alhainen.
<b>Faasimuutos</b>	Faasimuutos on aineen lämpötilan muutoksesta johtuva olomuodon muutos. Tyypillisin esimerkki aineiden olomuodon muutoksesta on veden jäätyminen ja jään sulaminen.
<b>Hapetin</b>	Kemiallisessa reaktiossa, jota kutsutaan hapettumiseksi, hapettava aine luovuttaa elektroneja pelkistyvälle aineelle. Hapettavaa ainetta kutsutaan pelkistimeksi ja pelkistyvää ainetta hapettimeksi.
<b>Hydraatti</b>	Kemiassa hydraatti on aine, johon on sitoutunut vettä ( $H_2O$ ) ja josta sitä voidaan poistaa.

<b>Höyrinsulku</b>	Höyrinsulku on materiaalikerros, jonka vesihöyrynläpäisevyys on pieni ja se estää haitallisen vesihöyryn diffuusion rakennuksen vaipparakenteisiin ja -rakenteissa. Höyrinsulku voi toimia myös ilmansulkuna.
<b>Johtuminen</b>	Johtumisessa lämpöenergia siirtyy materiaalien molekyylien liike-energiana, niiden värähdellessä toisiaan vasten. Johtuminen on ainoa lämmön siirtymismuoto kiinteässä materiaalissa.
<b>Konvektio</b>	Konvektiossa kaasu tai neste virtaa ulkopuolisen voiman (pakotettu konvektio) tai lämpötilaerojen aiheuttamien tiheyserojen (luonnollinen konvektio) vaikutuksesta. Lämpöenergiaa siirtyy virtaavan aineen mukana.
<b>Kylmäsilta</b>	Kylmäsilta on rakennusosassa oleva, viereisiin aineisiin verrattuna hyvin lämpöä johtavasta aineesta tehty rakenneosa, jonka kohdalla lämpötilaeron vaikutuksesta rakennusosan pintojen läpi kulkevan lämpövirran tiheys on jatkuvuustilassa viereiseen alueeseen verrattuna suurempi.
<b>Latentti lämpö</b>	Latentti lämpö kuvaa energiamäärää, joka sitoutuu tai vapautuu massayksikön painoisen materiaalikkappaleen faasimuutoksissa. Yksikkö (J/kg).
<b>Lämmönjohtavuus</b>	Lämmönjohtavuus, $\lambda$ , osoittaa lämpömäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen ainekerroksen, kun lämpötilaero ainekerroksen eri puolilla olevissa ilmatiloissa on yksikön suuruinen. Yksikkö (W/(mK)).
<b>Lämmönläpäisykerroin</b>	Lämmönläpäisykerroin, $U$ , ilmoittaa lämpövirran, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pinta-alayksikön suuruisen materiaalikerroksen tai rakenneosan, kun lämpötilaero kerroksen eri puolilla olevissa ilmatiloissa on yksikön suuruinen. Yksikkö (W/(m <sup>2</sup> K)).
<b>Lämmönvastus</b>	Lämmönvastus, $R$ , osoittaa materiaalikerroksen tai rakenneosan lämmönsiirtymisvastuksen. Se lasketaan kaavalla $R = d/\lambda$ . Yksikkö (m <sup>2</sup> K/W).

<b>Ominaislämpökapasiteetti</b>	Ominaislämpökapasiteetti (lyhyemmin ominaislämpö), $c$ , on materiaalin ominaisuus, joka kuvaa lämpöenergian määrää, joka vaaditaan massayksikön painoisen materiaalikappaleen lämpötilan nostamiseen yhdellä asteella. Yksikkö (J/(kgK)).
<b>Sulamislämpö</b>	Sulamislämpö, $L$ , kuvaa energiamäärää, joka sitoutuu tai vapautuu massayksikön painoisen materiaalikappaleen kiinteään ja nestemäisen olomuodon välisissä faasimuutoksissa. Yksikkö (J/kg).
<b>Säteily</b>	Säteilyssä lämpöenergia siirtyy sähkömagneettisen aalto liikkeen välityksellä. Lämmön siirtyminen säteilyllä ei vaadi väliainetta ja se on tehokkainta tyhjiössä.
<b>Tuntuva lämpö</b>	Lämpöä, jota materiaalit varastoivat lämmitessä ja luovuttavat jäähtyessä, kun faasimuutosta ei tapahdu. Materiaalin ominaislämpökapasiteetti kuvaa materiaalin ominaisuutta varastoida tuntuva lämpöä. Yksikkö (J/kg).
<b>Tuulensuoja</b>	Tuulensuoja on materiaalikerros, jonka pääasiallinen tehtävä on estää tuulen aiheuttamat haitalliset ilmapirtaukset vaipparakenteiden lämmöneristekerroksessa.
<b>Vesihöyrynläpäisevyys</b>	Vesihöyrynläpäisevyys, $\delta_v$ , kuvaa vesimäärää, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun sen eri puolilla olevien ilmatilojen vesihöyrypitoisuuksien ero on yksikön suuruinen. Yksikkö ( $m^2/s$ ).

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Tutkimuksen lähtökohdat

Tällä hetkellä rakennusten energiankulutuksen pienentäminen on yksi merkittävimmistä tutkimuskohteista rakennusalalla kansainvälisesti. Tässä tutkimuksessa selvitettiin uudentyyppisten lämmöneristeiden ja faasimuutosmateriaalien (PCM / phase change material) ominaisuuksia ja soveltuvuutta erityisesti teräsrakentamiseen. Toistaiseksi uusien lämmöneristeiden ja PCM-materiaalien käyttö Suomen rakentamisessa on hyvin vähäistä, mutta niiden käytöllä on mahdollisuus parantaa rakennusten energiataloutta sekä parantaa rakennuksen sisäilmaolosuhteita. Tutkimus oli luonteeltaan kirjallisuus selvitys, joka sisältää pienimuotoisia laskennallisia tarkasteluja.

## 1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset

Tutkimuksen tavoitteena oli tehdä yleiskatsaus uudentyyppisten lämmöneristeiden ja faasimuutosmateriaalien tarjontaan, ominaisuuksiin ja soveltamiseen rakentamisessa. Kyseisten materiaalien osalta tarkastellaan lähinnä markkinoilla olevia tuotteita, mutta etenkin PCM-materiaalien osalta käsiteltiin myös tutkimustuloksia ei-kaupallisista tuotteista.

Tässä tutkimuksessa uudentyyppisiksi lämmöneristeiksi laskettiin matalan lämmönjohtavuuden ( $\lambda$ -arvon) omaavat tuotteet, kuten tyhjiöeristeet. Näiden lisäksi uusiksi lämmöneristeiksi luokiteltiin muilta ominaisuuksiltaan ja toimintaperiaatteiltaan tavanomaisista Suomessa käytössä olevista eristeistä eroavat tuotteet.

Lämmöneristeiden osalta tavoitteena oli selvittää tuotteiden tärkeimmät ominaisuudet, kuten lämmönjohtavuus, vesihöyrynläpäisevyys ja palo-ominaisuudet. Lisäksi tavoitteena oli selvittää tutkimukseen valittavien eristeiden lämpöteknisen toiminnan teoriaa, eli mihin niiden eristävyys perustuu.

Faasimuutosmateriaaleista oli tarkoituksena selvittää markkinoilta löytyvät tuotteet, jotka soveltuvat koostumuksen ja ominaisuuksien perusteella rakentamiseen. Työssä tarkasteltiin sulamispisteeltään sellaisia tuotteita, jotka edesauttavat toimistorakennuksen lämpötilan pysymistä sisäilmastoluokituksen (S1 ja S2) mukaisissa rajoissa. PCM-materiaalien käyttötarkoitus rakennussovelluksissa voidaan jakaa kolmeen kohtaan: lämpötilan tasaamiseen sekä lyhytaikaiseen ja pitkäaikaiseen energian varastointiin. Toisaalta lämpötilan tasaaminen on seurausta lämmönvarastoinnista, joten niitä ei voida

pitää täysin erillään toisistaan. Tässä työssä tutkittiin ainoastaan rakennuksen käyttölämpötilan tasaamista ja rakennuksen lämpötilahuipun siirtämismahdollisuuksia sekä energian lyhytaikaista varastointia faasimuutosmateriaaleja hyväksi käyttäen.

Faasimuutosmateriaalien osalta työssä ei tehty laskennallisia tarkasteluja, jotka vaatisivat laskentamallien luomista. Tutkimuksessa nojaututtiin aikaisempiin kirjallisuudesta ja materiaalivalmistajilta saatuihin tutkimustuloksiin ja luotiin pohjaa jatkotutkimukselle.

### 1.3 Tutkimuksen suoritus ja työn rakenne

Tutkimuksen ensimmäisessä osiossa (luku 2) käydään läpi lämmöneristeiden ja faasimuutosmateriaalien toiminnan taustalla olevaa teoriaa. Lämmöneristeisiin liittyen käydään läpi lämmön siirtymiseen liittyvää teoriaa ja PCM-materiaalien toiminnan ymmärtämistä varten tarkastellaan termodynamiikan perusteita, etenkin faasimuutosta.

Luvuissa 3 ja 4 käsiteltävien uudentyyppisten lämmöneristeisiin ja faasimuutosmateriaaleihin liittyvä tieto on peräisin aiheisiin liittyvästä kirjallisuudesta, materiaalivalmistajien Internet-sivuilta ja materiaalivalmistajien kanssa käydystä sähköpostiviestinnästä.

Luvussa 3 käsiteltävät uudet lämmöneristeet on jaettu neljään kategoriaan: tyhjiöeristeisiin, heijastaviin eristeisiin, nanohuokosiin arogeeli-eristeisiin ja valoa läpäiseviin eristeisiin. Kustakin eristemateriaaliryhmästä käydään läpi niiden lämpöteknisen toiminnan periaatteet, kaupalliset tuotteet ja materiaalivalmistajat, materiaalien soveltaminen rakentamisessa ja niiden käyttöön liittyviä erityishuomioita. Luvun 3 lopussa tarkastellaan tutkittujen eristemateriaalien käyttömahdollisuutta teräsrakenteisessa seinässä ja vertaillaan niiden kustannuksia.

Faasimuutosmateriaalien tutkimusosion (luku 4) alussa käsitellään niiltä vaadittavia ominaisuuksia sekä faasimuutosmateriaalien luokittelua ja suojaustapoja. Tämän jälkeen tehdään katsaus kaupallisten faasimuutosmateriaalien tarjontaan. Luvun loppuun on koottu tietoa materiaalien soveltamisesta rakentamisessa ja tutkimustuloksia aikaisemmista tutkimuksista. Viimeisenä kohtana tarkastellaan PCM-materiaalien soveltamista teräsrakentamisessa, lähinnä toimistorakennuksissa. Tässä osiossa tarkastellaan teräsrakenteiseen välipohjasovellukseen soveltuvia PCM-materiaaleja.

## 2 TAUSTALLA OLEVA TEORIA

### 2.1 Lämmön siirtyminen

Lämpö on aineen molekyylien liike-energiaa, joka kasvaa lämpötilan noustessa. Lämmön siirtyminen on yksi rakenteiden fysikaalisen toiminnan kannalta merkittävimmistä ilmiöistä. Edellytyksenä spontaanisti (ilman ulkoista työtä) tapahtuvalle lämmön siirtymiselle on, että on olemassa potentiaaliero eli lämpötilaero. Lämpö siirtyy aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan ja sillä on kolme eri siirtymismuotoa: johtuminen, säteily ja konvektio. Lämmön siirtyminen rakenteissa ja rakennusmateriaaleissa on yleensä seurausta näiden kolmen siirtymismuodon yhteisvaikutuksesta ja niiden suhteelliset osuudet vaihtelevat tapauskohtaisesti. Johtumista tapahtuu paikallaan olevassa väliaineessa, kuten kiinteässä materiaalissa. Konvektio eli kuljettuminen vaatii puolestaan liikkuvan väliaineen, esimerkiksi ilman tai kaasun ja säteily ei vaadi väliainetta ollenkaan. (Long 1999)

Rakennusmateriaaleista varsinkin lämmöneristeet ovat huokoisia materiaaleja, joissa lämpöä siirtyy johtumalla kiinteää materiaalia pitkin sekä konvektiolla ja säteilyllä huokosilmassa.

#### 2.1.1 Johtuminen

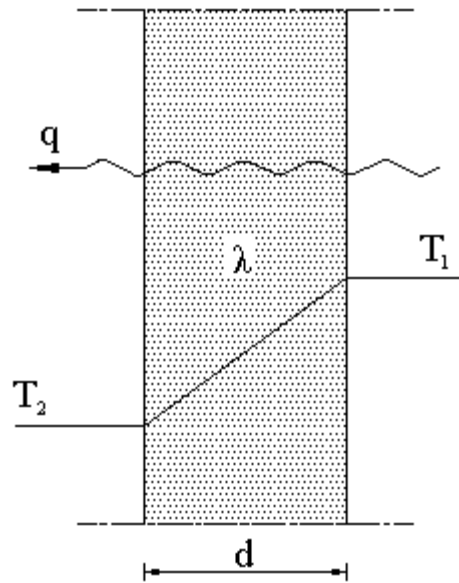
Lämmön johtumisessa energia siirtyy materiaalien molekyylien sisäisten värähtelyjen seurauksena. Molekyylien värähdellessä niiden paikat pysyvät muuttumattomina eli ainoastaan energia siirtyy materiaalia pitkin korkeammasta lämpötilasta matalampaan. (Björkholtz 1997)

Lämmön johtumisen suuruutta kuvataan lämpövirran tiheydellä  $q$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). Yksidimensioisessa tapauksessa tasa-aineisen materiaalin läpi johtuvaa lämpövirtaa, lämpötilaeron ollessa lineaarinen (kuva 2.1), kuvataan Fourierin lailla:

$$q = \lambda \frac{T_1 - T_2}{d} \quad (2.1)$$

missä

$\lambda$	on	materiaalin lämmönjohtavuus ( $\text{W}/(\text{mK})$ )
$T_1 - T_2$	on	kappaleen yli vallitseva lämpötilaero
$d$	on	kappaleen paksuus (m)



**Kuva 2.1** Lämmön johtuminen tasa-aineisen materiaalin läpi yksidimensioisessa tapauksessa lämpötilaeron ollessa lineaarinen.

Lämpövirran tiheydestä  $q$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) saadaan laskettua lämpövirta  $\Phi$  ( $\text{W}$ ) tutkittavan materiaalin läpi kertomalla se tarkasteltavalla pinta-alalla  $A$  ( $\text{m}^2$ ):

$$\Phi = Aq = A\lambda \frac{T_1 - T_2}{d} \quad (2.2)$$

Yksittäisen materiaalikerroksen kykyä vastustaa lämpövirtaa kuvataan lämmönvastuksella  $R$  ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ), joka lasketaan kaavalla 2.3:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (2.3)$$

Ohuiden materiaalien paksuuden määrittäminen on vaikeaa, joten niille on yksinkertaisempaa määrittää suoraan lämmönvastusarvot lämmönjohtavuuden ja paksuuden sijaan (Vinha 2009). Lämmönvastuksen avulla (kaava 2.3) lämpövirran tiheys voidaan ilmoittaa yksinkertaisemmassa muodossa:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R} \quad (2.4)$$

Rakenteiden kykyä vastustaa lämmön kulkua kuvataan rakennusfysikaalisissa laskelmissa lämmönläpäisykertoimella eli  $U$ -arvolla (Björkholtz 1997). Se on rakenteen lämmönvastuksen käänteisluku, jossa otetaan huomioon rakenteen ulko- ja sisäpinnan pintavastukset. Kokonaislämmönvastuksen ja  $U$ -arvon laskennassa käytössä olevat

pintavastukset on esitetty taulukossa 2.1 (EN ISO 6946 2007). Lämmönläpäisykerroin  $U$  ( $W/(m^2K)$ ) lasketaan kaavalla:

$$U = \frac{1}{R_{si} + R_{se} + R_1 + R_2 + \dots + R_n} \quad (2.5)$$

missä

$R_{si}$  on sisäpinnan pintavastus ( $m^2K/W$ )

$R_{se}$  on ulkopinnan pintavastus ( $m^2K/W$ )

$R_{1...n}$  ovat rakenteen kerrosten lämmönvastukset ( $m^2K/W$ )

**Taulukko 2.1** Standardin (EN ISO 6946 2007) mukaiset pintavastukset.

	Lämpövirran suunta		
	Ylöspäin	Vaakasuoraan	Alaspäin
$R_{si}$	0,10	0,13	0,17
$R_{se}$	0,04	0,04	0,04

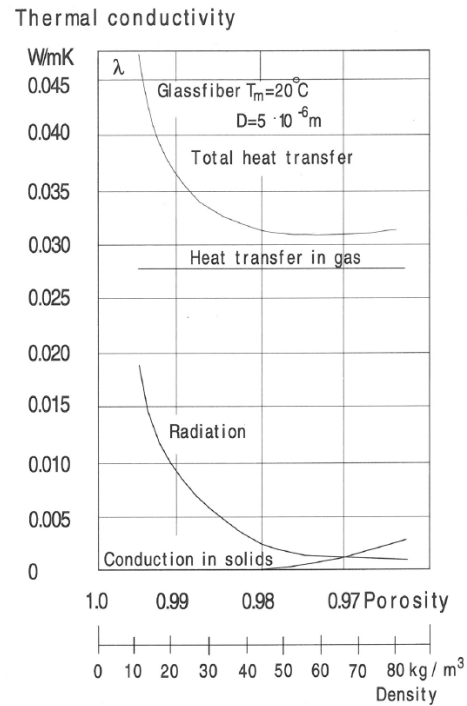
Lämmönjohtavuus kuvaa materiaalin kykyä siirtää lämpöä johtumalla. Rakennusfysiikallisissa laskelmissa lämmönjohtavuusarvot sisältävät yleensä myös muut lämmön siirtymistavat (säteily ja konvektio), joten lämmön siirtymiseen liittyvät laskelmat (esimerkiksi  $U$ -arvon laskenta) tehdään pelkästään lämmönjohtavuusarvojen avulla. Huokoisissa materiaaleissa, kuten mineraalivillassa, säteilyn ja konvektion vaikutus kokonaislämmönjohtavuuteen on merkittävä.

Kuvassa 2.2 on esitetty tavanomaisen lasivillaeristeen lämmönsiirtymisen komponentit materiaalin tiheyden funktiona. Mittaukset on suoritettu siten, että konvektiivista lämmön siirtymistä eristeen huokosissa ei esiinny. Kuvasta nähdään, että lämmön siirtymisen huokoisen materiaalin läpi on seuraavien komponenttien yhteisvaikutus: johtuminen kiinteää materiaalia pitkin, johtuminen ja konvektio huokosilmassa sekä säteily materiaalin huokospintojen välillä. Näistä mineraalivillan lämmönjohtavuuteen vaikuttaa eniten lämmön johtuminen huokosilmassa. Ilmaa läpäisevissä eristeissä lämmön siirtymisen materiaalin läpi kasvaa, mikäli siinä esiintyy konvektiota. (Bankvall 1972)

Huokoisten materiaalien lämmönjohtavuuteen vaikuttaa vallitseva lämpötila ja suhteellinen kosteus, jotka voivat erota materiaalien käyttötilanteessa huomattavasti laboratorio-olosuhteista. Lisäksi materiaalin lämmönjohtavuuden muuttuminen voi olla seurausta ikääntymisestä, mekaanisista kuormista tai kastumisesta. (Vinha 2007)



Tutkimusten mukaan (Vinha et al. 2005) materiaalien lämmönjohtavuuden on havaittu kasvavan niiden lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kasvaessa.



**Kuva 2.2** Lämmön siirtymisen komponenttien osuudet tavanomaisessa lasivillaeristeessä (Bankvall 1972).

Taulukossa 2.2 on esitetty erilaisten rakentamisessa käytettävien materiaalien lämmönjohtavuuksia. On huomattava, että lämmöneristeille tehdyn tuotekehityksen seurauksena niiden lämmönjohtavuusarvot ovat tulleet alaspäin taulukon 2.2 arvoista.

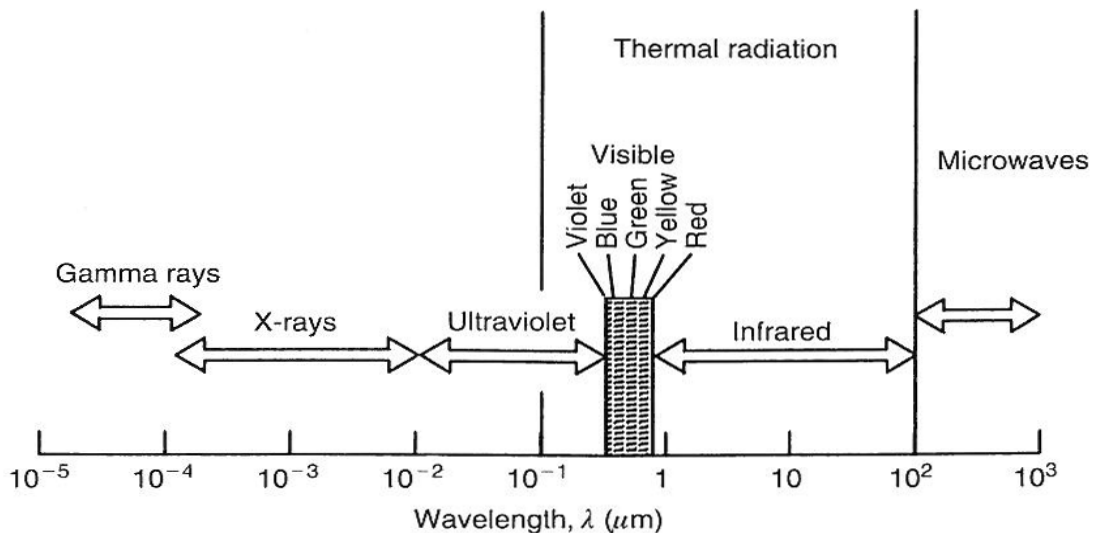
**Taulukko 2.2** Materiaalien lämmönjohtavuuksien suunnitteluarvoja (EN ISO 10456 2007).

<b>Materiaali</b>	<b>Lämmönjohtavuus <math>\lambda_{\text{design}}</math> (W/(mK))</b>
Lämmöneristeet	
– Polyuretaani	0,024...0,045
– EPS	0,037...0,050
– Mineraalivilla	0,037...0,055
Vaneri	0,09...0,24
Puu	0,12...0,18
Vesi	0,60...0,67
Tiili	1
Betoni	1,15...2,5
Hiekka, sora	2
Teräs	50
Alumiini	160

### 2.1.2 Säteily

Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella, emittoivat eli lähettävät lämpösäteilyä (Long 1999). Säteily on lämpöenergian siirtymistä sähkömagneettisina aaltoina kahden eri lämpötilaisen pinnan välillä. Säteilyä syntyy, kun aineen pinnan atomeissa tai molekyyleissä elektronien paikat vaihtuvat. Lämmön siirtyminen säteilyllä ei vaadi väliainetta. Itse asiassa väliaine hidastaa säteilyä, jonka vaikutus on tehokkainta tyhjiössä. (Incropera & DeWitt 2002)

Säteily voidaan jakaa lyhytaaltoiseen auringonsäteilyyn ja pitkäaaltoiseen lämpösäteilyyn. Lyhytaaltainen säteily käsittää suoran auringonsäteilyn lisäksi ilmakehästä ja pilvistä heijastuneen diffuusin säteilyn. Suora ja diffuusi auringonsäteily muuttuvat pitkäaaltoiseksi lämpösäteilyksi, kun ne heijastuvat esim. maasta tai rakennuksista. Kappaleiden ja pintojen emittoima säteily on myös pitkäaaltoista lämpösäteilyä huone-lämpötila-alueella. (Vinha 2009) Kuvassa 2.3 on esitetty sähkömagneettisen säteilyn spektri, josta havaitaan, että lämpösäteily käsittää aallonpituusjakauman välillä  $10^{-1}$ – $10^2$   $\mu\text{m}$ . Se sisältää lämpötilassa  $-100$ – $10\ 000$  °C olevien kappaleiden lähettämän säteilyn. Näkyvän valon aallonpituusjakauma sisältyy lämpösäteilyyn, ollen välillä  $0,40$ – $0,70$   $\mu\text{m}$ . (Hagetoft 2001)



**Kuva 2.3** Sähkömagneettisen säteilyn spektri. (Long 1999).

Kappaleen emittoiman säteilyn suuruutta kuvataan säteilyteholla  $E$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). Sen ylärajana pidetään mustan kappaleen lähettämää säteilytehoa  $E_b$ , jota kuvataan Stefan-Boltzmannin lailla:

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (2.6)$$

missä

$\sigma$  on Stefan-Boltzmannin vakio ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ )  
 $T_s$  on säteilevän pinnan lämpötila (K)

Musta kappale imee itseensä eli absorboi kaiken kohtaamansa säteilyn aallonpituudesta ja säteilyn suunnasta riippumatta. Tämän lisäksi se on ideaalinen diffuusin säteilyn emittoija, eli lähettää säteilyä joka suuntaan. Millään pinnalla ei ole täsmälleen mustan kappaleen ominaisuuksia, joten todellisten kappaleiden emittoima säteilyteho on pienempi kuin mustan kappaleen emittoima, mikäli kappaleiden pintalämpötilat ovat yhtä suuret. Todellisen kappaleen ja mustan kappaleen emittoiman säteilytehon suhdetta ( $E/E_b$ ) kutsutaan emissiviteetiksi  $\varepsilon$  (-). (Incropera & DeWitt 2002)

Emissiviteetin avulla voidaan ilmaista todellisen kappaleen lähettämä säteilyteho kaavalla:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (2.7)$$

Emissiviteetin suuruuteen vaikuttaa kappaleen pinnan materiaali ja viimeistely. Kappaleiden emissiviteettien suuruudet vaihtelevat välillä 0–1. Lisäksi pinnan emissiviteetin suuruuteen vaikuttaa säteilyn aallonpituus ja lähtökulma pintaan nähden sekä pinnan lämpötila. Rakennusfysikaalisissa sovelluksissa pintoja voidaan pitää ns. harmaina pintoina, jolloin säteilyn oletetaan emittoituvan diffuusina säteilynä ja olevan riippumaton säteilyn aallonpituudesta. (Vinha 2009)

Tyypillisten rakennusmateriaalien emissiviteetit ovat välillä 0,8–0,95 huonelämpötila-alueella (Björkholtz 1997). Taulukossa 2.3 on esitetty materiaalien pintojen emissiviteettejä huoneenlämmössä.

**Taulukko 2.3** Materiaalien emissiviteettejä huoneenlämmössä (Björkholtz 1997; Hagentoft 2001).

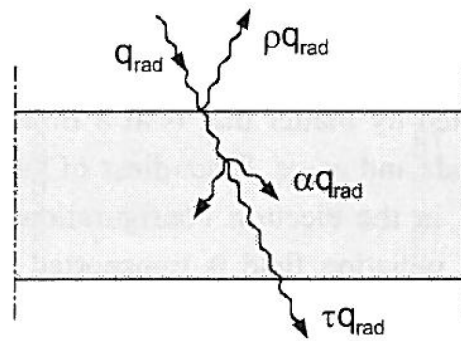
Pinta	Emissiviteetti $\varepsilon$ (-)
Alumiini	
– kalvo	0,05...0,09
– oksidoitunut	0,20...0,33
Betoni, karkea	0,88...0,94
Hurre	0,985
Kattohuopa	0,92...0,94
Kipsi	0,8...0,9
Laasti	0,93
Lasi	0,92...0,94
Maalit/lakat	
– alumiiniväri	0,27...0,62
– emalilakka	0,85...0,95
– musta maali	0,8...0,97
– valkoinen maali	0,9...0,97
Poltettu tiili	0,91...0,93
Kalkkihiekkatiili	0,9
Puu	0,8...0,9
Vesi	0,95

Säteilyn kohdatessa materiaalin pinnan osa siitä heijastuu takaisin ja loppuosa absorboituu materiaaliin tai tunkeutuu sen läpi (kuva 2.4). Nämä säteilykomponentit noudattavat seuraavaa yhtälöä (Long 1999):

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2.8)$$

missä

- $\rho$  on heijastuskerroin (-)  
 $\alpha$  on absorptiokerroin (-)  
 $\tau$  on läpäisykerroin (-)



**Kuva 2.4** Säteilyn jakautuminen sen osuessa materiaalin pintaan (Hagentoft 2001).

Suurin osa rakennusmateriaaleista on läpinäkymättömiä, joten ne läpäisevät vain hyvin vähän säteilyä, mutta heijastuksen ja absorptioon osuudet ovat merkittävät. Tällöin voidaan olettaa, että läpäisykerroin  $\tau$  on nolla ja säteilykomponentit jakautuvat seuraavasti (Long 1999; Mills 1999):

$$\rho + \alpha = 1 \quad (2.9)$$

Taulukkoon 2.4 on koottu eräiden materiaalien absorptiokerroimia, joista voidaan määrittää heijastuksen osuus kaavalla 2.9.

**Taulukko 2.4** Materiaalien pintojen absorptiokerroimia (Hagentoft 2001).

Pinta	Absorptiokerroin $\alpha$ (-)
Bitumi/kattohuopa	0,93
Tummat värit	0,8...0,9
Punainen tiili	0,75
Betoni	0,6...0,7
Keltainen tiili	0,55
Vaaleat värit, kiilloitettu alumiini	0,3...0,5
Valkoinen maali	0,25

Tarkasteltaessa pitkäaaltoista lämpösäteilyä kahden harmaan kappaleen välillä, voidaan absorptiokerroimen  $\alpha$  ja emissiviteetin  $\varepsilon$  välille olettaa Kirchoffin lakina tunnettu yhteys (kaava 2.10). Sitä voidaan käyttää rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa, kun analysoidaan kahden materiaalipinnan välistä säteilyä. (Vinha 2007)

$$\alpha = \varepsilon \quad (2.10)$$

Kirchoffin lakia ei voida soveltaa auringon lämpösäteilyyn, koska sen aallonpituus on lyhyempää. Tumma pinta absorboi huomattavasti enemmän auringon säteilyä kuin vaa-

lea pinta, vaikka näiden pintojen emissiviteetit ovat samaa luokkaa (ks. taulukko 2.3: mustan ja valkoisen maalin emissiviteetit). (Vinha 2007)

Etenkin huokoisissa materiaaleissa (lämmöneristeet) ja ilmapälejä sisältävissä rakennesissa (ikkunat ja karmit) lämpösäteilyllä on merkittävä vaikutus materiaalin/rakennesosan läpäisevän lämpövirran suuruuteen. Näin ollen lämmöneristeissä on alettu käyttämään alumiinikalvoja, joiden emissiviteetti on huomattavasti pienempi itse eristemateriaalin emissiviteettiin verrattuna. Ikkunoissa, joissa säteilyllä on lämmöneristeitäkin merkittävämpi osuus lämpöenergian siirtymiseen, pinnan emissiviteettiä on pienennetty käyttämällä matalaemissiviteettipinnoitteita. Niiden emissiviteetit ovat luokkaa 0,05–0,20.

Kirchoffin lain ollessa voimassa voidaan kaavat 2.9 ja 2.10 yhdistää:

$$\rho + \varepsilon = 1 \quad (2.11)$$

Kaavasta 2.11 havaitaan, että materiaalin pinnan emissiviteetin pieneneminen kasvattaa heijastuskerrointa, eli materiaalin pinta heijastaa suuremman osan lämpösäteilystä takaisin ympäristöönsä. Tässä emissiviteetin suuruus kuvaa säteilyn absorboitumisen suuruutta materiaalin pinnasta päinvastaiseen suuntaan kuin säteily heijastuu. Tähän perustuu matalaemissiviteettipintojen toiminta.

Olettaen, että Kirchoffin laki (kaava 2.10) on voimassa, eli pinnan absorptiokerroin ja emissiviteetti ovat yhtä suuret, voidaan pinnan lähettämän nettosäteilyn lämpövirran tiheys  $q_{rad}$  ( $W/m^2$ ) laskea kaavalla:

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (2.12)$$

missä

$T_{sur}$  on ympäröivien pintojen lämpötila (K)

Pinnan lähettämän nettosäteilyn lämpövirran tiheys voidaan ilmaista myös säteilyn lämmönsiirtokertoimen  $\alpha_{rad}$  ( $W/(m^2K)$ ) avulla:

$$q_{rad} = \alpha_{rad} (T_s - T_{sur}) \quad (2.13)$$

Asettamalla kaavojen 2.12 ja 2.13 lämpövirran tiheydet yhtä suuriksi saadaan säteilyn lämmönsiirtokertoimelle likiarvokaava:

$$\alpha_{rad} = \varepsilon\sigma(T_s + T_{sur})(T_s^2 + T_{sur}^2) \approx 4\varepsilon\sigma\left(\frac{T_s + T_{sur}}{2}\right)^3 \quad (2.14)$$

Yhtälön 2.14 likiarvokaava on voimassa, kun pintojen välinen lämpötilaero on kohtalaisen pieni, joten sitä voidaan käyttää rakennusfysiikan laskelmissa, joissa tilanne on yleensä tällainen.

Kahden vakiolämpötilassa olevan yhdensuuntaisen pinnan välisen nettosäteilylämpövirran tiheys voidaan laskea pinnasta 1 pintaan 2 lähtevän säteilyn ja pinnasta 2 pintaan 1 lähtevän säteilyn erotuksena:

$$q_{rad} = E_1 - E_2 = \varepsilon_1\sigma T_1^4 - \varepsilon_2\sigma T_2^4 = \varepsilon_{12}\sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (2.15)$$

missä

$T_1, T_2$  ovat pintojen 1 ja 2 lämpötilat (K)

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$  ovat pintojen 1 ja 2 emissiviteetit (-)

$\varepsilon_{12}$  on pintojen 1 ja 2 yhdistetty emissiviteetti (-)

Pintojen 1 ja 2 yhdistetty emissiviteetti lasketaan kaavalla:

$$\frac{1}{\varepsilon_{12}} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \quad (2.16)$$



### 2.1.3 Konvektio

Konvektiossa lämpö siirtyy fluidin (kaasun tai nesteen) virtauksen mukana. Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa virtaavana aineena on yleensä ilma, mutta tiettyntyyppisissä lämmöneristeissä ja ikkunoissa väliaineena on kaasu. Aineen virtaus ja samalla konvektio voi olla pakotettua tai luonnollista, lisäksi se voi olla seurausta väliaineen faasimuutoksesta. Pakotetussa konvektiossa aineen virtaus aiheutuu ulkoisen voiman vaikutuksesta, jona voidaan pitää tuulta (ulkona) sekä tuuletinta/puhallinta (sisällä). Luonnollinen konvektio on seurausta lämpötilaerojen aiheuttamista tiheyseroista. Faasimuutokseen liittyvä konvektio eli piilevän lämmön siirtyminen tapahtuu yleensä nesteen ja kaasun välisessä faasimuutoksessa, kuten kosteuden kondensoitumisessa ja veden höyrystymisessä. (Hagentoft 2001; Vinha 2007)

Pelkästään lämpötilaerosta johtuvaa luonnollista konvektiota esiintyy käytännön rakenteissa melko harvoin, sillä yleensä konvektiovirtauksiin vaikuttaa myös ulkoinen voima rakenteissa olevien reikien ja rakojen kautta. Rakenteiden sisäinen konvektio on yksi luonnollisen konvektion muoto, jota esiintyy paksuissa yhtenäisen huokosverkoston omaavissa lämmöneristeissä, kuten mineraalivillassa. Sisäisessä konvektiossa lämmöneristeen sisäpinnassa oleva ilma lämpenee ja alkaa virrata ylöspäin sen tiheyden pienentyessä. Eristeen ulkopinnan läheisyydessä oleva ilma puolestaan jäähtyy ja virtaa raskaampana alaspäin. Näin ollen syntyy ilman kierto eristekerroksessa, jota kutsutaan sisäiseksi konvektioksi.

Uusien lämmöneristeiden sisältämät matalaemissiviteettiset alumiinikalvot vähentävät säteilyn lämmönsiirron lisäksi myös sisäisen konvektion vaikutusta rakenteissa.

Konvektiivinen lämpövirran tiheys  $q_{conv}$  ( $W/m^2$ ) materiaalin pinnasta ilmaan voidaan esittää Newtonin lailla kappaleiden jäähtymisestä:

$$q_{conv} = \alpha_{conv} (T_s - T_a) \quad (2.17)$$

missä

$\alpha_{conv}$	on	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin ( $W/(m^2K)$ )
$T_s$	on	pinnan lämpötila (K)
$T_a$	on	ympäröivän ilman lämpötila (K)

## 2.2 Faasimuutos

### 2.2.1 Aineiden olomuodot

Materiaalien olemukseen kuuluu, että ne voivat esiintyä kolmessa eri olomuodossa: kiinteänä, nestemäisenä eli sulana ja kaasumaisena. Aineiden olomuodot ja niiden muutokset riippuvat itse tarkasteltavasta aineesta, lämpötilasta, tilavuudesta ja paineesta (Tikkanen 1990).

Riittävän alhaisessa lämpötilassa ja matalassa paineessa ovat kaikki aineet heliumia lukuun ottamatta kiinteässä muodossa. Kiinteässä tilassa aineen molekyylit ja atomit ovat lähellä toisiaan kemiallisin sidoksien sitoutuneena. Kiinteän aineen atomit ovat järjestäytyneet kullekin aineelle ominaiseksi kiderakenteeksi eli kidehilaksi. Kiinteässä olomuodossa aine pitää muotonsa, jos sitä ei rasiteta millään ulkoisella voimalla. (Tikkanen 1990)

Nestemäisellä aineella ei ole tarkasti määrättyä hilarakennetta, kuten kiinteällä aineella. Siitä huolimatta nestemäisen aineen molekyylit ovat vahvasti toisiinsa sidoksissa, päästen kuitenkin liikkumaan kiinteän aineen molekyylejä vapaammin. Sulaan aineeseen voi liueta helpommin vieraita atomeja tai ioneja, koska sen rakenne on paljon kiinteän aineen rakennetta avonaisempi. (Tikkanen 1990)

Kaasumaisen aineen hiukkaset (molekyylit ja atomit) eivät ole enää sidottuja minkäänlaisiin hilarakenteisiin, vaan ne esiintyvät vapaasti liikkuvina yksilöinä. Kaasun hiukkaset voivat olla hyvinkin kaukana toisistaan, joten ne leviävät tasaisesti vapaaseen tilaan. Hiukkasten liikkussa vapaasti ja törmäillessä rajapintoihin kaasun paine kasvaa. Kaasun tilavuutta pienentämällä voidaan kasvattaa sen painetta ja saadaan kaasu tiivistymään takaisin nesteeksi. (Tikkanen 1990)

### 2.2.2 Ominaislämpökapasiteetti

Aineen lämpötila nousee, kun siihen tuodaan lämpöä, ellei samalla tapahdu lämpöä sitovia olomuodonmuutoksia. Aineita verrattaessa havaitaan, että saman lämpömäärään lisääminen eri aineisiin aiheuttaa erilaisia lämpötilanmuutoksia. Lämpömäärä  $Q$  (J), joka vaaditaan materiaalikappaleen lämpötilan nostamiseen, lasketaan kaavalla (Krannila 1989):

$$Q = mc\Delta T \quad (2.18)$$

missä

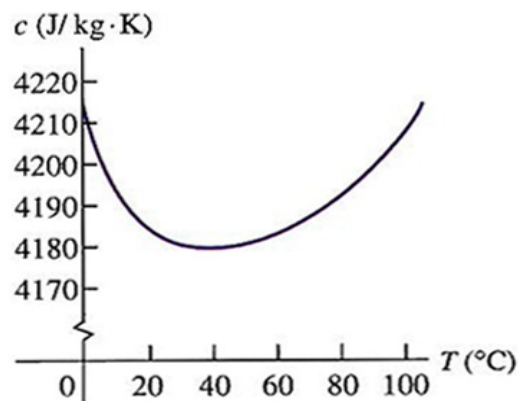
$m$	on	materiaalikappaleen massa (kg)
$c$	on	materiaalin ominaislämpökapasiteetti (J/(kgK))
$\Delta T$	on	materiaalin lämpötilanmuutos (K)

Kaavalla 2.18 laskettu lämpömäärä on positiivinen, jos tarkastellaan kappaleen lämpötilan nostamista, eli kappaleeseen tuodaan lämpöä. Kappaleen lämpötilan laskiessa siitä viedään lämpöä, eli kaavalla 2.18 laskettu lämpömäärä on negatiivinen.

Tarkasteltaessa hyvin pientä lämpötilan ja lämpömäärän muutosta, voidaan ominaislämpökapasiteetti  $c$  (J/(kgK)) (lyhyemmin ominaislämpö) määrittää yhtälöllä:

$$c = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT} \quad (2.19)$$

Ominaislämpökapasiteetti on aineen ominaisuus, joka riippuu aineen lämpötilan ja lämpötilamuutoksen lisäksi vallitsevasta paineesta. Kuvassa 2.5 on esitetty veden ominaislämpökapasiteetin muutos lämpötilan funktiona. Siitä havaitaan, että ominaislämpökapasiteetti  $c$  muuttuu alle prosentin lämpötilavälillä 0–100 °C. Paineriippuvuus on lämpötilariippuvuuttakin pienempi, joten sitä ei tarvitse ottaa huomioon. (Young & Freedman 2000)



**Kuva 2.5** Veden ominaislämpökapasiteetti lämpötilan funktiona (Young & Freedman 2000).

Kiinteät ja nestemäiset aineet laajenevat lämmitessään hyvin vähän, sillä ne ovat miltei kokoonpuristumattomia. Tästä johtuen niihin tuotu lämpömäärä ilmenee lähes ainoastaan lämpötilan nousuna. Kiinteille aineille ja nesteille riittää vakiona pysyvän ominaislämpökapasiteetin käyttö laskentatarkasteluissa. Kirjallisuudessa ominaislämpökapasiteetti ilmoitetaan yleensä vakiopaineessa (normaali ilmakehän paine), jolloin sille käytetään merkintää  $c_p$ . (Krannila 1989)

Taulukkoon 2.5 on koottu tavanomaisten rakennusmateriaalien ominaislämpökapasiteetteja vakiopaineessa.

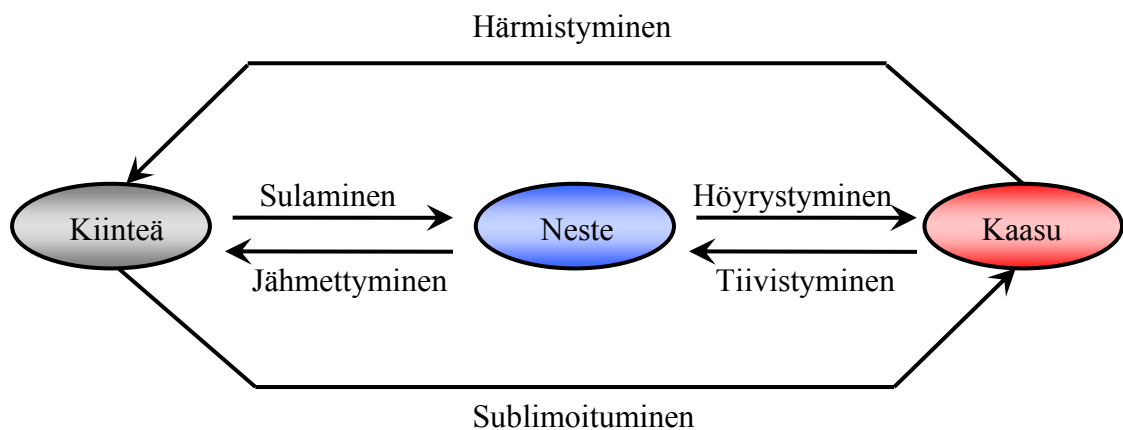
**Taulukko 2.5** Materiaalien ominaislämpökapasiteetteja vakiopaineessa (EN ISO 10456 2007).

Materiaali	Ominaislämpökapasiteetti $c_p$ (J/kgK)
Betoni	1000
Graniitti	1000
Kipsilevy	1000
Lämmöneristeet	
– EPS	1450
– Mineraalivilla	1030
– Polyuretaanivaaho	1400
– XPS (vaaho)	1450
Puu ja puupohjaiset levyt	1500...1700
Savitiili	800
Teräs	450
Vesi	4190

### 2.2.3 Faasimuutos

Edellä esitettyjä aineen olomuotoja kutsutaan faaseiksi ja olomuodon muutoksia faasimuutoksiksi. Tyypillisiä esimerkkejä faasimuutoksista (kuva 2.6) on veden jäätyminen ja jään sulaminen sekä veden höyrystyminen ja vesihöyryn tiivistyminen. Sublimoituminen on aineen faasimuutos suoraan kiinteästä kaasuksi, ilman nestemäistä välitilaa. Sublimoitumisen vastakohta on härmistyminen, eli kaasun suora faasimuutos kiinteäksi aineeksi. Faasimuutokset ovat seurausta aineen lämpötilanmuutoksista. Tietyissä paineissa faasimuutokset tapahtuvat määrättyssä lämpötilassa ja faasimuutoksiin liittyy yleensä lämmön absorptiota tai luovutusta sekä tilavuuden ja tiheyden muutoksia. (Tikkanen 1990; Young & Freedman 2000)

Kiinteän aineen lämmitessä sulamispisteeseen sen molekyylien lämpöliike (liike-energia) kasvaa niin suureksi, että kiderakenne rikkoutuu ja materiaali sulaa. Sulamispiste on aineelle ominainen lämpötila, joka riippuu vallitsevasta paineesta. Yleensä aineiden sulamispisteet ilmoitetaan normaalissa ilmanpaineessa. Aineita, joilla ei ole selkeää sulamispistettä, kutsutaan amorfisiksi aineiksi. Kiteisellä aineella on puolestaan selkeä ja terävä sulamispiste. (Tikkanen 1990)



**Kuva 2.6** Materiaalien faasimuutokset.

Sulamisen aikana aineen lämpötila ei muutu, koska systeemiin tuotu lämpöenergia kuluu aineen kiderakenteen rikkomiseen. Näin ollen sulaminen vaatii lämpöenergiaa eli se on endoterminen prosessi. Vastaavasti jähmettyessään aineen molekyylit järjestyvät kiderakenteeseen, jolloin lämpöenergiaa vapautuu. Tätä kutsutaan puolestaan eksotermiseksi prosessiksi. Faasimuutoksessa siirtyvä lämpömäärä voidaan laskea seuraavasti (Young & Freedman 2000):

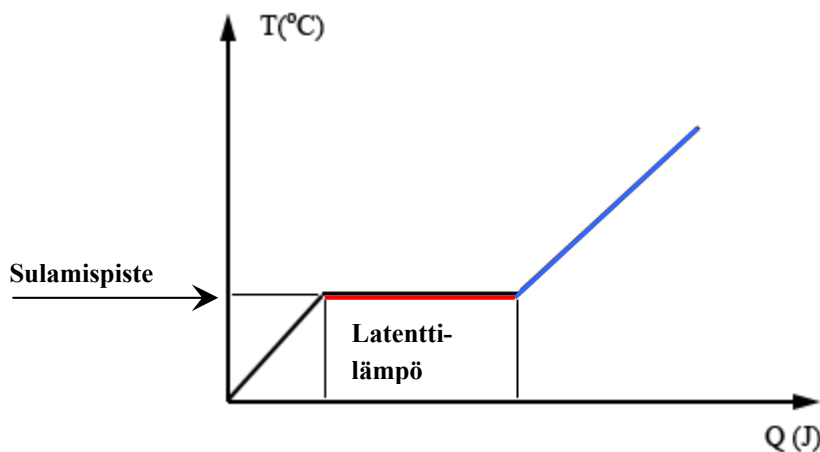
$$Q = mL \quad (2.20)$$

missä

$L$  on sulamislämpö (J/kg)

Tätä aineen sulaessa varastoituvaa lämpöä kutsutaan latentiksi eli piileväksi lämmöksi. Kuvassa 2.7 on esitetty periaatteellisesti lämpötilan ja lämpömäärän välinen yhteys kiinteän ja nestemäisen aineen välisessä faasimuutoksessa. Siitä havaitaan faasimuutoksessa siirtyvä piilevä lämpö ja lämpötilan pysyminen tällöin sulamispisteessä.

Kaasun ja nesteen väliset faasimuutokset omaavat suuremman piilevän lämmön kuin kiinteän ja nesteen väliset muutokset. Kaasun ja nesteen välisiin faasimuutoksiin liittyy kuitenkin suuria tilavuudenmuutoksia (Sharma & Sagara 2005). Sen vuoksi tässä työssä keskitytään ainoastaan kiinteän aineen ja nesteen välisiin faasimuutoksiin, joiden oletetaan soveltuvan paremmin rakennuksiin liittyvään lämmönvarastointiin.



**Kuva 2.7** Lämpötilan ja lämpömäärän välinen yhteys kiinteä-neste faasimuutoksessa. Musta viiva kuvaa kiinteää olomuotoa, punainen materiaalin faasimuutosta ja sininen nestemäistä olomuotoa.

### 2.2.4 Entalpia

Yleinen termodynamiikan tehtävä on prosessiin liittyvän työn tai lämmön laskeminen. Työ ja lämpö eivät ole tilafunktioita, joten niiden arvoa ei saada systeemin alku- ja lopputilojen perusteella määritettyä. Tätä varten on johdettu tilafunktio, entalpia, jonka muutoksena saadaan suoraan tietyn prosessin lämpö tai työ. Systeemin entalpia  $H$  (J) määritellään seuraavasti (Hemilä & Utriainen 1989):

$$H = U + pV \quad (2.21)$$

missä

$U$	on	systeemin sisäenergia (J)
$p$	on	systeemin paine ( $\text{N/m}^2$ )
$V$	on	tilavuus ( $\text{m}^3$ )

Entalpiian absoluuttisia arvoja ei tunneta, mutta termodynamiikassa lasketaan entalpiian muutoksia ( $\Delta H$ ) prosesseissa. Isobaarisissa (vakioaineisissa) prosesseissa entalpiian muutos on yhtä suuri kuin siirtyvä lämpöenergia olettaen, että ainoa työn muoto on tilavuudenmuutostyö (Hemilä & Utriainen 1989):

$$\Delta H = Q \quad (2.22)$$

Vakioaineisia prosesseja ovat esimerkiksi ilmakehässä tapahtuvat muutokset, jos ilmanpaineen vaihtelut prosessin aikana ovat merkityksettömän pieniä.

Entalpiian muutoksen etumerkki kertoo prosessin luonteen, eli vapautuuko vai sitoutuu-ko siinä lämpöä.

$\Delta H > 0$ , prosessi on endoterminen eli lämpöä sitova.

$\Delta H < 0$ , prosessi on eksoterminen eli lämpöä luovuttava.

### 2.2.5 Lämmön varastointi

Lämmön varastointiin liittyvässä kirjallisuudessa kiinteä-neste faasimuutoksessa absorboituvasta/vapautuvasta lämmöstä käytetään useita eri nimityksiä: sulamislämpö, ominaissulamislämpö, sulamisentalpia ja latentti lämpö. Tässä yhteydessä nämä kaikki tarkoittavat samaa ja yksikkönä on yleensä kJ/kg.

Lämpöä voidaan varastoida kolmella eri menetelmällä: lämmön varastointi ominaislämpökapasiteettiin perustuen lämpötilan noustessa, latentin lämmön varastointi faasimuu-

toksissa tai lämmön varastointi kemiallisen reaktion avulla. Lämmön varastointi voi olla myös näiden menetelmien yhdistelmä. (Sharma & Sagara 2005)

Tuntuvan lämmön varastointi perustuu nesteen tai kiinteän aineen lämpötilan nostamiseen. Tavanomaisten rakennusmateriaalien (esimerkiksi puu ja betoni) lämmönvarastointikyky perustuu tuntuvan lämmön varastointiin. Varastoidun lämmön määrä riippuu varastointimateriaalin ominaislämpökapasiteetista, lämpötilanmuutoksesta ja varastointimateriaalin massasta. Lämpömäärä voidaan laskea yhtälöllä (Sharma & Sagara 2005):

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mc_p dT = mc_p (T_f - T_i) \quad (2.23)$$

missä

$T_i$	on	materiaalin alkulämpötila (K)
$T_f$	on	materiaalin loppulämpötila (K)
$m$	on	materiaalin massa (kg)
$c_p$	on	materiaalin ominaislämpökapasiteetti (J/(kgK))

Piilevän lämmön varastointi perustuu lämmön absorboitumiseen tai vapautumiseen varastointimateriaalin muuttaessa faasia. Faasimuutosmateriaalin lämmönvarastointikapasiteetti voidaan laskea seuraavasti (Sharma & Sagara 2005):

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mc_p dT + a_m m \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} mc_p dT = m [c_{sp} (T_m - T_i) + a_m \Delta h_m + c_{lp} (T_f - T_m)] \quad (2.22)$$

missä

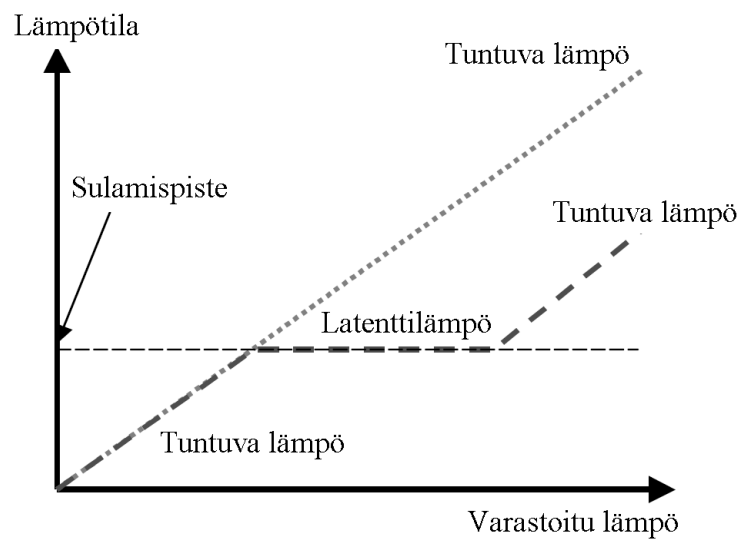
$T_m$	on	materiaalin sulamispiste (K)
$a_m$	on	materiaalin sulamisen aste (murtoluku) (-)
$\Delta h_m$	on	materiaalin sulamisentälpia (J/kg)
$c_{sp}$	on	materiaalin ominaislämpökapasiteetti kiinteässä olomuodossa (J/(kgK))
$c_{lp}$	on	materiaalin ominaislämpökapasiteetti nestemäisessä olomuodossa (J/(kgK))

On huomattava, että latentin lämmön varastointiin perustuvat materiaalit varastoivat faasimuutoslämmön lisäksi myös lämpöä ominaislämpökapasiteettiin ja lämpötilan nousuun perustuen sekä kiinteässä että sulaneessa muodossa. Faasimuutoksissa varastoituva lämpömäärä on kuitenkin huomattavasti suurempi.

Kuvassa 2.8 on esitetty periaatteellisesti lämpötilan ja varastoidun lämmön välinen yhteys kiinteän ja nestemäisen aineen välisissä faasimuutoksissa. Pisteviiva kuvaa tavan-



omaisen rakennusmateriaalin lämmön varastointia lämpötilan kasvaessa. Se varastoi ainoastaan tuntuva lämpöä rakennuksen käyttölämpötila-alueella, joten kuvaaja on lineaarinen olettaen, että ominaislämpökapasiteetti pysyy vakiona. Katkoviiva kuvaa faasimuutosmateriaalin lämmön varastointia lämpötilan muuttuessa. Sulamispisteen alapuolella materiaali varastoi tuntuva lämpöä kiinteässä olomuodossa. Sulamispisteessä se varastoi latenttia lämpöä lämpötilan pysyessä muuttumattomana. Faasimuutosmateriaalin sulamispisteen sisältyessä rakennuksen käyttölämpötila-alueelle ja lämpötilanmuutosten ollessa pieniä varastoi se huomattavasti enemmän lämpöä kuin tavanomaisen materiaali. Faasimuutosmateriaalin sulamisen jälkeen se varastoi edelleen tuntuva lämpöä nestemäisessä muodossa.



**Kuva 2.8**

Sulamisessa varastoituvan latentin lämmön ja tavanomaisen lämmön varastoinnin periaate eri materiaaleissa.

## 3 UUDENTYYPPISET LÄMMÖNERISTEET

### 3.1 Johdanto

Vuoden 2010 alussa Suomessa ovat astuneet voimaan uudet tiukemmat lämmöneristysmääräykset (RakMK C3 2010). Näin ollen rakennuksen vaipalta vaaditaan entistä parempia lämmöneristysominaisuuksia. Siitä johtuen eristekerrokset ja samalla rakenteiden paksuudet kasvavat käytettäessä tavanomaisia lämmöneristeitä. Suomessa lämmöneristysmääräysten kiristyminen on kasvattanut kilpailua lämmöneristeiden valmistajien keskuudessa ja yritykset ovat panostaneet tuotteidensa eristävyysominaisuuksien kehittämiseen.

Myös kansainvälisesti tunnetaan tällä hetkellä painetta pienentää rakennusten lämpöhäviötä ja samalla lämmitysenergian tarvetta. Näin ollen maailmanmarkkinoilla on mielenkiintoisia lämmöneristysmateriaaleja, joita tässä työssä on tarkoituksena esitellä. Matalan lämmönjohtavuuden omaavien eristemateriaalien käyttö pienentää rakennuksen vaipan paksuuksia, joten rakennuksen lattiapinta-alaa saadaan kasvatettua. Näiden eristeiden käytöllä voidaan saada mahdollisesti muitakin taloudellisia ja ympäristöllisiä hyötyjä, kuten materiaalien rahtimäärien pieneminen.

### 3.2 VIP-eristeet

VIP-eristeet (vacuum insulation panels) ovat elementtimäisiä lämmöneristeitä, joiden eristysominaisuudet perustuvat pääasiassa niiden sisään valmistusvaiheessa tehtyyn tyhjiöön. Tyhjiöllä tarkoitetaan tässä yhteydessä tilaa, jossa kaasun paine on luokkaa 1–100 mbar, eli merkittävästi pienempi kuin normaali ilmanpaine (1013 mbar). Ne koostuvat avoimesta huokoisesta runkomateriaalista ja kaasutiiviistä kuoresta. Huokoinen runkomateriaali mahdollistaa tyhjiön muodostumisen eristeeseen, ja kuorimateriaali ylläpitää tyhjiötä eristelevyn sisällä. Yleisimmät VIP-eristeiden runkomateriaalit ovat: höyrystetty silika (fumed silica) ja seostettu silika (precipitated silica), avohuokoinen polyuretaani ja tietyntyyppiset lasivillat. Tässä työssä käsitellään lähinnä höyrystetystä silikasta (tästä eteenpäin silika) valmistettuja VIP-eristeitä, jotka ovat yleisimpiä tuotteita markkinoilla, sillä niiden runkoaineella on hyvät eristysominaisuudet. Kuorimateriaalina käytetään monikerroksisia alumiinikalvoista ja muovikalvoista koostuvia rakenteita. (IEA Annex 39 2005a)

VIP-eristeitä on käytetty jo vuosia jääkaapeissa ja kylmäkuljetuksiin tarkoitetuissa astioissa. Japani hallitsee VIP-eristeiden maailmanmarkkinoita tuottaen noin 50 % vuosit-

taisesta materiaalmäärästä. Hiljattain VIP-eristeitä on alettu kehittämään myös rakennussovelluksiin. Saksa ja Sveitsi ovat ainoat maat, jossa VIP-eristeiden käyttö rakennuseristeiden markkinoilla on yleistynyt. (IEA Annex 39 2005a; Tenpierik & Cauberg 2006)

### 3.2.1 Toimintaperiaate ja rakenne

Kuten kappaleen 2.1 kuvassa 2.2 esitettiin, tavanomaisen lämmöneristeen lämmönjohtavuuteen vaikuttaa eniten lämmön johtuminen eristeen huokosilmassa. Siten lämmöneristeiden eristävyysominaisuuksia voidaan parantaa huomattavasti rajoittamalla johtumista huokosilmassa tai eliminoimalla se kokonaan. Lämmön johtumiseen huokoisessa aineessa vaikuttaa sekä väliaineena toimivan kaasun molekyylien määrä että materiaalin sisältämien huokosseinämien lukumäärä. Korkeassa paineessa, kun kaasumolekyylien välinen vapaa matka on paljon pienempi kuin huokosten koko, aiheutuu lämmön siirtyminen pääosin kaasumolekyylien yhteentörmäyksistä. Kaasun paine kasvaa myös kaasumolekyylien lukumäärän lisääntyessä, jolloin niiden välinen vapaa matka pienenee ja niiden väliset törmäykset lisääntyvät. Tästä johtuu eristysmateriaalin lämmönjohtavuuden kasvaminen paineen kasvaessa. Ilmiötä voidaan kuvata yksiköttömällä Knudsenin luvulla  $Kn$  (Schwab et al. 2005a):

$$Kn = \frac{l_{\text{gas}}}{d} \quad (3.1)$$

missä

$l_{\text{gas}}$  on keskimääräinen molekyylien välinen vapaa matka (m)

$d$  on keskimääräinen huokosten halkaisija (m)

Knudsenin luvun suuruuden vaikutusta lämmön johtumiseen huokoisessa materiaalissa voidaan kuvata karkeasti seuraavalla tavalla:

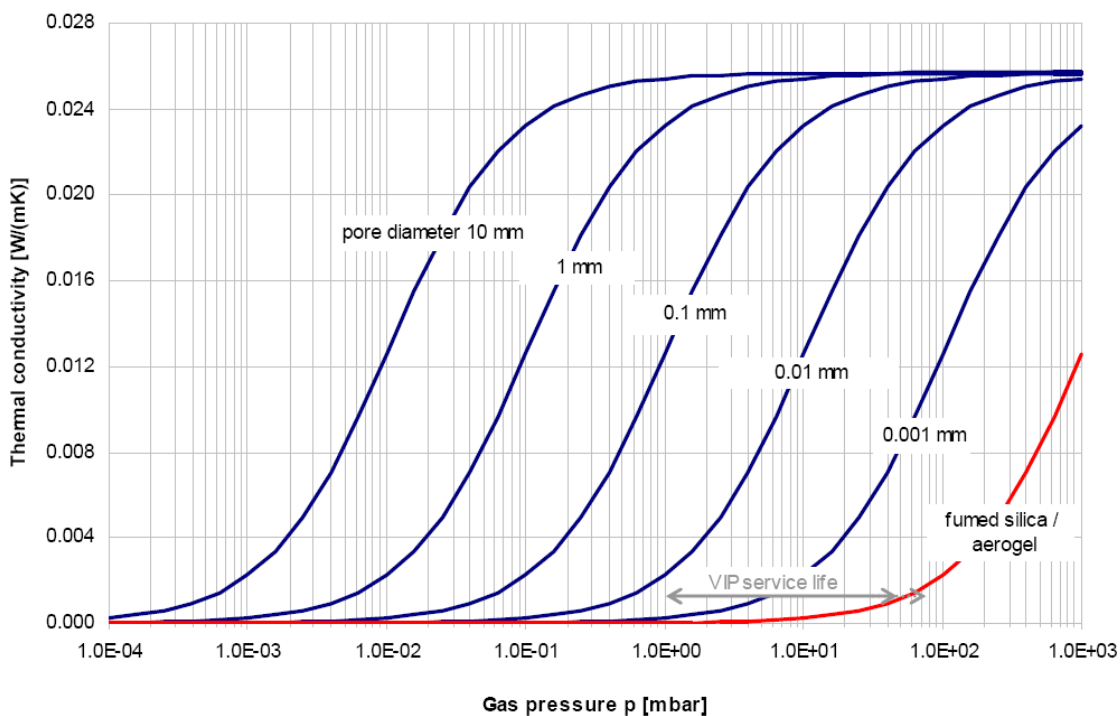
$Kn \ll 1$ , lämmön siirtyminen huokoisessa materiaalissa aiheutuu pääosin kaasumolekyylien törmäyksistä.

$Kn \gg 1$ , lämpö siirtyy pääosin molekyylien törmätessä huokosseinämiin.

Knudsenin luvun muuttuessa huokoisen materiaalin lämmön siirtymisen komponenttien jakauma muuttuu. Knudsenin luvun kasvaessa kaasun johtumisen osuus pienenee ja johtuminen huokosseinämien kautta korostuu. Tämä puolestaan pienentää lämmön siirtymistä huokoisessa materiaalissa, kuten kuvasta 2.2 havaittiin.

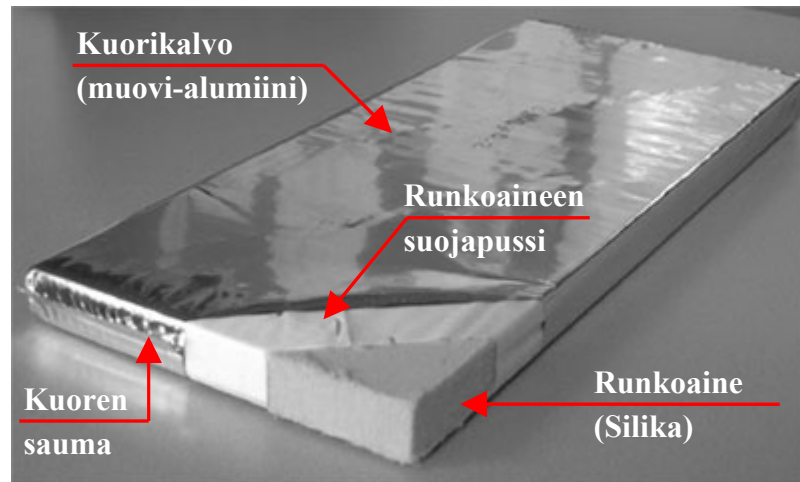
Pienentämällä lämmöneristeen sisäisen kaasun painetta, eli imemällä eristeen sisältä ilmaa pois, kaasun lämmönjohtavuus pysyy vakiona, kunnes molekyylien välinen vapaa

matka on suurimpien huokosten kokoinen tai suurempi (kuva 3.1). Silikajauheesta puristetun levyn suurimmat huokokset ovat samaa kokoluokkaa kuin kaasumolekyylien välinen vapaa matka normaalissa ilmanpaineessa (noin 70 nm). Tästä johtuen jo normaalissa ilmanpaineessa sen sisältämän kaasun lämmönjohtavuus on pienentynyt, kuten kuvasta 3.1 havaitaan. Perinteisten, suurempihuokoisten, eristeiden sisällä vallitsee ympäröivää ilmaa vastaava paine, jolloin niiden lämmönjohtavuus on silikalevyä suuremman huokoskokojakauman takia suurempi. Kuvasta 3.1 nähdään myös, että pienentämällä silikaeristeen sisäisen ilman painetta 1 mbar:iin, sen lämmönjohtavuus laskee jo hyvin lähelle nollaa. (IEA Annex 39 2005a)



**Kuva 3.1** Huokosten sisältämän kaasun paineen ja huokoskoon vaikutus materiaalin lämmönjohtavuuteen. Silikan huokoskoko on niin pieni, että jo normaalissa ilmanpaineessa (1013 mbar) kaasun lämmönjohtavuus on pienentynyt, toisin kuin suuremmilla huokoskoilla. (IEA Annex 39 2005a)

VIP-eristeen rakenne on esitetty kuvassa 3.2. Runkoaineen suojapussin materiaalina käytetään muun muassa polyesterihuopaa, joka on valittu lähinnä valmistusteknisistä syistä. Se antaa kuorimateriaalille kulutuksenkestävyyttä materiaalin käsittelyä varten valmistusvaiheessa ja helpottaa kuoren saumausta estämällä kuorimateriaalista irtoavan jauheen sekoittumista sauma-alueelle. Seuraavassa käsitellään runkoaineuksen ja kuorimateriaalin tärkeimpiä ominaisuuksia.



**Kuva 3.2** Tyypillinen VIP-eristelevy, jonka kuorimateriaali on poistettu yhdestä reunasta. (Muokattu kuvasta: Tenpierik et al. 2007)

VIP-eristeeseen soveltuvan runkomateriaalin tulee täyttää useita ominaisvaatimuksia (IEA Annex 39 2005a): hyvin pieni huokoskoko, avoin kennomainen rakenne ja puristuskestävyys (ilmanpaineesta), lisäksi sen tulee olla lähes infrapunasäteilyä läpäisemätöntä.

Mikäli lämmönjohtumista suurihuokoisten perinteisien eristeiden sisältämässä kaasussa halutaan pienentää, joudutaan painetta laskemaan hyvin paljon (kuva 3.1). Kovin matalan paineen ylläpitäminen on vaikeaa ja se asettaa erityisiä vaatimuksia sekä runko- että kuorimateriaalille. Näin ollen VIP-eristeissä on hyvä käyttää hyvin pienen huokoskoon omaavaa runkomateriaalia.

Huokosverkoston tulee olla täysin yhtenäinen, jotta ilma voidaan imeä nopeasti eristeeseen sisältä valmistusvaiheessa tyhjiön aikaansaamiseksi.

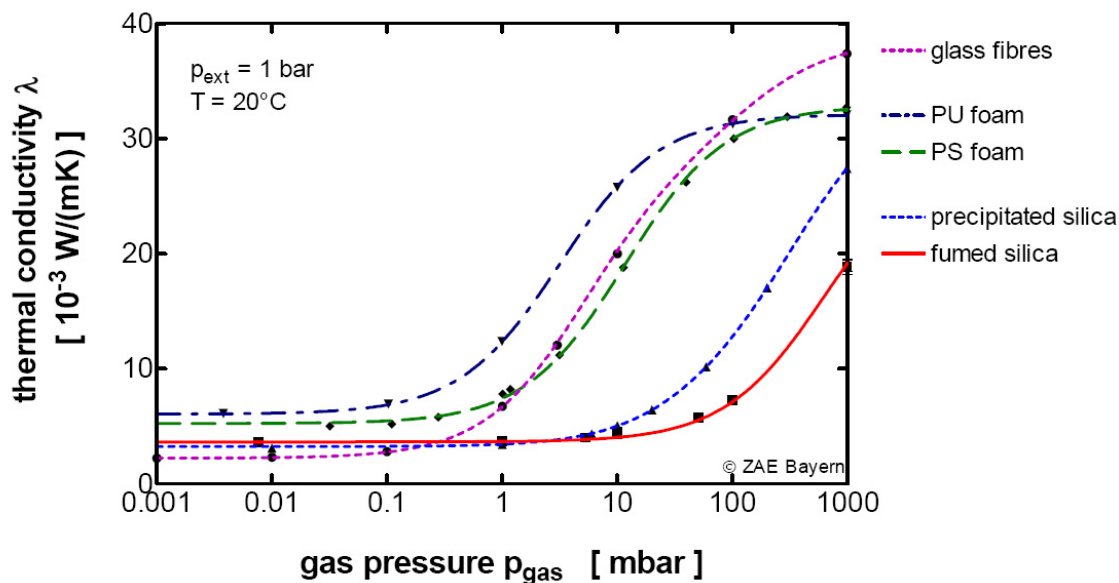
VIP-eristeeseen sisäinen paine on vain muutama mbar. Näin ollen siihen kohdistuu eristeeseen sisä- ja ulkopuolen välillä vallitsevasta paine-erosta johtuva suuri painekuorma neliötä kohden. Runkoaineksen tulee olla riittävän luja, ettei huokosverkosto sorru tyhjiön imemisvaiheessa tai myöhemmässä käytössä.

Eristeen sisäisessä kaasussa tapahtuvan johtumisen lisäksi tulee säteilyllä siirtyvän lämmön osuus minimoida, minkä suuruus on merkittävä etenkin huokoisessa materiaalissa (kuva 2.3). Säteilyllä siirtyvän lämmön minimointi korostuu VIP-eristeissä, sillä lämmön siirtyminen säteilyllä on tehokkainta tyhjiössä. Vaikutusta voidaan rajoittaa lisäämällä runkoainekseen hyvin pieniä (2–5  $\mu\text{m}$ :n kokoisia) hiilipartikkeleita. Optimaalinen partikkelikoko riippuu käytettävästä materiaalista. Eristeen huokosrakenteessa sijaitsevien hiilipartikkelien säteilyä heikentävä vaikutus perustuu niiden aiheuttamaan säteilyn sirontaan ja absorptioon. Hiilen lisääminen saa aikaan runkoaineksen harmaan värin. (Napp et al. 1999; Fricke 2009)

Hiiltä käytetään tänä päivänä myös säteilyn rajoittamiseen tavanomaisessa EPS-eristeessä, joissa käytettävä partikkelikoko ei vastaa kuitenkaan säteilyn vaimenemisen kannalta optimaalista partikkelikokoa.

VIP-eristeiden runkoaines koostuu nanokokoisista pallomaisista partikkeleista, jotka koskettavat toisiinsa pistemäisesti. Pienen partikkelien välisen kosketusalan ansiosta lämmön johtuminen runkoaineen partikkelien välityksellä on vähäistä.

Kuten aiemmin mainittiin, VIP-eristeitä on silikan lisäksi saatavilla myös muista avo-  
huokoisista runkomateriaaleista valmistettuna. Kuvassa 3.3 on esitetty eri VIP-  
eristeiden runkomateriaalien lämmönjohtavuudet niiden sisäisen paineen funktiona. Ku-  
van lämmönjohtavuudet sisältävät kaikki lämmönsiirtymismuodot ja siitä havaitaan si-  
likan käytön etu, matala lämmönjohtavuus. Sen lämmönjohtavuus on hyvin alhainen 50  
mbar saakka ja se on lähes puolta pienempi muihin eristeisiin verrattuna normaalissa  
ilmanpaineessa.



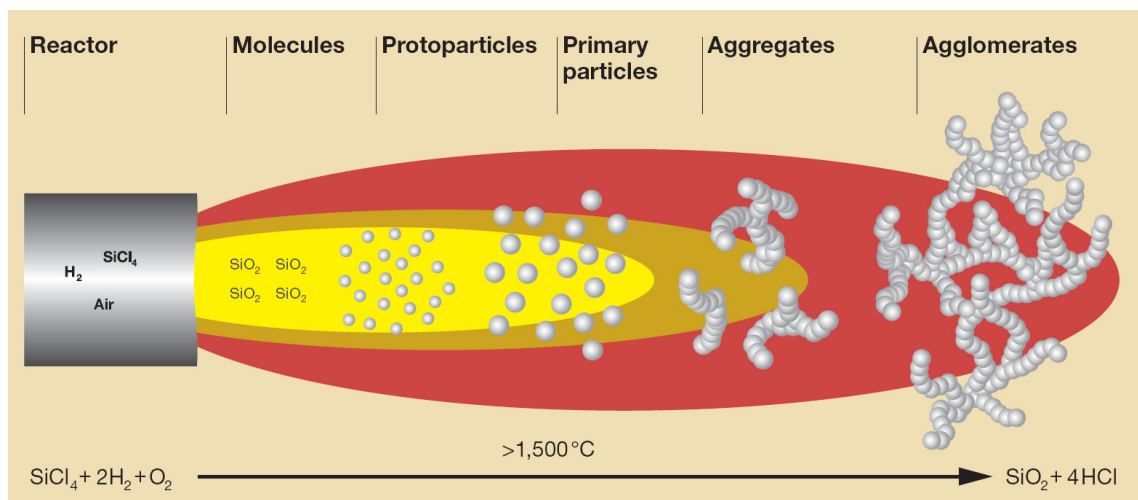
**Kuva 3.3** VIP-eristeiden lämmönjohtavuuksien muuttuminen paineen funktiona. Silikan (fumed) lämmönjohtavuus alkaa kasvaa selkeästi vasta paineen ollessa suurempi kuin 50 mbar. (IEA Annex 39 2005a)

VIP-eristeen toiminnan kannalta kuori on sen kriittisin osa. Kuoren tehtävänä on ylläpitää tyhjiötä eristelevyn sisäpuolella. Sen tulee estää eristeen sisäisen paineen kasvua sekä eristeen kosteuspitoisuuden kasvua ja näin ollen taata eristeelle riittävä käyttöikä, jota käsitellään kohdassa 3.2.3. VIP-eristeen kuori koostuu polymeeri- ja alumiinikerroksista, joiden lukumäärä voi vaihdella tapauskohtaisesti. Matalaemissiiviset alumiinikerrokset heijastavat suurimman osan lämpösäteilystä takaisin ympäristöönsä parantaen sen VIP-eristeen eristävyysominaisuuksia.

### 3.2.2 Eristeen ja runkoaineen valmistus

VIP-eristeiden valmistus voidaan jakaa kahteen osaan: runkoaineen ja eristeen valmistukseen. Porextherm on ainoa rakentamiseen soveltuvien VIP-eristeiden valmistaja, joka valmistaa itse eristeessä käyttämänsä runkoaineen. Kaksi muuta merkittävää höyrystetyn silikan valmistajaa ovat Capot Corporation ja SAES Getters Group. Runkoaineen ja itse eristeen valmistus on kaupallista toimintaa, joten tarkkoja valmistusmenetelmiä ja materiaalikoostumuksia ei ole saatavilla, etenkin runkoaineesta.

Silikapohjaisten VIP-eristeiden runkoaines koostuu yleensä pääosin höyrystetystä sili-kasta (n. 80 %) eli piidioksidista ( $\text{SiO}_2$ ), joka on hapen ja piin yhdiste. Kuvassa 3.4 on esitetty periaatteellinen kuva höyrystetyn silikan valmistuksesta. Polttamalla piitetrakloridia ( $\text{SiCl}_4$ ) happivety-liekillä muodostuu 5–30 nm kokoisia  $\text{SiO}_2$ -partikkelita (primary particles). Ne ovat erillisiä partikkeleita ainoastaan reaktioalueella eli happivety-liekissä. Partikkeliin siirtyessä pois päin varsinaiselta reaktioalueelta ne yhdistyvät pysyviksi suuremmiksi yksiköiksi (aggregates), jotka ovat kokoluokkaa 0,1–1,0  $\mu\text{m}$ . Jäähdytyksessä aggregaatit takertuvat yhteen muodostaen suurempia 1–250  $\mu\text{m}$  kokoisia ketjumaisia rakenteita (agglomerates). Kuvan 3.4 mukaisella pyrolyysillä valmistettu silika on avohuokoinen, ilmava ja valkoinen pulverimainen materiaali, joka sisältää ilmaa noin 99 tilavuusprosenttia. Sen irtotiheys on erittäin alhainen (n. 50  $\text{kg/m}^3$ ), mutta kiintotiheys on korkea (n. 2200  $\text{kg/m}^3$ ). (Wacker Chemie AG)



**Kuva 3.4** Höyrystetyn silikan valmistuksen periaate (Wacker Chemie AG).

Varsinaiseen eristeen valmistuksen kulku on seuraava (Caps 2009; Nanopore Incorporated; Vicover Oy):

1. runkoaineen koostumuksen valinta ja sekoitus
2. pulverimaisen runkoaineseoksen puristaminen levyksi
3. puristetun levyn leikkaaminen vaadittuun muotoon
4. levyjen kuivatus uunissa
5. levyjen suojaaminen polyesterihuovalla
6. levyjen päällystäminen kaasujen ja vesihöyryn läpäisyn estävällä monikerroksisella kuorikalvolla
7. levyn tyhjiöinti ja kuorikalvon sulkeminen lämmön avulla tyhjiökammiossa
8. saumojen leikkaus ja viimeistely
9. eristelevyjen tasaantuminen ja laadunvarmistus

VIP-eristeissä käytettävä runkoaines on pulverimaisessa muodossa valmistuksen alkaessa. Runkoaineen koostumus voi vaihdella tuotekohtaisesti ja materiaalivalmistajien välillä, mutta yleinen materiakoostumus on seuraava: n. 80 % höyrystettyä silikaa ( $\text{SiO}_2$ ), n. 15 % piikarbidia ( $\text{SiC}$ ), joka on piin ja hiilen muodostama keraaminen yhdiste ja n. 5 % muita lisäaineita (Porextherm; va-Q-tec). Runkoaineen yksityiskohtainen koostumus on luonnollisesti VIP-eristevalmistajien yrityssalaisuus, joten siitä ei ole julkista tietoa saatavilla.

Seuraavassa vaiheessa runkoaines puristetaan levymäiseen muotoon ja leikataan haluttuun levykokoon. Tässä vaiheessa runkoaineslevy on puolijäykkä ja sen lopullinen jäykkyys saavutetaan vasta levyn tyhjiöinnissä.

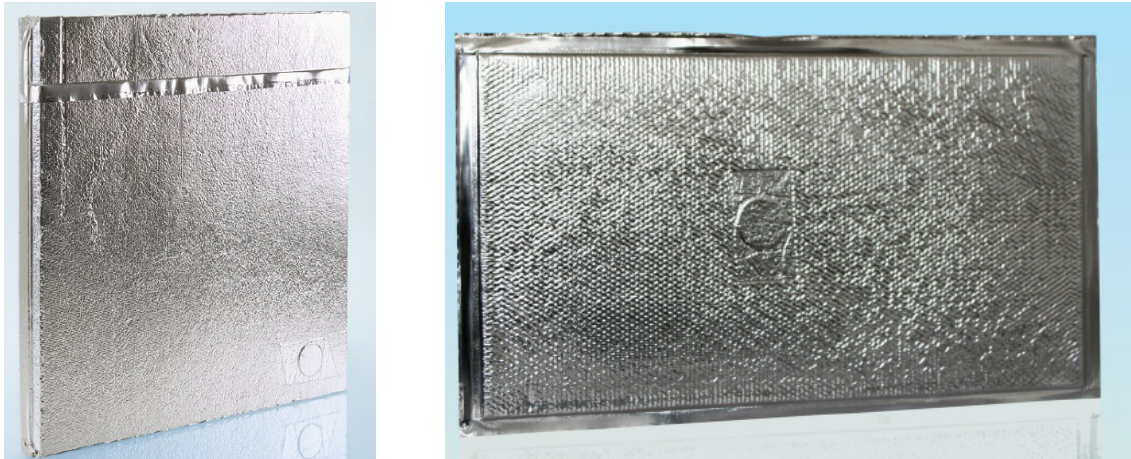
Levyn kuivatuksen jälkeen levyt suojataan läpäisevällä polyesterihuovalla tai vastaavalla pussimaisella kerroksella. Huopa estää hienorakeista runkoainespölyä sekoittumasta sauma-alueelle ja helpottaa kuorikalvon saumausta ilmatiiviiksi.

Levyjen päälle asetetaan kaasujen ja vesihöyryn läpäisyn estävä monikerroksinen kuorikalvo. Sen avoimet sivut suljetaan hitsaamalla lämmön avulla tyhjiökammiossa muutamien millibaarin kymmenyksen paineessa. Tyhjiöinnissä levy saa lopullisen jäykkyyden. (IEA Annex 39 2005a)

Saumojen ylijäämäosat leikataan ja viimeistellään, jotta levyjen reunoista tulisi mahdollisimman tasaiset ja suorakaiteen muotoiset. Levyjen saumaustavat eroavat hieman jopa saman materiaalivalmistajan tuotteiden välillä. Kuvassa 3.5 on esitetty materiaalivalmistajan nimeltä va-Q-tec valmistamat VIP-eristeet va-Q-vip (vasemmalla) ja va-Q-plus (oikealla). Niiden saumausmenetelmä ja itse valmistusprosessi eroavat toisistaan. Va-Q-vip on valmistettu edellä esitellyllä tavalla ja sen valmistuksessa käytettävällä sau-



mausmenetelmällä eristeen reunoista saadaan suorakaiteen muotoiset, mikä helpottaa asennusta. Va-Q-plus eristeen valmistaminen puolestaan eroaa edellä esitellystä valmistusmenetelmästä, sillä sen valmistuksessa pulverimainen runkoaine lisätään suoraan kuorikalvosta valmistettuun pussiin. Tämän jälkeen pussi tyhjiöidään ja suljetaan tyhjiökammiossa. Kyseisen valmistusmenetelmän ansiosta geometrialtaan monimutkaisten levyjen valmistus on helpompaa, mutta eristeistä ei saada valmistettua tasapaksuja levyjä, vaan eristelevy on reunoilta ohuempi kuin eristeen keskiosasta. Valmistustavasta johtuen va-Q-plus eristeiden reunoissa on 10–20 mm:n levyiset saumat. (Caps 2009; va-Q-tec)



**Kuva 3.5** Va-Q-vip (vasemmalla) ja va-Q-plus (oikealla) eristeiden saumojen eroavaisuudet (Caps 2009).

VIP-eristeiden valmistusprosessi on herkkä valmistusvirheille, joten jatkuva laaduntarkkailu on tärkeämpää kuin tavanomaisilla lämmöneristeillä. Vasta valmistettujen eristelevyjen annetaan tasaantua noin 10 vuorokautta, jonka jälkeen eristelevyjen sisäinen paine mitataan ja dokumentoidaan. Eristelevyjen lyhytaikainen varastointi ennen laadunvarmistusta on tärkeää, jotta mahdollisista valmistusvirheistä johtuva eristeen sisäisen paineen kasvu näkyisi mittauksissa. (IEA Annex 39 2005a) Mittauspöytäkirja on mahdollista saada materiaalivalmistajalta tilauksen yhteydessä (va-Q-tec).

### 3.2.3 Vanheneminen

Kuorimateriaalin läpäisy on VIP-eristeen kriittisin ominaisuus tarkasteltaessa sen käyttöikä, jonka tulisi rakennussovellutuksissa olla vähintään 30–50 vuotta. Hyvin valmistetun silikarunkoisen VIP-eristeen keskiosan lämmönjohtavuus  $\lambda_{\text{cop}}$  on valmistuksen jälkeen noin 0,004 W/(mK). Tuotteiden välillä on eroja, joten tarkat lämmönjohtavuusarvot tulee tarkistaa materiaalivalmistajilta. VIP-eristeen ympäristöä alhaisemman paineen vuoksi eristeen ja ympäristön välillä vallitsee painegradientti, joka toimii pakottavana voimana ympäristön kaasujen tunkeutumiselle eristeeseen. Näin ollen VIP-eristeen lämpötekniinen toiminta heikkenee kahdella tapaa:

- eristeen sisäinen paine kasvaa
- eristeen vesipitoisuus kasvaa

Käsiteltäessä VIP-eristeitä tulee erottaa niiden vanheneminen ja kestävyys toisistaan. Vanheneminen on jatkuva materiaalin huonontumisprosessi, joka on seurausta hitaasta ilmakehän kaasumolekyylien tunkeutumisesta kuoren läpi eristeeseen. Sen seurauksena eristeen paine kasvaa ja kosteutta kerääntyy hygroskooppiseen runkomateriaaliin. Vastaavasti kestävyys kuvaa materiaalin kykyä kestää kemiallista ja mekaanista kuormitusta, jotka voivat aiheuttaa VIP-eristen kuoren hajoamisen. Tästä seuraa eristeen sisäisen paineen nopea kasvu ja samalla eristysominaisuuksien heikkeneminen. Eristeen kestävyttä sen elinkaaren eri vaiheissa tarkastellaan käyttösovellusten asentamisen yhteydessä kohdassa 3.2.7.

VIP-eristeiden vanhenemiseen, eli sen sisäisen paineen ja vesipitoisuuden kasvuun, vaikuttavat useat rakenteelliset ja ilmastolliset tekijät. Näistä merkittävimmät ovat eristeen kuoren vesihöyryn ja ilmakehän kaasujen läpäisykyky, eristeen mitat sekä eristeen ympäristön olosuhteet, kuten lämpötila, kosteuspitoisuus sekä ilmanpaine. Näin ollen rakennuksen ja lämmöneristeiden oikeanlaisella suunnittelulla, kuten levyjen mittojen optimoinnilla ja eristettä ympäröivien kosteusolojen madaltamisella, voidaan vaikuttaa niiden käyttöikänsä. Nyrkkisääntönä voidaan pitää seuraavaa: Paksulla ja suuripinta-alaisella paneelilla on pidempi käyttöikä kuin ohuella ja pienellä paneelilla. Tämä johtuu siitä, että ilmakehän kaasut tunkeutuvat VIP-eristeeseen reunojen saumojen kohdalta helpommin kuin levyn keskiosasta. Pienikokoisilla paneeleilla on suhteessa levyn pinta-alaan enemmän levyn reunajuoksumetrejä kuin suuremmilla paneeleilla. Eristettä ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden ollessa matala ja vakaa voi eristeen käyttöikä kasvaa jopa 20 vuodella verrattuna kosteampiin olosuhteisiin. (Tenpierik et al. 2007)

Rakennussovellutuksissa VIP-eristeitä ympäröivät ilmasto-olosuhteet eivät pysy vakioina, vaan ne muuttuvat vuorokauden- ja vuodenajan mukaan. Näin ollen dynaamisesti

muuttuvat ilmasto-olosuhteet huomioon ottavan eristeen vanhenemista kuvaavan laskentamallin toteuttaminen on hyvin monimutkaista. Lisäksi eristeiden vanhenemislaskelmat tulisi tehdä kohdekohtaisesti, käyttäen todellisia rakenteita sekä rakennuspaikan ilmastodataa.

Seuraavassa on esitetty yksinkertaistettu laskentamenetelmä, jolla voidaan arvioida VIP-eristeen lämmönjohtavuuden muuttumista sen vanhentuuessa. Olettaen, että eristeen sisäisen paineen ja kosteuden muuttuminen ovat toisistaan riippumattomia, voidaan lämmönjohtavuus laskea seuraavasti:

$$\lambda(p_{\text{gas}}, X_w) = \lambda_{\text{evac}} + \lambda_{\text{gas}}(p_{\text{gas}}) + \lambda_w(X_w) \quad (3.2)$$

missä

$\lambda_{\text{evac}}$	on	lämmönjohtavuus vasta valmistetussa, kuivassa eristeessä (W/(mK))
$\lambda_{\text{gas}}(p_{\text{gas}})$	on	eristeen sisäisen paineen kasvamisesta aiheutuva lämmönjohtavuuden kasvu (W/(mK))
$\lambda_w(X_w)$	on	eristeen vesipitoisuuden kasvamisesta aiheutuva lämmönjohtavuuden kasvu (W/(mK))

Kaavasta 3.2 saadaan johdettua lämmönjohtavuuden aikariippuvuudelle kaava 3.3, joka perustuu silikasta valmistetuille VIP-eristeille tehtyihin tutkimuksiin. Tutkimukset ovat osoittaneet, että VIP-eristeen paineen kasvulla on merkittävämpi vaikutus sen vanhenemiseen kuin sen kosteuspitoisuuden kasvamisella.

$$\lambda(t) = \lambda_{\text{evac}} + \frac{\lambda_{\text{air}}}{1 + \frac{p_{1/2,\text{air}}}{p_{\text{air}}(t)}} + b \cdot X_w(t) \quad (3.3)$$

missä

$\lambda_{\text{air}}$	on	eristettä ympäröivän ilman lämmönjohtavuus (W/(mK))
$p_{1/2,\text{air}}$	on	eristettä ympäröivän ilman paineen puolikas (mbar)
$p_{\text{air}}(t)$	on	eristeen sisäisen ilman paine ajanhetkellä t (mbar)
b	on	vakio, joka kuvaa eristeen lämmönjohtavuuden kasvua sen vesipitoisuuden kasvaessa (W/(mK·%-mass))
$X_w(t)$	on	eristeen vesipitoisuus ajanhetkellä t (%-mass)

Taulukossa 3.1 on esitetty VIP-eristeen paineen ja kosteuspitoisuuden kasvun määrät vuotta kohden laboratoriossa määritettyjen mittausten perusteella. Testattujen VIP-eristeiden kuorimateriaalina on käytetty monikerroksista alumiini- ja polymeerikerroksista koostuvaa rakennetta. Taulukon arvot ovat varmallalla puolella sovelluksissa, joissa

eriste altistuu joko sisäilman tai ulkoilman olosuhteille. (IEA Annex 39 2005a) Lisäksi taulukkoon on laskettu kaavalla 3.3 lämmönjohtavuuksien maksimiarvot 25 ja 50 vuoden jälkeen. Laskelmissa on käytetty seuraavia lähtöarvoja sekä oletuksia:

$$\rho_{\text{vip}} = 170 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{silikarunkoaineuksen tiheys})$$

$$\lambda_{\text{evac}} = 0,004 \text{ W/(mK)}$$

$$p_{1/2,\text{air}} \approx p_{1/2,\text{N}_2} = 600 \text{ mbar} \quad (\text{puolet typen paineesta})$$

$$\lambda_{\text{air}} = 0,025 \text{ W/(mK)} \quad (\text{lämpötilassa } 10 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$b = 0,0005 \text{ W/(mK}\cdot\%\text{-mass)} \quad (\text{keskilämpötilassa } 10 \text{ }^\circ\text{C, Schwab et al. 2005a})$$

**Taulukko 3.1** Ikääntymisen vaikutus silikasta (fumed) valmistettujen VIP-eristeiden ( $\text{SiO}_2$ -VIP) lämmönjohtavuuteen (IEA Annex 39 2005a).

	50 x 50 x 2 cm <sup>3</sup>	100 x 100 x 2 cm <sup>3</sup>
<b>Paineenkasvu p(t) (mbar/a)</b>	< 2,0	< 1,0
<b>Kosteuden kertyminen X<sub>w</sub>(t) (%-mass/a)</b>	< 0,2	< 0,2
<b>Lämmönjohtavuus (25 vuotta) (W/(mK))</b>	0,008	0,007
<b>Lämmönjohtavuus (50 vuotta) (W/(mK))</b>	0,013	0,011

Taulukosta havaitaan, että eristeiden vanhentumisella on merkittävä vaikutus niiden lämmönjohtavuuksiin, jotka ovat tuotteiden valmistusvaiheessa noin 0,004 W/(mK). Tämä tuotteiden vanheneminen tulisikin ottaa huomioon suunniteltaessa tuotteiden käyttöä rakennussovelluksissa. Jotkut materiaalivalmistajat ilmoittavat tuotteelleen lämmönjohtavuuden, jossa on huomioitu tuotteen reunojen kylmäsiirtovaikutuksen lisäksi sen vanheneminen.

VIP-eristeiden vanhenemisestä johtuvalle käyttöiän päättymiselle ei ole olemassa standardisoituja kriteerejä. Sen vuoksi tuotteen lämmönjohtavuudelle voidaan asettaa jonkinlainen raja-arvo, joka tulee täyttyä halutun käyttöiän ajan (esimerkiksi  $\lambda \leq 0,010$  W/(mK)). Tuotteiden vanhenemisestä aiheutuvan lämmön johtumisen kasvun vuoksi rakennuksen lämmöneristyksen suunnittelun yhteydessä olisi järkevää ylittää lämmöneristyksen paksuus. Sillä varmistettaisiin, että rakennuksen vaipan läpi johtamalla tapahtuva lämpöhäviö ei kasvaisi halutun käyttöiän aikana merkittävästi suunnitellun tavoitetason yläpuolelle. Tosin sanoen rakennuksen lämmöneristys tulisi suunnitella käyttäen rakennuksen käyttöiän mukaista, vanhentuneen lämmöneristeen lämmönjohtavuutta. Tällöin käyttöiän alkuvaiheessa rakennuksen energiankulutusta tulisi arvioida vuosittain tai muutaman vuoden jaksoin muuttuvalla lämmöneristeen lämmönjohtavuudella.

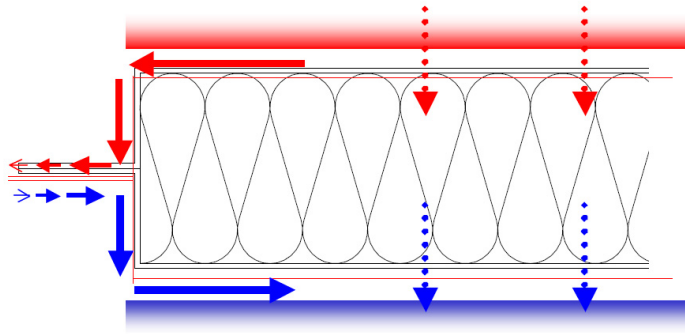
### 3.2.4 Kylmäsillat

Yleisesti ottaen kylmäsillat ovat rakenteiden lämmöneristyskerroksen tai vaipan läpäiseviä rakenteita tai kiinnikkeitä, joiden lämmönjohtavuus on suurempi kuin lämmöneristeellä. Kylmäsillat kasvattavat rakenteiden vaipan läpi tapahtuvaa lämpöhäviötä sekä aiheuttavat kosteuden kondensaatoriskejää rakennuksen vaipan sisäosissa. Kasvavien lämmöneristevaatimuksien vuoksi kylmäsiltojen vaikutus rakennuksen ulkovaipan läpi johtuvaan lämpöhäviöön korostuu. Siksi myös VIP-eristeiden käytön suunnittelussa tulee kylmäsiltojen vaikutus minimoida. VIP-eristeen runkoaineen ja kuorimateriaalin lämmönjohtavuudet eroavat huomattavasti toisistaan, joten eristeen reunojen kylmäsilta-vaikutusta ei voida täysin poistaa. Tämä tulee ottaa huomioon lämmöneristysten suunnittelussa.

Tarkasteltaessa VIP-eristeiden käyttöä rakennussovelluksissa, voidaan toisistaan erottaa kolme eri syistä aiheutuvaa kylmäsilta-vaikutusta (IEA Annex 39 2005a):

- Ohutta kuorimateriaalia pitkin aiheutuva kylmäsilta.
- Kahden vierekkäisen paneelin väliin jäävästä pienestä ilmaraosta aiheutuva kylmäsilta.
- Rakenteiden epäsäännöllisyyksistä, kuten kiinnikkeistä aiheutuva kylmäsilta.

Kiinnikkeistä ja eristekerrosta läpäisevistä rakenteista (esimerkiksi runkotolpat) aiheutuvat kylmäsillat tulevat VIP-eristeiden käytön yhteydessä ottaa vastaavasti huomioon kuin tavanomaistenkin eristeiden yhteydessä. Paneelien väliin mahdollisesti jäävän pienen ilmaraon vaikutus lämpöhäviöön voi olla merkittävä, varsinkin jos käytetään yhtä eristekerrosta, jolloin eristeiden saumoja ei voida limittää. Ilmaraot ovat seurausta sili-kasta tehdyn runkomateriaalin epätasaisesta kutistumisesta eristeen tyhjiöinnissä sekä asennuksen vaikeudesta (Schwab et al. 2005b). Tämä aiheuttaa varmasti haasteita VIP-eristeistä tehtävän lämmöneristysten työtekniselle toteutukselle. Seuraavassa tarkastellaan ainoastaan VIP-eristeen kuorimateriaalista aiheutuvan kylmäsiltojen vaikutusta eristeiden lämmönjohtavuuteen. Se on otettava huomioon VIP-eristysten suunnittelussa, joka sinällään eroaa tavanomaisista lämmöneristeistä tehtävän eristysten suunnittelusta, jossa kyseistä ongelmaa ei ole.



**Kuva 3.6** Lämmön johtuminen kylmäsiltaana toimivaa VIP-eristeen kuorta pitkin (IEA Annex 39 2005a).

Kuvassa 3.6 on esitetty periaatteellinen kuva VIP-eristeen kuoren kautta aiheutuvasta kylmäsiltaefektistä. Tästä kylmäsilta vaikutuksesta aiheutuen VIP-eristeen tehollinen lämmönjohtavuus,  $\lambda_{\text{eff}}$ , on suurempi kuin ideaalinen paneelin keskiosan lämmönjohtavuus  $\lambda_{\text{cop}}$ . Kylmäsilta vaikutuksen suuruuteen vaikuttaa välittömästi eristekerrosta ympäröivien materiaalien termiset ominaisuudet.

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{\text{cop}} + \Psi_{\text{VIP}} \cdot d \cdot \frac{p}{A} \quad (3.4)$$

missä

$\lambda_{\text{cop}}$	on	eristeen keskiosan lämmönjohtavuus (W/(mK))
$\Psi_{\text{VIP}}$	on	viivamainen lisäkonduktanssi (reunan ja umpiosan välinen vuorovaikutus) (W/(mK))
$d$	on	eristeen paksuus (m)
$p$	on	eristeen piirin pituus (m)
$A$	on	eristeen pinta-ala (m <sup>2</sup> )

Viivamaisen lisäkonduktanssin  $\Psi_{\text{VIP}}$  suuruus riippuu eristepaneelin paksuudesta ( $d$ ), eristeen keskiosan lämmönjohtavuudesta ( $\lambda_{\text{cop}}$ ), kuorikerroksen paksuudesta ( $t_f$ ) ja kuoren lämmönjohtavuudesta ( $\lambda_f$ ). Lisäksi siihen vaikuttaa välittömästi eristepaneelia ympäröivien materiaalien termiset ominaisuudet. Näin ollen kylmäsilta vaikutus riippuu sovelluksesta, jossa VIP-eristeitä käytetään ja tarkkojen arvojen määrittäminen vaatii tapauskohtaista laskentaa.

Schwab et al. (2005b) ovat tehneet seuraavat VIP-eristeiden kylmäsilta vaikutukseen liittyvät laskelmat. He tutkivat laskelmissaan kahden eri kuorimateriaalin ja eristeiden välisten ilmarakojen vaikutusta viivamaisen lisäkonduktanssin, lämmönjohtavuuden ja U-arvon suuruuteen. Laskelmissa käytettyjen eristepaneelien koot ja paksuudet vaihtelivat. Laskelmat oli suoritettu kaksiulotteiseen lämmönsiirtymisen laskentaan soveltuvalla HEAT 2 – ohjelmalla. Laskennan lähtötiedot ja oletukset ovat seuraavat:

**Kuorimateriaalit:**

1. Molemmiin puolin muovikalvoilla laminoitu alumiinifolio, alumiinikerroksen paksuus on 8  $\mu\text{m}$ . (Al foil), (AF)
2. Monikerroksinen alumiinipinnoitetuista muovikalvoista koostuva kuorirakenne, jonka alumiinikerroksen paksuus on 30–80 nm. (Multilayer foil), (MF)

**Pintavastukset:**

1.  $R_i = R_e = 0 \text{ m}^2\text{K/W}$  (first surface-condition)
2.  $R_i = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$  ja  $R_e = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$  (second surface-condition)

Eristeen keskiosan lämmönjohtavuus:  $\lambda_{\text{cop}} = 0,004 \text{ W/(mK)}$

Alumiinin lämmönjohtavuus:  $\lambda_{\text{alum}} = 200 \text{ W/(mK)}$

$U_u$  on eristepaneelin keskiosan U-arvo ( $\text{W/(m}^2\text{K)}$ )

$U_o$  on eristepaneelin U-arvo (sisältää kylmäsilat) ( $\text{W/(m}^2\text{K)}$ )

$\lambda_{\text{eff}}$  on eristeen keskiosan tehollinen lämmönjohtavuus (sisältää kylmäsilat) ( $\text{W/(mK)}$ )

Laskelmat osoittavat (taulukko 3.2), että käytettäessä AF-kuorimateriaalia, ovat lisäkonduktanssien arvot huomattavasti suurempia kuin vastaavat arvot MF-kuorimateriaalista valmistetuille VIP-eristeille. Tästä voidaan jo päätellä, että ohuiden alumiinikerrosten käyttö kuorikalvossa (MF-kalvo) on kylmäsilta-vaikutuksen minimoimiseksi kannattavampaa kuin yhden paksumman alumiinikerroksen (AF-kalvo). MF-kuorimateriaalia käytettäessä levyn paksuudella ei ole merkittävää vaikutusta viivamaiseen lisäkonduktanssiin, mutta ilmaraon suuruudella on puolestaan merkittävä vaikutus.

**Taulukko 3.2** Viivamainen lisäkonduktanssi  $\Psi_{\text{VIP}}$  ( $\text{W/(mK)}$ ) erilaisilla levypaksuuksilla, kuorimateriaaleilla, ilmaraoilla ja pintaolosuhteilla (Schwab et al. 2005b).

	Laminated Al foil		Al-coated Multilayer foil	
	VIP 1 cm thick	VIP 2 cm thick	VIP 1 cm thick	VIP 2 cm thick
First surface-condition				
Gap 0 mm	0.319	0.160	0.003	0.003
Gap 2 mm	0.328	0.168	0.011	0.009
Gap 5 mm	0.343	0.181	0.026	0.022
Second surface-condition				
Gap 0 mm	0.089	0.072	0.002	0.002
Gap 2 mm	0.098	0.076	0.007	0.005
Gap 5 mm	0.102	0.084	0.015	0.012

Lämmöneristeiden reunojen suuremmasta lämmönjohtavuudesta aiheutuvien kylmäsiltojen vaikutus U-arvoon sekä teholliseen lämmönjohtavuuteen, on esitetty taulukoissa 3.3 ja 3.4. Nämä laskelmat osoittavat myös, että AF-kalvo (taulukko 3.3) ei sovellu VIP-eristeen kuorimateriaaliksi siitä aiheutuvan suuren kylmäsilta vaikutuksen vuoksi. Kylmäsiltojen vaikutuksen huomioiva U-arvo voi olla jopa yli 360 % suurempi ilman kylmäsiltoja laskettuun U-arvoon verrattuna. MF-kalvolla (taulukko 3.4) varustetuille VIP-eristeille U-arvon kasvu on vain luokkaa 2–44 %. Tämän tyyppiselle kalvolle, ilmaraon ollessa 0 mm, kylmäsiltojen vaikutus lämmönjohtavuuteen sekä U-arvoon on käytännössä mitätön.

**Taulukko 3.3** U-arvo, U-arvon muutos (kylmäsiltojen vaikutuksesta) ja tehollinen, kylmäsilto huomiioon ottava lämmönjohtavuus AF-kalvolla varustetulle VIP-eristeelle (Schwab et al. 2005b).

	50 cm × 50 cm × 2 cm			100 cm × 100 cm × 2 cm		
	$U_o$ (W/m <sup>2</sup> K)	$\Delta U/U_u$ (%)	$\lambda_{\text{eff}}$ (W/m K)	$U_o$ (W/m <sup>2</sup> K)	$\Delta U/U_u$ (%)	$\lambda_{\text{eff}}$ (W/m K)
First surface-condition						
Gap 0 mm	0.840	320	0.020	0.52	160	0.0114
Gap 5 mm	0.920	362	0.022	0.56	180	0.0124
Second surface-condition						
Gap 0 mm	0.481	149	0.010	0.337	74	0.0073
Gap 5 mm	0.529	175	0.012	0.361	87	0.0077

**Taulukko 3.4** U-arvo, U-arvon muutos (kylmäsiltojen vaikutuksesta) ja tehollinen, kylmäsilto huomiioon ottava lämmönjohtavuus MF-kalvolla varustetulle VIP-eristeelle (Schwab et al. 2005b).

	50 cm × 50 cm × 2 cm			100 cm × 100 cm × 2 cm		
	$U_o$ (W/m <sup>2</sup> K)	$\Delta U/U_u$ (%)	$\lambda_{\text{eff}}$ (W/m K)	$U_o$ (W/m <sup>2</sup> K)	$\Delta U/U_u$ (%)	$\lambda_{\text{eff}}$ (W/m K)
First surface-condition						
Gap 0 mm	0.208	4	0.0043	0.204	2	0.0042
Gap 2 mm	0.236	18	0.0049	0.218	9	0.0045
Gap 5 mm	0.288	44	0.0061	0.244	22	0.0051
Second surface-condition						
Gap 0 mm	0.197	2	0.0041	0.195	1	0.0040
Gap 2 mm	0.217	12	0.0045	0.205	6	0.0043
Gap 5 mm	0.249	29	0.0052	0.221	15	0.0046



Edellä esitetyt kylmäsiltojen vaikutusta kuvaavat laskentatulokset osoittavat, että VIP-eristeissä käytetyllä kuorimateriaalilla on merkittävä vaikutus todelliseen VIP-eristeiden lämmönjohtavuuteen. Levyjen koon ja niiden välissä olevan ilmaraon vaikutuksen suuruus riippuu myös käytetystä kuorimateriaalista. Schwab et al. (2005b) tekemät laskelmat kuvaavat tapausta, jossa eristeiden vanhenemista ei ole otettu huomioon. Näin ollen laskelmissa tulisi käyttää eristeiden alkuperäisenä lämmönjohtavuutena arvoa, jossa sen vanhentuminen on otettu huomioon. Tällä tavoin saadaan lämmönjohtavuusarvo, jota voidaan käyttää rakenteiden lämmöneristystä suunniteltaessa. VIP-eristeiden reunojen kylmäsiltovaikutuksen minimoimiseksi tulisi käyttää mahdollisimman suurikokoisia neliön muotoisia eristepaneeleja (min.  $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ ). Eristeeksi tulisi valita tuote, jonka kuorimateriaalina on MF-kalvo. Kyseistä monikerroksista kuorirakennetta (MF) käytetään nykyään kaupallisissa VIP-eristeissä. Kuorikalvon kerrosten lukumäärä ja paksuus vaihtelevat tuotekohtaisesti. Mikäli käytetään AF-kalvolla eristettä, tulee käyttää kahden eristekerrosta, jotka limitetään vähintään 5 cm.

VIP-eristeiden valmistajien ilmoittamien lämmönjohtavuuksien välillä on selkeitä eroja. Osa materiaalivalmistajista ilmoittaa vain vasta valmistetun, lämmöneristeiden keskiosan lämmönjohtavuuden ( $\lambda_{\text{cop}}$ ). Pelkästään tämän arvon ilmoittaminen voi johtaa näiden eristeiden käyttäjiä harhaan antamalla liian hyvän kuvan eristeiden lämmöneristysominaisuuksista. Tällöin asiakkaalta vaaditaan laskelmia eristeiden todellisen lämmönjohtavuuden laskemiseksi. Toiset materiaalivalmistajat ilmoittavat edellä mainitun lämmönjohtavuuden lisäksi arvon, jossa on otettu huomioon eristeiden vanheneminen ja kylmäsiltovaikutus. Tällöin on kuitenkin viisasta selvittää kyseisen arvon määrittämisen perusteet, kuten tuotteelle arvioitu käyttöikä, jolla on merkittävä vaikutus eristeiden todelliseen lämmönjohtavuuteen.

### 3.2.5 Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo

VIP-eristeiden lämmönjohtavuuden suunnitteluarvon määrittämiselle ei ole olemassa suomalaista tai eurooppalaista standardia. Seuraavassa esitetään yhteenveto saksalaisten ja sveitsiläisten tavoista määrittää VIP-eristeiden lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo.

Saksassa VIP-eristeiden lämmönjohtavuuden suunnitteluarvona voidaan käyttää Saksan rakennustekniikan instituutin (DIBt) hyväksynnän saanutta arvoa, joka sisältää eristeiden kuoren kylmäsiltovaikutuksen, ikääntymisen ja varmuustekijän. Viimeksi mainitun suuruus riippuu käytetäänkö eristeiden valmistuksessa jatkuvaa kolmannen osapuolen suorittamaa tarkkailua vai ei. Jos tarkkailua käytetään, varmuustekijät kasvattavat eristeiden lämmönjohtavuutta 5 prosenttia. Mikäli tarkkailua ei käytetä, lämmönjohtavuuden kasvu on 20 prosenttia. Näin ollen materiaalivalmistajat ovat hakeneet omille rakentamisessa sovellettaville tuotteilleen DIBt:in hyväksynnän sertifikaatin. Materiaalivalmistajien eristeilleen hakemista sertifikaateista ei selvinnyt tavoiteltavan käyttöiän pituutta, jota eristeiden ikääntymisen huomioon ottamisessa oli käytetty. Yleisesti ottaen silikasta

valmistettujen VIP-eristeiden lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoksi oli sertifioinnissa saatu 0,008 W/(mK), jota voidaan käyttää lämmöneristyksen suunnittelussa Saksassa. (IEA Annex 39 2005a)

Sveitsiläisen suunnitteluohjeen mukaan VIP-eristeen keskiosan lämmönjohtavuutena  $\lambda_{\text{core}}$  (vanheneminen huomioitu) silikasta (SiO<sub>2</sub>) valmistetuille tuotteille voidaan käyttää seuraavia arvoja:

- $\lambda_{\text{core}} = 0,008$  W/(mK), polymeeripohjainen kuorimateriaali
- $\lambda_{\text{core}} = 0,006$  W/(mK), alumiinifolio kuorimateriaalina

Lopullinen lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo  $\lambda_{\text{equivalent}}$  määritetään kaavalla 3.5. Sitä voidaan käyttää kun tarkastellaan suuria, yhdellä VIP-eristekerroksella eristettyjä aloja (muun muassa lattiat), joissa on merkityksettömästi eristekerroksen läpäiseviä rakenteellisia kylmäsiltoja:

$$\lambda_{\text{equivalent}} = \lambda_{\text{core}} + \Psi_{\text{edge}} \cdot d \cdot \frac{p}{A} \quad (3.5)$$

missä

$\Psi_{\text{edge}}$	on	lisäkonduktanssi (eristeen reunan ja umpiosan välinen vuorovaikutus) (W/(mK))
d	on	eristeen paksuus (m)
p	on	eristeen piirin pituus (m)
A	on	eristeen pinta-ala (m <sup>2</sup> )

Sveitsiläisten ohjeiden mukaan ovien, seinäelementtien ja muiden rakennuksen vaipan rakenneosien lämmönvastusarvon ja U-arvon määrittämistä varten tulee tehdä mittauksia tai ainakin kaksikulotteisia lämmönsiirtymislaskelmia, jotka ottavat huomioon niissä olevien kylmäsiltojen kuten esimerkiksi rankojen vaikutuksen.

Suomalaisten rakentamismääräysten mukaan rakennuksen ulkovaipan läpäisevien yksittäisten läpivientien vaikutusta ei tarvitse erikseen ottaa huomioon U-arvoissa ja energialaskelmissa. Säännöllisesti esiintyvät kylmäsiltoja, kuten mekaaniset kiinnikkeet sekä tuki- ja runkorakenteet tulee kuitenkin ottaa huomioon. (RakMK C4 2003) Näin ollen VIP-eristeen osalta U-arvo laskelmissa tulee ottaa huomioon mahdolliset mekaaniset kiinnikkeet, mikäli niitä käytetään VIP-eristeen kiinnitykseen liimauksen sijaan.

VIP-eristeiden lämmönjohtavuuden laskenta-arvot ovat tällä hetkellä vielä tulkinnanvaraisia, sillä eristeiden käytöstä ei ole vielä pitkäaikaisia käyttökokemuksia. Eristeiden vanhenemisen huomioon ottaminen lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoissa perustuu

pelkästään laskennallisiin tarkasteluihin ja laboratoriomittauksiin. Näin ollen VIP-eristeiden lämmönjohtavuuksien laskenta-arvojen määrittämiseen tarkoitettut yhtenäiset eurooppalaiset standardit olisivat tarpeen ristiriitojen välttämiseksi.

### **3.2.6 Kaupalliset tuotteet**

Tässä kappaleessa esitellään lyhyesti rakentamiseen soveltuvien VIP-eristeiden valmistajat ja heidän tuotteitaan. Vaikka tuotteesta sanotaan, että se soveltuu rakentamiseen, ei se tarkoita, että sitä voitaisiin käyttää kaikissa rakenteissa ja olosuhteissa. Tuotteiden käyttöä tulee tarkastella tapauskohtaisesti, ottaen huomioon niiden sijoitus rakenteessa, ympäröivät rakenteet ja ilmasto-olosuhteet. Etenkin eritekerroksen kohdalla vallitsevia kosteusolosuhteita tulee tarkastella huolella, sillä VIP-eristeiden käyttöikä on riippuvainen sen sisäisestä ja näin ollen myös ulkoisesta kosteuspitoisuudesta. Materiaalien soveltuvuudesta kuhunkin rakenteeseen, tulee keskustella materiaalivalmistajien kanssa.

Kaikki seuraavassa esiteltävät VIP-eristeet ovat saksalaisten yritysten valmistamia, eikä niitä valmisteta Suomessa. Suomalainen yritys nimeltä Vicover tekee kuitenkin tuotekehitystä VIP-eristeiden valmistajien (va-Q-tec ja Porextherm) kanssa ja markkinoi heidän tuotteitaan. Vicover tarjoaa myös muita VIP-eristeisiin liittyviä palveluja, kuten asennusta ja eristeiden mittauksia.

### 3.2.6.1 va-Q-tec

Va-Q-tec on saksalainen yritys, joka valmistaa ja kehittää VIP-eristeitä. Yrityksellä on laaja valikoima VIP-eristeitä, joissa on käytetty erilaisia runkoaineita sekä kuoriratkaisuja. Muutamaa tuotteista (va-Q-vip B ja va-Q-plus B) on kehitetty erityisesti rakentamiseen soveltuvaksi parantamalla niiden mekaanista kestävyyttä sekä palo-ominaisuuksia käyttämällä erillistä kuorirakennetta. Yrityksen valmistamat tuotteet ovat pääsääntöisesti suorakaiteen muotoisia, mutta va-Q-plus eristeitä on tarvittaessa saatavissa myös muun muotoisina ja läpivientivarauksin.

Va-Q-tecin valmistamien tuotteiden saumaus on tehty erikoismenetelmin, jolloin levyjen reunat on saatu suorakulmaiseksi myös saumojen kohdalta. Näin ollen niiden asentaminen tiiviisti toisiinsa kiinni on helpompaa kuin tuotteilla, joilla saumat ovat ulkonevat. Poikkeuksena suorakulmisiin saumoihin on tuote nimeltä va-Q-plus B, johon on valmistettu puoliponttisaumat.

Kaikki va-Q-tecin valmistamat VIP-eristeet sisältävät paineen mittaukseen tarkoitetun sensorin, joka sijaitsee eristepaneelin nurkassa. Sensorista voidaan mitata eristeen sisäinen paine viidessä sekunnissa erillisellä laitteella. Sensorimittaukset parantavat eristeiden laadunvalvontaa ja mahdollistavat mittaukset myös eristeiden asennusvaiheessa.

#### va-Q-vip

Va-Q-vip (kuva 3.7) on tyhjiöeriste, jonka runkomateriaali on suurimmaksi osaksi (80 %) silikaa ( $\text{SiO}_2$ ). Runkomateriaaliin on lisätty infrapunasäteilyä aiheuttavaa lämmön siirtymistä rajoittavia hiilipitoisia partikkeleita sekä orgaanisia kuituja. Va-Q-vip eristeen kuori koostuu monikerroksisesta muovi- ja alumiinikerroksista koostuvasta kalvosta, jonka kokonaispaksuus on noin 100  $\mu\text{m}$ .

Va-Q-vip soveltuu käytettäväksi kohteissa, joissa eristeeltä vaaditaan suurta lämmönvastusta ja pientä tilantarvetta. Sitä voidaan käyttää muun muassa rakennuksen vaipan lämmöneristämiseen seinissä, lattioissa sekä yläpohjassa.



**Kuva 3.7** Va-Q-vip on va-Q-tecin valmistama VIP-eriste, joka soveltuu käytettäväksi rakennussovellutuksissa (va-Q-tec).

Eristeen runkoaine on palamatonta materiaalia ja sen paloluokka on saksalaisen standardin (DIN 4102-1 1998) mukaan A2. Ainoastaan eristeen kuorimateriaali on helposti syttyvä (paloluokka B3). Eristeen kuoren muoviyhdisteet sulavat jo kohtalaisen alhaisissa lämpötiloissa, eikä niistä aiheudu merkittävää palokuormaa. Eristeen sammuttamiseen käytettäville menetelmille ei ole asetettu erityisvaatimuksia, joten se voidaan sammuttaa tavanomaisesti vedellä.

Nykyisten tietämyksen mukaan va-Q-vip -eristeet eivät ole käyttäjälle ja ympäristölle haitallisia. Siitä huolimatta niitä ei tulisi avata kuorestaan ja eristeiden runkoaineen iho- ja silmäkontaktia tulisi välttää. Va-Q-vip -eristeet voidaan käsitellä ja hävittää tavanomaisen talousjätteen tavoin, ottaen huomioon paikalliset jätehuoltomääräykset.

Taulukkoon 3.5 on koottu va-Q-vip -eristeen tyypillisimmät ominaisuudet.

**Taulukko 3.5** Va-Q-vip -eristeen ominaisuudet (va-Q-tec).

<b>Lämmönjohtavuus (ei sis. vanhentumista ja kylmäsiltoja)</b>	< 0,005 W/(mK)
<b>U-arvo (20 mm paksu levy, ei sis. pintavastuksia)</b>	0,25 W/(m <sup>2</sup> K)
<b>Tiheys</b>	180...210 kg/m <sup>3</sup>
<b>Käyttölämpötila-alue</b>	-70...+80 °C
<b>Käyttökosteussuositus</b>	0...60 % RH
<b>Eristeen sisäinen paine (tavaratoimituksessa)</b>	< 5 mbar
<b>Eristeen sisäisen paineen kasvu</b>	n. 1 mbar/vuosi
<b>Maksimi koko (pituus x leveys)</b>	1200 mm x 1000 mm
<b>Minimi koko (pituus x leveys)</b>	400 mm x 300 mm
<b>Paksuus</b>	10...40 mm
<b>Lyhytaikainen puristuslujuus</b>	n. 150 kPa
<b>Käyttöikä</b>	30...50 vuotta
<b>Hinta (levylle: 1000x600x20)</b>	91 €/m <sup>2</sup>

**va-Q-vip B**

Va-Q-vip B (kuva 3.8) on tyhjiöeriste, joka on kehitetty pelkästään rakennussovellutuksiin. Se on VTT:n rakentamiseen sertifioima tyhjiöeriste (Sertifikaatti: VTT-C-4937-10). Suomen lisäksi se on sertifioitu rakentamiseen myös Saksassa, jonka on hyväksynyt Saksan rakennustekniikan instituutti (DIBt). Va-Q-vip B on koostumukseltaan hyvin samankaltainen kuin edellä esitelty va-Q-vip -eriste, mutta siihen on tehty normaalin kaasutiiviin kuorikalvon päälle erillinen pintakerros mustasta lasikuitutekstiilistä. Tällä pintakerroksella tuotteelle on saatu parempi mekaaninen ja kemiallinen kestävyys, eli yhteensopivuus asennusalueen materiaalien kanssa. Lisäksi lasikuitutekstiili parantaa tuotteen palo-ominaisuuksia. Va-Q-vip B -eristelevyn paloluokka on saksalaisen standardin (DIN 4102-1 1998) mukaan B2 (vastaa luokkaa E standardissa EN 13501-1 2007) eli ”normaali syttymisherkyys”. Eristeen runkoaine on va-Q-vip eristeen tavoin palamatonta materiaalia. Va-Q-vip B -eristeiden käyttöturvallisuuteen, sammuttamiseen ja hävittämiseen liittyvät ohjeet ovat vastaavat kuin va-Q-vip -eristeellä.

Va-Q-vip B -eristeet soveltuvat käytettäväksi tyypillisten rakennuseristeiden tapaan seinissä, lattioissa ja yläpohjissa. Lasikuitutekstiilillä päällystetty eristelevy soveltuu myös rappausalustaksi. Eristeen ominaisuudet on esitetty taulukossa 3.6. Sille ilmoitetaan vanhentumisen ja eristeen reunojen kylmäsilat huomioon ottava lämmönjohtavuusarvo, jota voidaan käyttää suunnitteluarvona. Sen määrittämisessä käytettyä tavoitekäyttöikää ei ole ilmoitettu, sillä se riippuu hyvin paljon eristeen sijainnista ja olosuhteista rakenteessa. Eristeen käytön suunnittelussa ja käyttöään arvioinnissa tulee olla yhteydessä materiaalivalmistajaan. Va-Q-vip B eristeen standardikoko on 1000 mm x 600 mm ja paksuus 20 mm.

**Kuva 3.8**

Va-Q-vip B on erityisesti rakennussovelluksiin kehitetty VIP-eriste (va-Q-tec).

**Taulukko 3.6** Va-Q-vip B -eristeen ominaisuudet (va-Q-tec).

<b>Lämmönjohtavuus</b>	
- valmistuksen jälkeen (paneelin keskiosa)	< 0,0053 W/(mK)
- sisältää vanhentumisen ja kylmäsillat	0,008 W/(mK)
- tyhjiön poistuttua	0,020 W/(mK)
<b>U-arvo (20 mm paksu levy, ei sis. pintavastuksia)</b>	
- valmistuksen jälkeen (paneelin keskiosa)	0,25 W/(m <sup>2</sup> K)
- sisältää vanhenemisen ja kylmäsillat	0,40 W/(m <sup>2</sup> K)
<b>Tiheys</b>	180...210 kg/m <sup>3</sup>
<b>Käyttölämpötila-alue</b>	-70...+70 °C
<b>Käyttökosteussuositus</b>	0...60 % RH
<b>Eristeen sisäinen paine (tavaratoimituksessa)</b>	< 5 mbar
<b>Eristeen sisäisen paineen kasvu</b>	n. 1 mbar/vuosi
<b>Maksimi koko (pituus x leveys)</b>	1200 mm x 1000 mm
<b>Minimi koko (pituus x leveys)</b>	400 mm x 300 mm
<b>Paksuus</b>	10...40 mm
<b>Lyhytaikainen puristuslujuus</b>	n. 150 kPa
<b>Käyttöikä</b>	Riippuu käyttösovelluksesta (jopa 60 v.)
<b>Hinta (levylle: 1000x600x20)</b>	105 €/m <sup>2</sup>

**va-Q-plus B**

Va-Q-plus B (kuva 3.9) on kehitetty yksinomaan rakennussovellutuksia varten. Se on koostumukseltaan vastaava kuin edellä esitelty va-Q-vip B, mutta sen reunat on varustettu puoliponteilla. Niiden avulla eristeet saadaan asennettua tiiviisti toisiinsa välttäen eristeiden välisiä ilmarakoja. Myös tälle eristeelle on haettu sertifiointia Saksan rakennustekniikan instituutilta (DIBt), jonka hyväksymisprosessi on vielä kesken tammikuussa 2010.

Va-Q-plus B soveltuu niin ikään käytettäväksi tavanomaisissa rakennussovellutuksissa. Eristeitä on tilattava vähintään 50 eristelevyn sarjoissa, mikä osaltaan vaikeuttaa niiden käyttöä tarkkoja moduulimittoja noudattamattomissa kohteissa. Taulukkoon 3.7 on koottu va-Q-plus B -eristeen ominaisuudet.



**Kuva 3.9** Rakennussovellutuksiin kehitetty va-Q-plus B -eriste. Oikeanpuoleisessa kuvassa lähikuva eristeen ponttisaumasta. (va-Q-tec)

**Taulukko 3.7** Va-Q-plus B -eristeen ominaisuudet (va-Q-tec).

<b>Lämmönjohtavuus (ei sis. vanhentumista)</b>	0,0035 W/(mK)
<b>U-arvo (20 mm paksu levy, ei sis. pintavastuksia)</b>	0,18 W/(m <sup>2</sup> K)
<b>Tiheys</b>	170...200 kg/m <sup>3</sup>
<b>Käyttölämpötila-alue</b>	-70...+70 °C
<b>Käyttökosteussuositus</b>	0...60 % RH
<b>Eristeen sisäinen paine (tavaratoimituksessa)</b>	< 5 mbar
<b>Eristeen sisäisen paineen kasvu</b>	n. 1 mbar/vuosi
<b>Maksimi koko (pituus x leveys)</b>	1750 mm x 1000 mm
<b>Minimi koko (pituus x leveys)</b>	400 mm x 250 mm
<b>Paksuus</b>	5...20 mm
<b>Lyhytaikainen puristuslujuus</b>	n. 120 kPa
<b>Käyttöikä</b>	Riippuu käyttösovelluksesta (jopa 60 v.)



### 3.2.6.2 Porextherm

Porextherm on vuonna 1989 perustettu saksalainen yritys, joka valmistaa ja kehittää innovatiivisia lämmöneristeitä, kuten tyhjiöeristeitä. Yrityksen eristevalikoimasta löytyy useita rakentamiseen soveltuvia VIP-eristeitä. Tässä esitellään eristeistä vain ne, jotka on kehitetty ja sertifioitu rakennuskäyttöön Saksan rakennustekniikan instituutin toimesta (DIBt).

Vacupor<sup>®</sup> on Porexthermin VIP-eristeiden tuotenimi. Eristeet ovat rakenteeltaan eristeiden pintaratkaisuja lukuun ottamatta samanlaisia. Kaikkien rakentamiseen soveltuvien Vacupor-eristeiden runkoaine koostuu pääosin silikasta. Runkomateriaaliin on lisätty infrapunasäteilyä rajoittavia hiilipartikkeleita sekä orgaanisia kuituja vahvistamaan eristeiden rungon rakennetta. Näiden eristeiden runkoaine on palamatonta materiaalia ja sen paloluokka eurooppalaisen standardin (EN 13501-1 2007) mukaan on A1. Vacupor-eristeiden kuorirakenne koostuu metallipinnoitetusta muovikalvoista, mutta osassa niistä käytetään tämän lisäksi erillisiä kumista tai polystyreenistä valmistettuja pintarakenteita, jotka suojaavat eristettä mekaanisilta- ja kemiallisilta rasituksilta. Kaikki tässä esiteltävät Vacupor-eristeet täyttävät saksalaisen standardin (DIN 4102-1 1998) mukaisen paloluokan B2, joka vastaa eurooppalaisessa standardissa (EN 13501-1 2007) luokkaa E.

Eristeiden sammuttamiseen käytettäville menetelmille ei ole asetettu erityisvaatimuksia, joten ne voidaan sammuttaa tavanomaisesti vedellä tai muilla vastaavilla menetelmillä. Nykyisten tietämyksen mukaan Vacupor-eristeitä ei luokitella vaarallisiksi aineiksi. Ne eivät aiheuta myrkyllisiä päästöjä, eivätkä ole terveydelle ja ympäristölle haitallisia. Vacupor-eristeet voidaan käsitellä ja hävittää tavanomaisen talousjätteen tavoin, ottaen huomioon paikalliset jätehuoltomääräykset.

Materiaalivalmistajan Internet-sivuilta löytyy tarkat tiedot eristeiden mahdollisista käyttökohteista rakennussovelluksissa, jotka on hyväksytty tuotteiden sertifiointin yhteydessä. Lisäksi materiaalivalmistajalta on saatavissa eristeiden käyttöturvallisuustiedotteet.



**Kuva 3.10** Porexthermin valmistamat rakentamiseen sertifioidut Vacupor-eristeet. Vasemmalla: Vacupor NT-B2. Keskellä: kumilla pinnoitettu Vacupor RP-B2. Oikealla: polystyreenillä pinnoitettu Vacupor PS-B2. (Porextherm)

Vacupor NT-B2 on kuvan 3.10 (vasemmalla) mukainen VIP-eriste, jonka kuorirakenne koostuu metallipinnoitetuista muovikalvoista. Eriste on sertifioitu käytettäväksi tavanomaisissa rakennussovellutuksissa, kuten ulkoseinissä sekä ylä- ja alapohjissa. Lisäksi se soveltuu julkisivuelementtien lämmöneristeeksi.

Vacupor RP-B2 on kuvan 3.10 (keskellä) mukainen molemmin tai toispuoleisella rakeisella kumigranulaattimatolla päällystetty VIP-eriste. Kumikerros suojaa VIP-eristeen herkkää kuorirakennetta eristeiden kuljetuksessa, asennuksessa ja käytön aikana. Kumikerroksen ansiosta asennettavien eristelevyjen päällä voidaan kävellä ilman, että levyt vaurioituvat. Vacupor RP-B2 eristeet soveltuvat käytettäväksi erityisesti vaakatasoon tehtävissä eristyksissä, kuten ylä- ja alapohjissa. Lisäksi niitä voidaan käyttää tyypillisissä ulkoseinäratkaisuissa ja elementtirakenteissa.

Vacupor PS-B2 (oikeanpuoleinen, kuva 3.10) on molemmin tai toispuoleisella polystyreenikerroksella päällystetty VIP-eriste. Polystyreenikerroksen paksuudeksi voidaan valita joko 10 tai 20 millimetriä. Eristeen paksuus ilmoitetaan materiaalivalmistajan taulukoissa ilman polystyreenikerrosta. Polystyreenikerros suojaa VIP-eristeen herkkää kuorirakennetta eristeiden kuljetuksessa, asennuksessa ja käytön aikana. Lisäksi se helpottaa eristeiden kiinnittämistä rakenteisiin, sillä sen kiinnittämiseen voidaan käyttää kaupallisia polystyreenin kiinnittämiseen tarkoitettuja sideaineita, esimerkiksi uretaaniliimoja ja PU-vaahtoa. Vacupor PS-B2 soveltuu käytettäväksi vastaavissa sovelluksissa, kuin tavanomaiset EPS-eristeet, pois lukien maanvastaiset rakenteet. Niitä voidaan käyttää erityisesti erilaisissa seinä- ja lattiaeristyksissä, mutta sitä voidaan käyttää myös yläpohjan eristämisessä ja elementtirakenteissa.

Vacupor-eristeiden ominaisuudet on esitetty taulukossa 3.8. Taulukossa esitettyä vanhentumisen ja kylmäsillat huomioon ottava lämmönjohtavuusarvoa ( $0,008 \text{ W/(mK)}$ ) voidaan käyttää suunnitteluarvona Saksan rakennustekniikan instituutin (DIBt) hyväksymän sertifikaatin mukaan. Taulukossa esitetyt lämmönjohtavuudet kuvaavat itse tyhjiöeristeen lämmönjohtavuuksia, joten kumikerroksella (Vacupor RP-B2) tai polystyreenillä (Vacupor PS-B2) varustetuille eristeille tulee pintakerroksille käyttää kyseisten materiaalien lämmönjohtavuuksia.

**Taulukko 3.8** Porexthermin valmistamien Vacupor-eristeiden ominaisuudet (Porextherm).

	<b>Vacupor NT-B2</b>	<b>Vacupor RP-B2</b>	<b>Vacupor PS-B2</b>
<b>Lämmönjohtavuus</b>			
- valmistuksen jälkeen (paneelin keskiosa)	≤ 0,005 W/(mK)	≤ 0,005 W/(mK)	≤ 0,005 W/(mK)
- sisältää vanhentumisen ja kylmäsilat <sup>(a)</sup>	0,008 W/(mK)	0,008 W/(mK)	0,008 W/(mK)
- tyhjiön poistuttua	≤ 0,019 W/(mK)	≤ 0,019 W/(mK)	≤ 0,019 W/(mK)
<b>Tiheys</b>	170...210 kg/m <sup>3</sup>	150...300 kg/m <sup>3</sup>	150...300 kg/m <sup>3</sup>
<b>Käyttölämpötila-alue</b>	-50...+120 °C	-50...+120 °C	-50...+120 °C
<b>Eristeen sisäinen paine<sup>(b)</sup></b>	< 5 mbar	< 5 mbar	< 5 mbar
<b>Eristeen sisäisen paineen kasvu</b>	n. 1 mbar/vuosi	n. 0,5 mbar/vuosi	n. 0,5 mbar/vuosi
<b>Maksimi koko (pituus x leveys)</b>	2,2 m x 1,0 m	2,2 m x 1,0 m	2,2 m x 1,0 m
<b>Minimi koko (pituus x leveys)</b>	150 mm x 150 mm	150 mm x 150 mm	150 mm x 150 mm
<b>Paksuus</b>	10...50 mm	10...50 mm	10...50 mm
<b>Lyhytaikainen puristuslujuus</b>	n. 180 kPa	n. 180 kPa	n. 180 kPa
<b>Käyttöikä</b>	riippuu olosuhteista	riippuu olosuhteista	riippuu olosuhteista

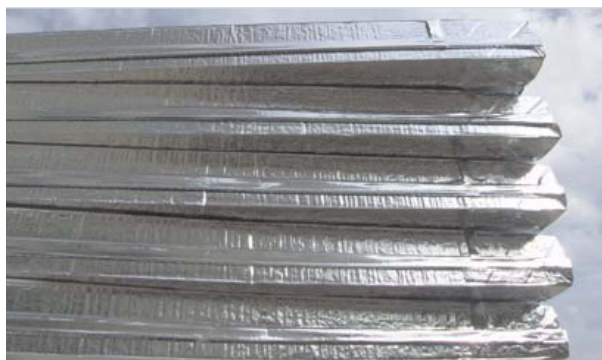
(a) Saksan rakennustekniikan instituutin hyväksymä arvo, jota voidaan käyttää suunnittelussa

(b) Tavaratoimituksessa

### 3.2.6.3 Variotec GmbH

Variotec on saksalainen yritys, joka kehittää innovatiivisia ja energiatehokkaita sovelluksia muun muassa julkisivun rakenteista, sandwich-elementeistä, kattorakenteista, ikkunoista ja ovista, joissa sovelletaan tyhjiöeristeitä. Yrityksen tuotteet eroavat edellä esitellyistä va-Q-tecin ja Porexthermin tuotteista, sillä yritykseltä on saatavissa pelkkien tyhjiöeristelevyjen lisäksi kasettimaisia eriste-paneeleja erilaisilla pintamateriaaleilla. Lisäksi Variotec tekee laajamittaista yhteistyötä muiden rakennusalan yritysten kanssa ja Variotecin Internet-sivuilla esitellään tyyppirakenteita, joissa sovelletaan VIP-eristeitä.

Taulukossa 3.9 on esitetty Variotecin rakennussovellutuksissa käyttämän VIP-eristeen ominaisuudet (kuva 3.11). Eristelevyjen runkomateriaalina käytetään silikaa (fumed) ja kuorimateriaalina metallisista sekä muovisista kalvoista koostuvaa kerroksellista rakennetta, samoin kuin muiden materiaalivalmistajien tuotteissa. Variotecin eristeiden runkoaine on palamatonta materiaalia ja sen paloluokka eurooppalaisen standardin (EN 13501-1 2007) mukaan on A1. Eristelevyt täyttävät saksalaisen standardin (DIN 4102-1 1998) mukaisen paloluokan B1.



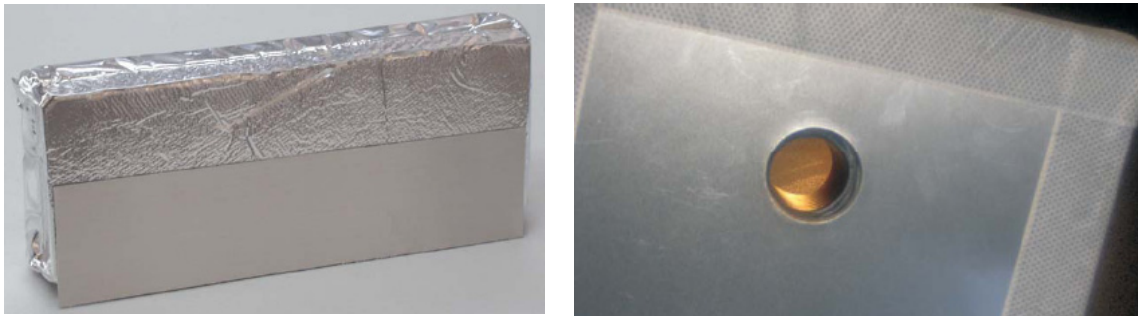
**Kuva 3.11** Variotecin valmistama VIP-eriste (Variotec GmbH).

**Taulukko 3.9** Variotecin valmistaman VIP-eristeen ominaisuudet (Variotec GmbH).

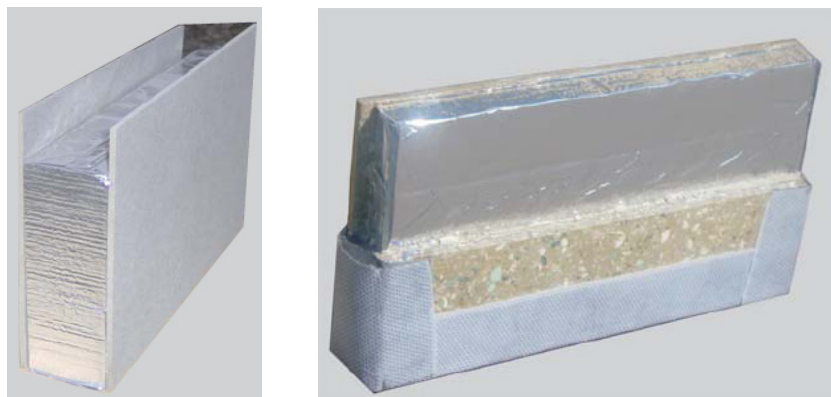
<b>Lämmönjohtavuus</b>	
- valmistuksen jälkeen (paneelin keskiosa)	0,004 W/(mK)
- sisältää vanhentumisen ja kylmäsilat	0,008 W/(mK)
- tyhjiön poistuttua	0,019 W/(mK)
<b>Tiheys</b>	150...170 kg/m <sup>3</sup>
<b>Eristeen sisäinen paine (tavaroitoituksessa)</b>	< 5 mbar
<b>Maksimi koko (pituus x leveys)</b>	3000 mm x 1250 mm
<b>Paksuus</b>	10...50 mm
<b>Lyhytaikainen puristuslujuus</b>	n. 100 kPa

Kuvan 3.11 mukaista eristettä voidaan käyttää kuvien 3.12 ja 3.13 mukaisissa sovelluksissa. Tavanomaista VIP-eristettä suojaavalla kuorimateriaaleilla voidaan suojata eristepaneelia mekaanisilta rasituksilta ja vaikuttaa mm. VIP-eristeiden kuorikalvojen ja alkalisen betonin välisiin yhteensopivuusongelmiin. Erityinen hyöty erillisen kuorikerroksen käytöstä saadaan eristeiden asennusvaiheessa, jolloin niiden ohuet kuorikalvot ovat alttiina rikkoutumiselle. Eristettä suojaavan kuorikerroksen ollessa diffuusiotiivis, hidastaa sen käyttö myös VIP-eristeen vanhenemista. Paneelien reunat suljetaan yleensä joustavalla diffuusiotiiviillä teipillä.

Kuvan 3.12 mukaisissa elementeissä VIP-paneeli on suljettu 0,3 mm paksujen alumiini-levyjen sisään. Elementit soveltuvat rakenteisiin, joissa pelkkä VIP-eristelevy ei kestä vallitsevaa kuormitusta tai ympäröiviä materiaaleja kemiallisesti (esim. betoni). Kuvassa 3.13 on esitetty sandwich-rakenteita, joita voidaan valmistaa erilaisista VIP-eristeistä suojaavista kuorimateriaaleista. Vasemmanpuoleisessa kuvassa VIP-eristettä suojaavana kerroksena ovat MDF-levyt. Oikeanpuoleisessa sandwich-rakenteessa VIP-eriste on suojattu molemmin puolin 4 mm paksulla kierrätetystä polyuretaanista valmistetulla levyllä, jonka tiheys on  $500 \text{ kg/m}^2$ . Sandwich-rakenteiden ensisijaiset käyttökohteet ovat seinän ja katon rakenteet sekä esivalmistetut elementit.



**Kuva 3.12** Ohuella alumiinilevyillä suojattuja VIP-elementtejä. Oikeanpuoleisessa elementissä läpivientivaraus. (Variotec GmbH)



**Kuva 3.13** Variotecin valmistamia sandwich-rakenteita. Vasemmalla kuorimateriaalina MDF-levyt ja oikealla kierrätetystä polyuretaanista valmistetut levyt. (Variotec GmbH)

### 3.2.7 Käyttösovellukset ja asentaminen

Tässä kappaleessa käsitellään VIP-eristeiden käyttösovelluksia ja asentamiseen liittyviä yksityiskohtia yleisesti. On huomattava, että tuotteiden välisissä käyttösovellussuosituksissa ja käyttöohjeissa voi olla eroavaisuuksia, joten seuraavassa esitettäviä asioita ei voida pitää absoluuttisena kaikkien tuotteiden osalta. Esimerkiksi eristettä ympäröivien kosteuspitoussuositusten osalta eri eristevalmistajien ja tuotteiden välillä voi olla eroavaisuuksia. Näin ollen eristeiden soveltuvuus kuhunkin käyttökohteeseen ja sovellukseen tulee tarkastaa tapauskohtaisesti materiaalivalmistajalta. Käyttösovelluksiin ja asentamiseen liittyvä informaatio on referoitu pääosin materiaalivalmistajien Internet-sivuilta (Porextherm; va-Q-tec; Variotec GmbH; Vicover).

VIP-eristeet eroavat tavanomaisista lämmöneristeistä lämmöneristävyysominaisuuksien lisäksi kestävyydeltään sekä asentamisen ja työstämisen kannalta. Näiden ominaisuuksien eroavaisuudet ovat suurimpana haasteena VIP-eristeiden soveltamiselle tavanomaisessa rakentamisessa.

Tyhjiöeristeiden korkeiden kustannusten vuoksi niiden käyttö on suositeltavaa kohteissa, joissa niiden käytöstä saatavat muut hyödyt ovat merkittävämpiä kuin materiaalikustannukset. Tällaisena hyötynä voidaan pitää ulkoseinän rakennepaksuuden ohenemista. Sen ansiosta rakennuksen lattiapinta-ala kasvaa, jonka myötä rakennuksen myytävä tai vuokrattava pinta-ala on suurempi. Toinen potentiaalinen sovelluskohde ovat rakenteet, joissa paksujen eristekerrosten vuoksi joudutaan toteuttamaan optimaalisia rakenteita järeämpiä rakenneratkaisuja pelkästään eristekerroksen paksuuden kasvamisen vuoksi. Kolmas mahdollinen sovelluskohde on korjausrakentaminen, jolloin paksujen eristekerrosten lisääminen voi olla mahdotonta tilanpuutteen vuoksi.

VIP-eristeitä on käytetty laajamittaisesti sekä uudis- että korjausrakentamisessa lähinnä Keski-Euroopassa. Niitä on käytetty pientaloissa sekä suuremman kokoluokan kauppa- ja toimistorakennuksissa. VIP-eristeitä voidaan käyttää vastaavissa rakenteissa koko rakennuksen vaipassa kuin tavanomaisia lämmöneristeitä, kunhan niiden asettamat erityisvaatimukset otetaan huomioon. Useissa sovellutuksissa VIP-eristeitä käytetään tavanomaisten lämmöneristeiden yhteydessä, joissa tavanomainen lämmöneriste suojaa VIP-eristeen heikkoa kuorikalvoa tai toimii esimerkiksi rappausalustana. VIP-eristeitä on käytetty eri materiaaleista valmistetuissa seinä- ja kattoelementeissä. Lisäksi niitä on käytetty työmaalla tehtävässä paikallarakentamisessa.

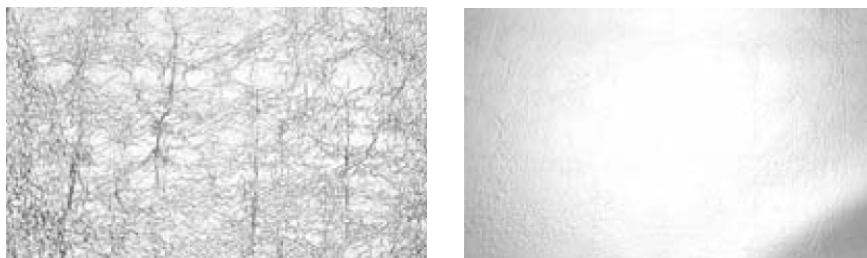
VIP-eristeiden soveltaminen Suomen rakentamisessa on vielä alkuvaiheessa, mutta ensimmäinen ullakon korjaushanke on toteutettu kyseisillä eristeillä Espoossa (Oinonen 2010). Suomessa VIP-eristeiden käytön yleistyminen vaatii Suomen rakentamiseen soveltuvien suunnittelu- ja asennusohjeiden käyttöönottoa. Tässäkin mielessä ollaan me-

nossa eteenpäin, sillä VIP-eristeiden käytöstä ollaan parhaillaan laatimassa RT-korttia (Oinonen 2010).

VIP-eristeiden lämmöneristävyys perustuessa suurelta osin eristeen sisäiseen tyhjiöön, tulee eristeen kuorimateriaali pysyä vahingoittumattomana. VIP-eristeen käyttöä voidaan pitää päättyneenä, mikäli eristeen sisäinen paine kasvaa mekaanisen tai kemiallisen rasituksen seurauksena ympäröivän ilman painetta vastaavaan arvoon. Tämän vuoksi niitä ei voida työstää sahaamalla vastaavasti kuin tavanomaisia lämmöneristeitä, eikä niitä voida kiinnittää läpi poraamalla tai naulaamalla. Tietyissä rakenteissa VIP-eristeiden käyttö voi rajoittaa rakenteisiin jälkikäteen tehtäviä kiinnityksiä ja nau-lauksia. Siksi myös rakennuksen käyttäjien tulee olla tietoisia VIP-eristeiden toiminnas-ta ja niiden toiminnan ylläpitämisestä. VIP-eristeiden heikkoutena voidaan pitää niiden mekaanista kestävyyttä ja joidenkin materiaalien yhteydessä myös kemiallista kestä-vyyttä. VIP-eristettä tuleekin käsitellä suurella huolellisuudella valmistusvaiheesta aina sen käyttöänsä päättämiseen saakka.

Eristeitä varastoitaessa tulisi välttää korkeita lämpötiloja ja suhteellisia kosteuksia. Tilo-ja, joiden lämpötila on pysyvästi yli 50 °C ja suhteellinen kosteus yli 60 % RH:n, ei tu-lisi käyttää VIP-eristeiden varastona. Lisäksi eristeet tulee suojata likaantumislta, sa-teelta ja pitkäaikaiselta suoralta auringonsäteilyltä. Levyjen lyhytaikaistakin varastointia likaisilla lattioilla tai muissa vastaavissa paikoissa tulee välttää.

Ennen VIP-eristeiden asennusta tulee niiden kuorimateriaalin eheys tarkistaa vähintään visuaalisesti ja rikkoutuneet levyt poistaa käytöstä. Va-Q-tecin eristeet sisältävät senso-rin, josta eristeen sisäinen paine voidaan mitata viidessä sekunnissa (va-Q-tec). Senso-rista mitattavan paineen tulisi olla enintään 5 mbar asennusvaiheessa. Visuaalisella tar-kastuksella havaitaan vain suuret eristeen sisäisen paineen nousut, jotka ovat usein seurausta eristeen kuoren hajoamisesta mekaanisessa rasituksessa. Sensorimittaukset soveltuvat mikäli halutaan tehdä tarkempia, esimerkiksi valmistusvirheistä tai eristeiden vanhentumisesta aiheutuvaa paineen kasvun mittauksia. Kuva 3.14 havainnollistaa eh-jän (vasemmalla) ja vioittuneen (oikealla) VIP-eristeen pintaa. Ehjä eriste on suhteelli-sen kova ja ryppyinen kuori istuu tiukasti runkoaineslevyn päälle, vastaavasti kuin esi-merkiksi ehjän kahvipaketin kuori. Vioittunut eristelevy on puolestaan pehmeämpi, kuorikalvo on hieman löystynyt ja kupruinen, eikä ryppyisyyttä ole havaittavissa.



**Kuva 3.14** Ehjän (vasemmalla) ja vioittuneen (oikealla) VIP-eristeen kuorikalvo. (Porextherm)

VIP-eristeiden asentaminen ei vaadi erikoistyökaluja ja -välineitä, mutta asennuksen huolellinen suunnittelu ja valmistajan asennusohjeiden noudattaminen on erittäin tärkeää. Asennusaikana eristeet tulee suojata pitkäaikaiselta sade-/kosteusrasitukselta.

VIP-eristeiden asennusalustana toimivan materiaalikerroksen pinta tulee olla kuiva ja tasainen, eikä se saa sisältää rosoisia kohtia (nauloja, metallisiruja, yms.), jotta eristelevyt saadaan asennettua tiiviisti ja vahingoittumatta paikalleen. Liimakiinnityksessä asennusalustan tasaisuuteen tulee kiinnittää erityishuomiota. VIP-eristeen kuorikalvo tulee suojata alakalisilta materiaaleilta, kuten betonilta. VIP-eristeen suojaamiseen betonin tai rappauksen alkalisuudelta voidaan käyttää esimerkiksi tavanomaisia lämmöneristeitä. Toinen vaihtoehto on käyttää eristelevyjä, joiden metallinen kuorikalvo on suojattu jo valmistusvaiheessa.

Eristeitä ei tulisi kuormittaa pistemäisellä kuormalla (esim. kävely eristeiden päällä) ja kuorikalvon leikkausrasitusta tulisi välttää asennuksen ja varastoinnin aikana jolloin eriste on alttiina rikkoutumiselle. Poikkeuksena ovat tuotteet, jotka ovat suojattuja mekaanisilta kuormilta jo valmistusvaiheessa, kuten kasettimaiset elementit. Eristeiden liiallista taivuttamista tulee myös välttää varastointi-, asennus- ja käyttövaiheessa.

Eristeet voidaan kiinnittää neljällä tavalla, joko liimaamalla tai mekaanisilla kiinnikkeillä sekä edellisten kombinaatiolla tai ilman erillistä kiinnitystä esimerkiksi lattialle ladottaessa. Valittava kiinnitystapa riippuu käytettävästä VIP-eristeestä, rakenteesta ja eristelevylle tulevasta kuormasta, esimerkiksi rappauksesta. Liimaukseen voidaan käyttää mm. polyuretaaniliimaa tai polyuretaanivaahtoa. Liima-aineena tulee käyttää liuotinpaita tuotteita. Mekaanisina kiinnikkeinä voidaan käyttää lasikuidusta tai pvc-muovista valmistettuja kiinnikkeitä, jotka asennetaan eristelevyjen saumakohtiin. Eristelevyt voidaan asentaa suoraan tasaiselle pinnalle puskusaumoin tai käyttää apuna puu- tai polyuretaanikoolausta. Suositellavat kiinnitystavat tulee varmistaa materiaalivalmistajalta.

Eristeiden asennuksessa tulee välttää eristelevyjen välisiä ilmarakoja, jotka voivat heikentää VIP-eristeillä eristetyn seinän toimintaa merkittävästi. Tarvittaessa mahdollisten eristeiden välisten rakojen sekä eristeen kuorikerrosten kylmäsiltojen vaikutusta voidaan rajoittaa asentamalla eristelevyjä kahtena kerroksena limittämällä saumat. Tämä voi olla vaikeaa käytettäessä mekaanisia kiinnikkeitä, sillä eristekerroksia ei voida läpäistä kiinnikkeillä. Eristeiden saumojen ja liitosten tiivistämiseen voidaan käyttää yhteensopivia tuotteita, esimerkiksi polyuretaanivaahtoa.

Eristeiden ehjyys voidaan varmistaa myös asennuksen jälkeisillä mittauksilla paineantureista, ennen kuin rakenne suljetaan. Toinen vaihtoehto on käyttää lämpökameramittauksia, mikäli eristelevyissä ei ole painemittaukseen tarkoitettuja antureita. Lämpökameramittaukset vaativat kuitenkin selkeän lämpötilaeron rakennuksen sisä- ja ulkoilman



välille, joten niitä ei voida välttämättä toteuttaa ennen rakenteiden sulkemista. Yritys nimeltä Vicover Oy toteuttaa VIP-eristeiden eristävyden mittauksia. Eristeiden toimintaa voidaan tarkkailla myös RFID-teknologian avulla, jolloin eristeiden toiminnasta saadaan jatkuvaa tarkkailutietoa.

Vaikka VIP-eristeet ovatkin oikein saumat tiivistäen asennettuna kohtalaisen vesihöyrytiiviitä, jotkut materiaalivalmistajat suosittelivat niiden yhteydessä käyttäväksi höyrynsulkua eristelevyn lämpimällä puolella. Höyrynsulku estää suhteellisen kosteuden kasvua ja mahdollista kosteuden tiivistymistä VIP-eristekerroksen pintojen lähellä. Samasta syystä rakenteen ulkopinnan puolella on suositeltavaa käyttää tavanomaista lämmöneristettä, jotta suhteellinen kosteus VIP-eristeen ulkopinnalla ei ylittäisi 60 % RH:ta. Eristettä ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden pitämällä mahdollisimman alhaisena voidaan hidastaa eristeen sisäisen kosteuspitoisuuden kasvusta aiheutuvaa ikääntymistä (ks. kappale 3.2.3). Poikkeuksena ovat kasettimaiset tuotteet, joiden kuorimateriaalit voivat olla jo itsessään riittävän vesihöyrytiiviitä.

VIP-eristeiden asentajan ja niiden kuljetuksesta sekä varastoinnista vastaavan henkilön tulee olla tietoinen niiden käsittelyn ja asentamisen eroavaisuuksista verrattuna tavanomaisiin lämmöneristeisiin. VIP-eristeiden asennuksiin erikoistuneita yrityksiä on mm. Saksassa ja Sveitsissä. VIP-eristeiden asentajiksi suositellaan tehtävään koulutettuja henkilöitä.

Tyhjiöeristeitä sisältävät rakennejärjestelmät tulee suunnitella siten, että rakenne toimii mekaanisesti oikein, vaikka VIP-eristeen sisäinen tyhjiö täyttyisikin ilmalla ja tästä johdun eristelevy pehmenisi. Tämä on otettava huomioon erityisesti, mikäli VIP-eristettä (esimerkiksi Vacupor PS-B2) käytetään rappauksen alustana.

Tyhjiöeristeiden käyttö paikallarakentamisessa asettaa suuria haasteita työtekniiselle toteutukselle, mikä voi hidastaa niiden käytön yleistymistä. VIP-eristeiden käyttö työmaalla asennettuna vaatii asennuksen tekevältä yritykseltä panostusta työmenetelmien opettelemiseen. Paikallarakentamisessa VIP-eristeiden käyttöön soveltuvat kohteet, joissa eristeet asennetaan laajoille tasaisille pinnoille.

Paikallarakentamista potentiaalisempi vaihtoehto on käyttää VIP-eristeitä esivalmistetuissa elementeissä, jolloin asennus saadaan tehtyä hallitummin sisätiloissa. Esivalmistetuissa elementeissä VIP-eristeiden käytön kannattavuuden ehtona on samanlaisten elementtien toistuvuus ja vakiokokoisten eristelevyjen mittojen soveltuvuus elementtiin. Tällöin voidaan tilata pitkiä eristesarjoja, jolloin eristeiden kustannuksia saadaan lasketua vaikka jouduttaisiin käyttämään vakiokokoisista eristeistä eroavia levyjä.

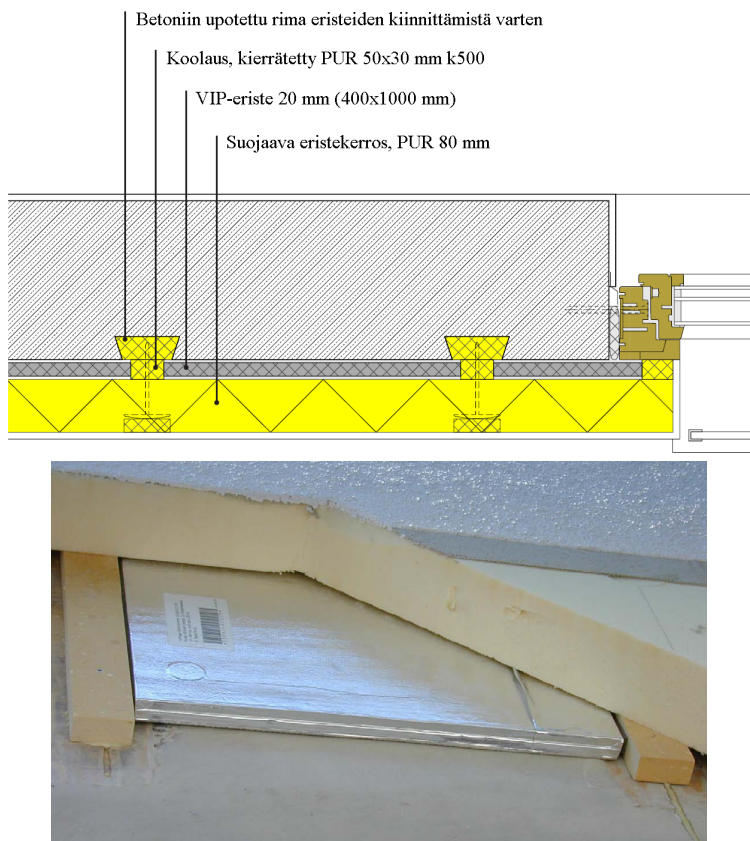
Käytettäessä VIP-eristeitä tulee rakennuksen eristyksen suunnittelusta monimutkaisempaa verrattuna tavanomaisiin eristeisiin, joita voidaan leikata haluttuun muotoon työ-

maalla ja elementtitehtailla. Tyhjiöeristeiden sijoitus rakennukseen tulee suunnitella elementtisuunnitteluna vastaavasti kuin esimerkiksi tavanomaisten seinäelementtien sijoittaminen rakennukseen. Tällöin rakennuksen suunnittelukustannukset kasvavat. VIP-eristeiden tilauksen yhteydessä tulee tietää tarkalleen rakennukseen käytettävien eristelevyjen määrät ja koot.

Suomen rakentamiseen suunniteltuja sovellusohjeita ei ole vielä julkaistu, mutta VIP-eristeiden valmistajien Internet-sivuilta (Porextherm; Variotec) löytyy kattavasti tietoa VIP-eristeiden sovellusesimerkeistä ja niihin liittyviä detaljikuvia.

Kuvassa 3.15 (ylhällä) on esitetty periaatteellinen rakenneleikkaus betoniseinästä, jonka eristämiseen on käytetty VIP-eristettä. Kyseistä seinärakennetta on käytetty Münchenissä vuonna 2005 valmistuneessa seitsemänkerroksisessa rakennuksessa. Eristeet on kiinnitetty mekaanisilla kiinnikkeiltä koolausten kohdalta. Julkisivun ulkopinta on viimeistelty VIP-eristettä suojaavan PUR-eristeen päälle tulevalla rappauksella. (Pool 2009)

Kuvan mukaista kiinnitystapaa voidaan soveltaa myös muihin seinärakenteisiin, joissa lämmöneristys tehdään tasaiselle pinnalle. Alapuoleinen kuva (3.15) on otettu rakennustyömaalla asennusvaiheesta.



**Kuva 3.15** Betonirakenteinen ulkoseinärakenne, joka on lämmöneristetty VIP- ja PUR-eristeillä. Ylhäällä rakenneleikkaus ja alhaalla kuva julkisivun valmistusvaiheesta. (Pool 2009)

### 3.2.8 Kustannukset ja niiden muodostuminen

Asentamisen lisäksi toisena VIP-eristeiden heikkoutena voidaan pitää niiden korkeaa hintaa verrattuna tavanomaisiin lämmöneristeisiin. Toisaalta VIP-eristeitä ei tulisi verrata suoranaisesti materiaalikustannuksiltaan tavanomaisiin lämmöneristeisiin, sillä niiden käyttö tulee perustua muihin käytöstä saataviin hyötyihin. Kohdassa 3.6.4 on esitetty yksinkertainen laskuesimerkki VIP-eristeen ja tavanomaisen mineraalivillan taloudellisuusvertailusta.

VIP-eristeiden kustannusten muodostumisesta tietävät parhaiten itse materiaalivalmistajat. Yritykset eivät kuitenkaan ole halukkaita kertomaan kuinka tuotteiden hinta käytännössä muodostuu. Tästä johtuen kustannuksien arviointi perustuu yleiseen tietämykseen VIP-eristeistä. Oinosen (2010) mukaan VIP-eristeiden neliöhintaa teolliselle hyödyntäjälle voidaan arvioida seuraavalla hintafunktiolla ( $\text{€/m}^2$ ):

$$\text{Hinta} \approx (25 \dots 30) + (25 \dots 30) \cdot \frac{d}{10} \quad (3.6)$$

missä

$d$  on eristeen paksuus (mm)

On huomattava, että kaava soveltuu vain hintojen karkeaan arviointiin, sillä eroja on materiaalivalmistajien ja eri tuotteiden välillä. Hinnat eivät sisällä väliportaiden kustannuksia, eli ne ovat suurempia, mikäli eristelevyt ostetaan vähittäismyyjältä. Kaavalla 3.6 eristeiden hinnoiksi saadaan seuraavat:

$d = 10 \text{ mm}$	$\Rightarrow$	$50\text{--}60 \text{ €/m}^2$
$d = 20 \text{ mm}$	$\Rightarrow$	$75\text{--}90 \text{ €/m}^2$
$d = 30 \text{ mm}$	$\Rightarrow$	$100\text{--}120 \text{ €/m}^2$
$d = 40 \text{ mm}$	$\Rightarrow$	$125\text{--}150 \text{ €/m}^2$
$d = 50 \text{ mm}$	$\Rightarrow$	$150\text{--}180 \text{ €/m}^2$

Yllä olevista hinta-arvioista nähdään, että eristelevyjen suhteellinen hinta alenee levy-paksuuden kasvaessa. Kaikkia VIP-eristeitä ei valmisteta kuitenkaan 40–50 mm:n paksuuksiin saakka, joten kyseisiin dimensioihin päästäkseen tulee käyttää kahta eristekerrosta. Vaaditun eristekerroksen toteuttaminen kahdessa kerroksessa voi olla useissa sovelluksissa kokonaisuuden kannalta tarkoituksenmukaista, vaikka materiaalikustannukset tulevat suuremmiksi kuin yhtä levykerrosta käytettäessä.

VIP-eristeiden hinta koostuu raaka-aineiden ja valmistuksen kustannuksista sekä tuotteiden myyntivoitosta. Erityisesti valmistuksen ja myyntivoiton suuruuteen vaikuttaa eristeiden markkinamäärät.

Silikapohjaisten VIP-eristeiden raaka-aineista runkomateriaali on selkeästi arvokkain ja sitä voidaan pitää merkittävimpänä VIP-eristeiden korkeaan hintaan vaikuttavana tekijänä. Runkoaineen vaikutus VIP-eristeiden hintaan nähdään vertailemalla höyrystetystä silikasta valmistettuja levyjä polyuretaanista valmistettuihin levyihin, joka itsessään on jo arvokas eristemateriaali perinteisten lämmöneristeiden luokassa. Polyuretaanista valmistetut tyhjiöeristeet ovat luokkaa 30 % halvempia kuin silikapohjaiset eristeet (Oinonen 2010). Vaihtoehtoisista runkoainesta (muun muassa polyuretaani, lasivilla) valmistettujen VIP-eristeiden käyttöikä ei ole riittävä rakennussovellutuksiin. Tämä johtuu niiden suuresta huokoskoosta, jonka vuoksi niiden lämmönjohtavuus kasvaa nopeasti pienen paineenkasvun vaikutuksesta (ks. kuva 3.3 s. 27). Mikäli höyrystetty silika tulee olemaan tulevaisuudessakin VIP-eristeiden pääasiallinen runkoaine, ei eristeiden hinnoissa ole odotettavissa merkittävää hintojen laskua. Suurin VIP-eristeiden kustannusten laskupotentiaali olisi vaihtoehtoisten huokoskooltaan höyrystettyä silikaa vastaavien runkoaineiden käyttöönotto VIP-eristeiden raaka-aineena.

Rakentamiseen kehitettyjen tyhjiöeristeiden markkinat ovat keskittyneet lähinnä Saksan ja Sveitsin alueelle, mutta myös Englannissa sekä Japanissa on ollut vähäistä käyttöä (Oinonen 2010). Vaikka tyhjiöeristemarkkinat ovat keskittyneet pienelle alueelle, on siellä useita materiaalivalmistajia ja VIP-eristeiden käyttäjiä. Eristeiden hinnat ovat vakiintuneet ja selkeää kilpailusta johtuvaa romahdusmaista laskua niissä ei ole odotettavissa, sillä rakentamiseen soveltuvien VIP-materiaalivalmistajien välillä on ollut jo pidempiaikaista kilpailua (Oinonen 2010). VIP-eristeiden käyttömäärien kasvu ja markkinoiden leviäminen Keski-Euroopan ulkopuolelle voisi laskea eristeiden markkinahintoja.

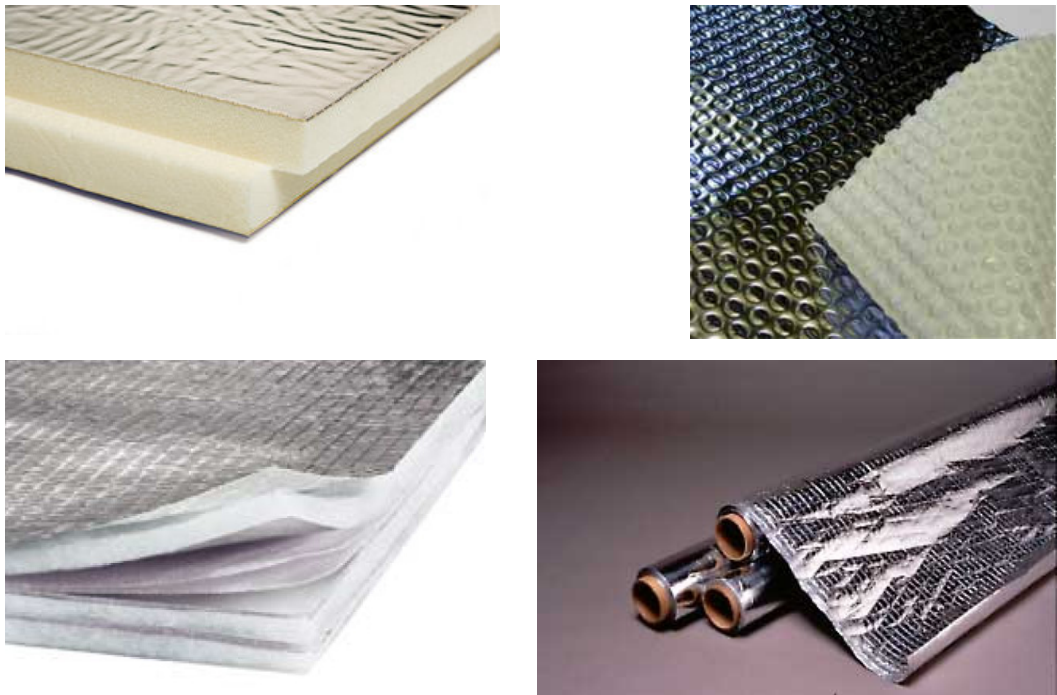
VIP-eristeiden valmistus on osittain automatisoitua, eivätkä siihen sisältyvät työvaiheet ole mitenkään erityisen kalliita toteuttaa. Eristelevyjen viimeistelyvaiheet ovat ainoat työvaiheet, jotka tehdään pääasiassa käsityönä (IEA Annex 39 2005a). Joten levyjen valmistuksen automatisoimisessa on vielä potentiaalia levyjen valmistuskustannusten laskemiseen. Automatisoinnin kehitys vaatisi osaltaan levyjen kysynnän kasvua, jolloin materiaalivalmistajien olisi tarvetta vastata kysyntään tehokkaimmilla valmistusmenetelmillä.

VIP-eristeiden valmistajien tuotevalikoimasta löytyy yleensä useita vakiokokoisia eristelevyjä. Näitä vakiokokoisia levyjä tulisi käyttää mahdollisimman paljon sillä valmistavasta riippuen muiden kokojen hinnat voivat olla huomattavasti kalliimpia.

### 3.3 Heijastavat lämmöneristeet

Heijastavat lämmöneristeet voidaan jakaa neljään ryhmään (RIMA 2002):

1. Levymäiset lämmöneristeet, joiden ulko- ja/tai sisäpinnassa on matalan emissiviteetin omaava alumiinikalvo.
2. Pinnaltaan epäsäännöllisen geometrian omaavat lämmöneristeet, jotka koostuvat ohuista (< 20 mm) ontoista ilmaonteloista sekä ulko- ja/tai sisäpinnassa olevasta matalaemissiviteettipinnasta.
3. Pinnaltaan epäsäännöllisen geometrian omaavat lämmöneristeet, jotka koostuvat eristemateriaalista sekä useista matalaemissiviteettipinnoista.
4. Ohuet kalvomaiset matalan emissiviteetin omaavat tuotteet, joilla voidaan parantaa ympäröivän ilmatilan lämmönvastusta, mutta ne itsessään eivät omaa merkittävää lämmönvastusta.



**Kuva 3.16**

Heijastavat lämmöneristeet. Ylhäällä vasemmalla alumiinipaperilla päällystetty SPU AL polyuretaanilevy (SPU Systems Oy). Ylhäällä oikealla ryhmään 2 kuuluva bubble-foil-eriste Ufoil VBF (Euroform Products Ltd). Alhaalla vasemmalla ryhmän 3 multi-foil-eriste Triso-Super 10 (ACTIS Insulation Ltd). Alhaalla oikealla ryhmän 4 alumiinikalvo Super R Plus (Innovative Insulation Inc).

Kuvassa 3.16 on esitetty erilaisia heijastavia lämmöneristeitä. Ensimmäiseen ryhmään kuuluvat lähinnä tavanomaiset levymäiset lämmöneristeet (esimerkiksi mineraalivilla, polyuretaani), joiden pinnoissa käytetään matalaemissiviteettipinnoitteita. Toisen ryhmän eristeet ovat ns. bubblefoil-eristeitä eli kuplamuovimaisen rakenteen omaavia eristeitä. Kolmanteen ryhmään kuuluvat eristeet ovat ns. multifoil-eristeitä. Neljännen ryhmän eristeet ovat ohuita alumiinikalvoja.

Tässä työssä keskitytään tarkastelemaan ryhmän 3 multifoil-eristeitä, jotka sisältävät enemmän kuin kaksi heijastavaa kerrosta. Ryhmän 2 eristeet ovat lämpötekniiseltä toimintaperiaatteeltaan vastaavia kuin multifoil-eristeet ja niiden käyttöperiaate on myös vastaava. Tämän johdosta työssä ei käsitelty tarkemmin multifoil-eristeitä ohuempia bubblefoil-eristeitä.

### 3.3.1 Multifoil-eristeet

Multifoil-eristeet ovat olleet käytössä Euroopassa rakentamiseen liittyvissä sovelluksissa jo 1980-luvulta lähtien (Frawley, E. 2009). Niiden käyttö ja valmistus keskittyy pääasiassa Englantiin ja Ranskaan. Käytöstä Suomen rakennusteollisuudessa ei ole olemassa tietoa. Multifoil-eristeiden käytöstä ja eristävyysominaisuuksista on olemassa hyvin ristiriitaista tietoa sekä materiaalivalmistajien että viranomaisten keskuudessa. Suurimmat ristiriitaisuudet liittyvät multifoil-eristeiden lämmönvastuksen/-johtavuuden määrittämiseen, johon palataan myöhemmin kohdassa 3.3.1.3. Multifoil-eristeitä on olemassa sekä vesihöyryä läpäisevinä että höyrynsulkuna toimivina tuotteina.

Perinteisten lämmöneristeiden eristävyysominaisuudet perustuvat lähinnä niiden sisältämään paikallaan pysyvään huokosilmaan tai kaasuun (Frawley 2009). Näiden eristeiden huokoskoko on kohtalaisen suuri verrattuna esimerkiksi VIP-eristeiden huokoskoon. Siksi johtuminen ja konvektio huokosilmassa/-kaasussa ovat merkittävimmät lämmönsiirtymismuodot. Säteilyn osuus eristemateriaalin läpi siirtyvästä lämmöstä riippuu materiaalin huokoskoosta. Säteilyn osuus kasvaa huokoskoon kasvaessa. Näin ollen huokoisten eristemateriaalien eristävyysominaisuuksia voidaan parantaa rajoittamalla lämmön siirtymistä säteilyn vaikutuksesta. Multifoil-eristeissä säteilyn vaikutusta on pyritty rajoittamaan eristeiden ulko- ja sisäpinnassa sekä eristeiden keskiosassa sijaitsevilla matalan emissiviteetin omaavilla kalvoilla.

Heijastavat lämmöneristeet eroavat tavanomaisista lämmöneristeistä seuraavasti (RIMA 2002):

1. Eristeiden ulkopintojen emissiviteetti on hyvin alhainen, luokkaa 0,03–0,20. (Tavanomaisilla eristeillä luokkaa 0,8–0,95)
2. Multifoil-eristeet sulkevat ilman alumiinikerrosten tai muiden heijastavien pintojen väliin. Tavanomaiset eristeet puolestaan sulkevat ilman lasikuitujen, vaahtopartikkeleiden tai muiden vastaavien väliin.
3. Multifoil-eristeillä ei ole riittävää massaa absorboidakseen ja varastoidakseen lämpöä.
4. Suhteellisen kosteuden kasvusta aiheutuvaa eristävyuden heikkenemistä ei esiinny merkittävästi niissä eristeissä, jotka on pakattu vesihöyrytiiviisti.

Multifoil-eristeet koostuvat useista matalan emissiviteetin omaavista polyeteenipinnoitetuista alumiinikalvosta, joista eristeen pinnoissa sijaitsevat kerrokset on vahvistettu verkkorakenteella kestävämpään mekaanista rasitusta. Kalvojen koostumus vaihtelee eri materiaalivalmistajien tuotteiden välillä. Kalvojen väleissä eristävänä materiaalina käytetään erilaisia vanuja sekä vaahtomassoja. Multifoil-eristeet ovat kokoonpuristuvia eristeitä, joka myös erottaa ne tavanomaisista eristeistä. 30 mm paksun multifoil-eristeen paksuus kokoon puristettuna on noin 3–5 mm eristeestä riippuen.

### 3.3.1.1 Lämpötekniinen toiminta

Multifoil-eristeiden lämpötekniinen toimintaa perustuu kaikkien lämmön siirtymismuotojen vaikutusten rajoittamiseen. Näistä merkittävimpinä voidaan pitää säteilyn ja konvektion rajoittamista jakamalla eriste useisiin, toisistaan kalvoilla erotettuihin eristeti-loihin.

Uloimpien heijastavien pintojen pääasiallisena tehtävänä on heijastaa niihin lankeava pitkäaaltonen lämpösäteily takaisin ympäristöönsä. Eristeen sisäpinnan kalvo rajoittaa rakennuksen sisäisestä lämmöstä aiheutuvan säteilyn kulkua lämmityskaudella ja ulkopinnan kalvo rajoittaa rakennuksen kesäistä ylikuumenemista ulkoisen lämpösäteilyn seurauksena. Alumiinikalvojen sanotaan heijastavan jopa 97 % lämpösäteilyä takaisin ympäristöönsä, mikä on merkittävä osa lämmön siirtymisestä (RIMA 2002). Todellisuudessa multifoil-eristeissä käytettävien kalvojen ominaisuudet eivät vastaa puhtaan, kiillotetun alumiinin ominaisuuksia, joten takaisin heijastuvan säteilyn määrä on pienempi. Eristeen sisäiset kalvokerrokset rajoittavat lämpösäteilyä vastaavasti kuin eristeen uloimmat kalvot.

Multifoil-eristeet on suunniteltu pääsääntöisesti asennettavaksi siten, että eristeiden sisä- ja ulkopuolelle jätetään vähintään 25 mm ilmarako (Frawley 2009). Niiden tarkoituksena on muuntaa rakenteissa siirtyvää lämpöä muista lämmön siirtymismuodoista läm-

pösaiteilyksi, jotta eristeiden uloimmat kalvot toimisivat heijastavina pintoina. Multifoil-eristeet voidaan asentaa myös tavallisen eristeiden tapaan kiinni muihin seinärakenteisiin. Tällöin eristeiden ulkopintojen heijastuskyvyllä ei ole vaikutusta rakenteen läpi siirtyvään lämpövirtaan. Materiaalivalmistajien ilmoittamissa multifoil-eristeiden lämmönvastuksissa on usein otettu huomioon ympäröivien tilojen aiheuttamat vastukset. Suunnittelussa on siis otettava huomioon että, asennettaessa eristettä kiinteää pintaa vasten ei päästä kyseisiin vastusarvoihin.

Eristeen pinnoissa sijaitsevat kerrokset estävät jo itsessään lämmön siirtymisen tuulen aiheuttaman pakotetun konvektion vaikutuksesta eristeen läpi. Siksi multifoil-eristeet eivät vaadi erillistä tuulensuojaa eristeen ulkopuolelle, kuten käytettäessä huokoisia eristemateriaaleja. Eristeen sisällä sijaitsevilla kalvoilla on puolestaan merkittävä vaikutus sisäisen konvektion aiheuttamaan lämmön siirtymiseen (Frawley 2009). Lähekkäin sijaitsevat kalvot rajoittavat lämpötilaeroista aiheutuvaa ilman kiertoa eristeen sisällä. Sisäisen konvektion rajoittamisen kannalta on suotuisaa, että konvektiota estävät kalvot ovat lähekkäin toisiaan, jotta ilma ei pääsisi kiertämään huokoisessa eristemateriaalissa. Multifoil-eristeiden kalvojen suuri lukumäärä on siis perusteltua säteilyn rajoittamisen lisäksi myös konvektion rajoittamiseksi.

Eristeiden runkoaine toimii lämmöneristävyyden kannalta vastaavasti kuin tavanomaiset huokoiset eristemateriaalit, eli paikallaan pysyvä huokosilma toimii eristävänä materiaalina runkoaineen materiaaliartikkelien välissä. Johtumista tapahtuu huokosilmassa ja runkomateriaalin välityksellä. Viimeksi mainitun vaikutus on kokonaisuuden kannalta vähäinen. Suuren lämmönjohtavuuden omaavat eristeen kalvokerrokset eivät kasvata eristeen lämmönvastusta, joten ne jätetään johtumistarkasteluissa ottamatta huomioon. Johtumalla tapahtuvaan lämmön siirtymiseen multifoil-eristeissä vaikuttavat merkittävästi myös eristeiden sisä- ja ulkopuolelle jätettävät ilmaraoit. Niitä käytettäessä vähenee johtumisen vaikutus lämmön siirtymiseen merkittävästi. (ACTIS)

Multifoil-eristeiden eristävyys tehokkuus riippuu siis eristeessä käytettävien kalvojen säteilyominaisuuksista eli emissiviteeteistä, kalvojen välisistä etäisyyksistä ja lukumäärästä sekä itse runkoaineen lämmönjohtavuudesta (Frawley 2009). Multifoil-eristeiden lämmöneristävyyssominaisuudet heikkenevät huomattavasti, mikäli eriste puristuu kasaan rakenteessa, sillä tällöin lämpöä eristävä ilma poistuu eristeiden huokosista. Tämä puoltaa myös eristeiden ulko- ja sisäpuolelle jätettävien ilmarakojen merkitystä.

Multifoil-eristeiden vanheneminen on seurausta heijastavien kalvojen heijastusominaisuuksien heikkenemisestä. Niiden heikkeneminen voi johtua alumiinikalvojen oksidoitumisesta tai altistumisesta suoralle auringonsäteilylle.



### 3.3.1.2 Kaupalliset tuotteet

Tässä kappaleessa esitellään lyhyesti muutama markkinoilla oleva multifoil-eriste. Eristeiden ominaisuudet ja yleiset tiedot on otettu materiaalivalmistajien Internet-sivuilta ja niitä on täydennetty materiaalivalmistajille tehdyin tiedusteluin. Erityistä huomiota on asetettava kyseisten eristeiden eristävyysominaisuuksiin, joiden ilmoittamisessa on eroja materiaalivalmistajien välillä. Näin ollen materiaalivalmistajien ilmoittamiin lämmönvastusarvoihin tulee suhtautua kriittisesti, sillä yhtenevän lämmönjohtavuusarvojen määrittämiseen tarkoitetun standardin puuttuessa niiden ilmoittamisessa on eroja. Tuotteet on usein standardoitu toimimaan tietyssä rakenteessa ja sen vuoksi eristeen lämmönvastusarvot on mitattu standardisoiduissa rakenteissa. Tällöin ne sisältävät ilmara-kojen ja kylmäsiltojen vaikutuksen.

Eristeissä tulee kiinnittää huomioita myös niiden vesihöyrynläpäisevyysarvoihin, sillä tuotteita on olemassa sekä vesihöyryä läpäisevistä että läpäisemättömistä kalvoista valmistettuina.

#### **Web Dynamics Ltd:**

Web Dynamics on englantilainen yritys, joka valmistaa multifoil-eristeitä. Yritys ei myy tuotteitaan suoraan asiakkaille, vaan tuotteita myyvät ainoastaan jälleenmyyjät. Yrityksen tuotevalikoimaan kuuluu kolme multifoil-eristettä: TLX Silver, TLX Rafterfit ja TLX Gold. Tuotteet on sertifioitu BBA:n (British board of agrément) toimesta, mutta kyseinen sertifiointi on voimassa vain Iso-Britanniassa. Kyseiset eristeet myydään pitkänä eristerullana, jonka pituus ja leveys vaihtelevat tuotteiden välillä.

TLX Silver ja TLX Rafterfit on valmistettu samoista materiaaleista, joten niiden ominaisuudet vastaavat toisiansa. Taulukossa 3.10 on esitetty TLX multifoil -eristeiden ominaisuudet. Kyseisten tuotteiden ainoana erona on, että Rafterfit-eristettä on saatavana kapeampana. Silver- ja Rafterfit-eristeet koostuvat 11 kerroksesta, joista kuusi on heijastavia kalvoja. Niiden väliset kerrokset koostuvat muovipohjaisesta lämpöä eristävästä täytemateriaalista. Eristeiden pitkät sivut on suljettu vesihöyrytiivisti. TLX Silver ja Rafterfit ovat oikein asennettuina ilma- ja vesihöyrytiivisiä. Tämä tulee ottaa huomioon niiden asennuksessa. Ne soveltuvat käytettäväksi katon ja ulkoseinien täydentävinä lämmöneristeinä. Kosteuden kondensoitumisen välttämiseksi ne tulee asentaa varsinaisen lämmöneristeen sisäpuolelle. Kattoon asennettaessa kyseisten eristeiden ulko- ja sisäpuolelle on suositeltavaa jättää ilmaraoit. Seinän eristeenä ilmarako tulee jättää aina-kin eristeen sisäpuolelle. Multifoil-eristeet ovat kokoonpuristuvia, joten niiden asennuksessa joudutaan käyttämään koolauksia, jottei eriste puristuisi kasaan.

TLX Gold on vesihöyryä läpäisevä multifoil-eriste. Suuren vesihöyrynläpäisevyyden ansiosta kyseistä eristettä voidaan käyttää vapaammin rakenteissa, eli se voidaan sijoittaa myös varsinaisen lämmöneristeen kylmälle puolelle. TLX Gold rakenne koostuu

seitsemästä kerroksesta. Eristeen ulkopintojen kalvojen lisäksi eristeen sisällä on kaksi heijastavaa kalvoa. Kalvojen välit on täytetty lämpöä eristävällä vanumaisella runkomaateriaalilla. TLX Gold -eriste toimii ilmansulkuna, mutta kuten aiemmin mainittiin, se läpäisee vesihöyryä. Sitä käytetään lähinnä kattojen lisälämmöneristeinä, tavanomaisen lämmöneristeen kylmällä puolella, jossa se toimii myös aluskatteena. TLX Gold -eristeen ja pääasiallisen lämmöneristeen väliin jätetään tuulettumaton ilmarako. Myös eristeen ulkopuolelle suositellaan jätettävän ilmarako.

**Taulukko 3.10** Web Dynamics Ltd:n valmistamien TLX multifoil -eristeiden ominaisuudet (Web Dynamics Ltd).

	TLX Silver/TLX Rafterfit	TLX Gold
<b>Leveys</b>	1200 mm <sup>(a)</sup> , 520 mm <sup>(b)</sup>	1200 mm
<b>Pituus</b>	10 m	10 m
<b>Paksuus</b>	30 mm	33 mm
<b>Paino</b>	0,7 kg/m <sup>2</sup>	0,7 kg/m <sup>2</sup>
<b>Eristeen lämmönvastus, R<sup>(c)</sup></b>	0,92 m <sup>2</sup> K/W	0,95 m <sup>2</sup> K/W
<b>Eristeen lämmönjohtavuus, λ<sup>(d)</sup></b>	0,033 W/(mK)	0,035 W/(mK)
<b>Emissiviteetti, ε</b>	0,16	0,21
<b>Lämmönvastus rakenteessa, R<sup>(e)</sup></b>	1,69 m <sup>2</sup> K/W	–
<b>Vesihöyrynläpäisevyys, δ<sub>v</sub></b>	< 2,95·10 <sup>-9</sup> m <sup>2</sup> /s	> 3,93·10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s
<b>Paloluokka (EN ISO 11925-2 2002)</b>	E	E
<b>Hinta<sup>(f)</sup></b>	n. 8,0 €/m <sup>2</sup> / n. 6,9 €/m <sup>2</sup>	n. 12,0 €/m <sup>2</sup>

(a) TLX Silverin leveys

(b) TLX Rafterfitin leveys

(c) Lämmönvastusarvo on mitattu laboratoriossa guarded hot plate –laitteella.

(d) Lämmönjohtavuus on laskettu lämmönvastuksesta olettaen eriste tasa-aineiseksi.

(e) Lämmönvastusarvo on mitattu lämmönläpäisylaitteistolla (hot box) rakenteelle, jossa eriste on asennettu kattovasojen ja vazojen suuntaisen koolauksen väliin. Se sisältää eristeen sisä- ja ulkopuolisen ilmarakojen vaikutuksen sekä kylmäsillat vazojen kohdalla.

(f) Hinnat eivät sisällä veroja ja rahtia. Hinnat on otettu TLX-eristeiden jälleenmyyjän internetsivuilta. ([www.just-insulation.com](http://www.just-insulation.com))

Materiaalivalmistaja käyttää rakenteiden U-arvojen laskennassa TLX-eristeiden lämmönvastuksena pelkän eristeen lämmönvastusta. Mikäli eristeen sisä- ja/tai ulkopuolella on ilmatila, voidaan sen vaikutus ottaa huomioon eristeen pinnan emissiviteetin avulla standardin EN ISO 6946 (2007) mukaisin laskelmin. Seuraavassa on laskettu edellä mainitun standardin mukaan esimerkkilaskelma ilmatilojen tuomasta lisäyksestä TLX silver -eristeen lämmönvastukseen. Ilmatilat on oletettu tuulettumattomiksi.

Ilmatilan lämmönvastus lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$R_g = \frac{1}{h_a + h_r} \quad (3.7)$$

missä

$\alpha_{\text{conv}}$  on konvektion lämmönsiirtokerroin (W/(m<sup>2</sup>K))  
 $\alpha_{\text{rad}}$  on säteilyn lämmönsiirtokerroin (W/(m<sup>2</sup>K))

Konvektion lämmönsiirtokerroin ( $\alpha_{\text{conv}}$ ) voidaan valita suoraan standardin taulukosta, jolloin sen arvoksi saadaan 1,25 W/(m<sup>2</sup>K).

Säteilyn lämmönsiirtokerroin lasketaan seuraavasti:

$$\alpha_{\text{rad}} = \varepsilon_{12} \alpha_{\text{rad},b} \quad (3.8)$$

missä

$\alpha_{12}$  on pintojen yhdistetty emissiviteetti (-) (ks. kaava 2.16)  
 $\alpha_{\text{rad},b}$  on mustan kappaleen pinnan säteilyn lämmönsiirtokerroin (W/(m<sup>2</sup>K))

Mustan kappaleen pinnan säteilyn lämmönsiirtokertoimeksi ( $\alpha_{\text{rad},b}$ ) saadaan 5,1 W/(m<sup>2</sup>K) standardin taulukon mukaan.

Pintojen yhdistetty emissiviteetti lasketaan kaavalla 2.16 olettaen eristeen vastakkaisen materiaalin pinnan emissiviteetiksi 0,90 ja eristeen pinnan emissiviteettinä käytetään taulukon 3.7 mukaista arvoa 0,16. Tällöin pintojen yhdistetty emissiviteetti on noin 0,157.

Tällöin säteilyn lämmönsiirtokertoimeksi saadaan noin 0,80 W/(m<sup>2</sup>K) kaavalla 3.8.

Sijoittamalla konvektion ja säteilyn lämmönsiirtokertoimet kaavaan 3.7 saadaan ilmatilan lämmönvastukseksi ( $R_g$ ) noin  $0,49 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

Lisäämällä kahden ilmatilan lämmönvastus TLX silver -eristeen lämmönvastukseen, saadaan kokonaisvastukseksi  $1,90 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Kyseinen arvo on suurempi kuin taulukossa 3.7 esitetty lämmönläpäisylaitteistolla rakenteesta mitattu arvo  $1,69 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Ero arvojen välillä johtuu siitä, että rakenteesta mitattu arvo sisältää vasojen kylmäsiltavaikutuksen. Vastaavasti Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaan tuulettumattoman ilmatilan lämmönvastus on  $0,36 \text{ m}^2\text{K/W}$ , kun toinen pinta on heijastava ( $\epsilon < 0,2$ ) ja ilmatilan paksuus on 20 mm (RakMK C4 2003). Tällöin eristeen ja kahden ilmatilan yhteinen lämmönvastus on  $1,64 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

Multifoil-eristeiden eristävyysominaisuudet heikkenevät kalvojen heijastavuuden heikkenemisen seurauksena niiden altistuttua UV-säteilylle. Oikein asennetuille TLX-eristeille luvataan 25 vuoden takuu ja niiden luvataan kestävän yläpohjaan asennettuna yhtä pitkään kuin itse kattorakenne kestää.

Materiaalivalmistajan Internet-sivuilta löytyy asennusohjeita, esimerkkikuvia TLX-eristeiden mahdollisista käyttökohteista ja kyseisille rakenteille laskettuja U-arvoja. Materiaalivalmistajalta saa tarvittaessa apua muiden rakenteiden U-arvojen laskentaan ja kosteuden kondensoitumistarkasteluihin.

**Euroform Products Ltd:**

Euroform Products on vuonna 1995 perustettu englantilainen rakennusmateriaaleja valmistava yritys. Kaikki yrityksen valmistamat lämmöneristeet luokitellaan heijastaviksi eristeiksi. Yrityksen tuotevalikoimaan kuuluu kolme rakennuksen yläpohjaan ja ulkoseinään soveltuvaa multifoil-eristettä. Ne tunnetaan nimillä Gen-X, Xfoil 21 ja Xfoil 25.

Gen-X on myös BBA:n sertifioima eriste, joka koostuu seitsemästä materiaalikerroksesta (kuva 3.17). Eristeen uloimmat kerrokset ovat metallipinnoitettuja kalvoja, joita on vahvistettu polymeerikuiduilla. Eristeen sisäosa koostuu kolmesta polyesterikuiduista valmistetusta tätemateriaalikerroksesta, joiden välissä on kaksi metallipinnoitettua kalvoa. Eristeen molemmat pitkät sivut on suljettu nitomalla ja liimanauhalla sitomalla. Gen-X -eriste on tarkoitettu käytettäväksi lähinnä katon täydentävänä lämmöneristeenä, mutta se voidaan asentaa myös seinärakenteisiin. Gen-X on valmistajan ohjeiden mukaan asennettuna ilma- ja vesihöyrytiivis. Tämä tulee ottaa huomioon eristeen sijoittamisessa rakenteisiin, jotta välttyttäisiin kondenssiongelmilta. Gen-X on suunniteltu asennettavaksi siten, että eristeen sisä- ja ulkopuolelle jää ilmaraoit. Siksi sen lämmönvastusarvokin on esitetty ottamalla ilmaraoit huomioon (taulukko 3.11).



**Kuva 3.17** Euroform Products Ltd:n valmistama multifoil-eriste nimeltä Gen-X aukileikattuna (vasemmalla). Oikealla saman materiaalivalmistajan tuote nimeltä Xfoil rullattuna. (Euroform Products Ltd)

Xfoil -eristeet ovat sertifioimattomia eristeitä, joita on saatavana kahta eri paksuutta. Xfoil 21 on paksuudeltaan 35 mm ja se muodostuu seitsemästä materiaalikerroksesta. Xfoil 25 on puolestaan 50 mm paksu koostuen 11 materiaalikerroksesta. Heijastavat kalvot ovat metallipinnoitettua polyesteriä ja myös eristeen täytemateriaali on polyesteriä.

Xfoil -eristeet on suunniteltu käytettäväksi vastaavasti kuin edellä esitetyt Gen-X -eristeet, eli lähinnä yläpohjassa ilmarakojen ympäröiminä. Xfoil -eristeiden lämmönjohdavuusarvot perustuvat koerakennuksissa suoritettuihin dynaamisiin, vertaileviin mittauksiin. Mittaukset on suoritettu kahdessa koerakennuksessa, joista toinen on eristetty kyseisillä tuotteilla ja toisessa on käytetty vastaavasti lämmöneristeenä mineraalivillaa. Eristepaksuuksien vastaavuudet on ilmoitettu koerakennuksien lämmitysenergiankulutukseen perustuen. Näin ollen Xfoil 21:n sanotaan vastaavan 210 mm mineraalivillaa ( $\lambda = 0,040 \text{ W/mK}$ ) ja Xfoil 25:n vastaavan 240 mm mineraalivillaa. Kyseinen mittaustapa on herättänyt paljon keskustelua eristemateriaalivalmistajien ja rakennusalan toimijoiden keskuudessa. Vastaavaa mittaustapaa käyttää myös yritys nimeltä ACTIS. Materiaalien testaukseen liittyviä ongelmia ja ristiriitaisuuksia käsitellään tarkemmin kohdassa 3.3.1.3. Taulukossa 3.11 olevat lämmönvastusarvot sisältävät ilmarakojen vaikutuksen ja niiden suuruuteen tulee suhtautua varauksella, sillä kyseisten mittausten suorittamiseen ei ole käytetty standardisoituja menetelmiä.

Xfoil -eristeiden vesihöyrynläpäisevyysominaisuudet on testattu standardin EN 12086 (1997) mukaan. Testi osoitti, että eriste toimii hyvin suurena vesihöyrynvastuksena. Sen vuoksi tuote toimii rakenteessa lämmöneristeenä sekä ilman- että höyrynsulkuna. Tiiviin kuorikerroksen ansiosta Xfoil -eristeen lämmöneristävyysominaisuudet pysyvät muuttumattomina myös silloin kun ympäröivän ilman kosteuspitoisuus on suuri.

Euroformin multifoil-eristeet ovat lahoamattomia ja helposti repeämättömiä. Oikein asennettuina niiden käyttöiän sanotaan olevan yhtä pitkä kuin itse rakenne, jossa eristettä käytetään.

Materiaalivalmistajan Internet-sivuilta löytyy asennusohjeita, esimerkkikuvia eristeiden mahdollisista käyttökohteista ja kyseisille rakenteille laskettuja U-arvoja. Materiaalivalmistajalta saa tarvittaessa apua muiden rakenteiden U-arvojen laskentaan ja kosteuden kondensoitumistarkasteluihin.

**Taulukko 3.11** Gen-X ja Xfoil -eristeiden ominaisuudet (Euroform Products Ltd).

	<b>Gen-X</b>	<b>Xfoil 21</b>	<b>Xfoil 25</b>
<b>Leveys</b>	1,2 m	1,5 mm	1,5 mm
<b>Pituus</b>	12,5 m	10 m	10 m
<b>Paksuus</b>	33 mm	35 mm	50 mm
<b>Paino</b>	0,87 kg/m <sup>2</sup>	0,67 kg/m <sup>2</sup>	0,8 kg/m <sup>2</sup>
<b>Eristeen lämmönvastus, R</b>	0,97 m <sup>2</sup> K/W	–	–
<b>Eristeen lämmönjohtavuus, <math>\lambda^{(a)}</math></b>	0,034 W/(mK)	–	–
<b>Emissiviteetti, <math>\varepsilon</math></b>	0,17	–	–
<b>Lämmönvastus rakenteessa, R</b>	1,9 m <sup>2</sup> K/W <sup>(b)</sup>	5,25 m <sup>2</sup> K/W <sup>(c)</sup>	6,0 m <sup>2</sup> K/W <sup>(c)</sup>
<b>Vesihöyrynläpäisevyys, <math>\delta_v</math></b>	n. 6,49*10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /s	höyrynsulku	höyrynsulku
<b>Paloluokka (EN ISO 11925-2 2002)</b>	E	–	–
<b>Hinta<sup>(d)</sup></b>	n. 7,7 €/m <sup>2</sup>	n. 8,5 €/m <sup>2</sup>	–

(a) Lämmönjohtavuus on laskettu lämmönvastuksesta olettaen eriste tasa-aineiseksi.

(b) Lämmönvastusarvo on mitattu standardin EN 12667 (2001) mukaan ja se sisältää eristeen ulko- ja sisäpuolella sijaitsevien 25 mm paksujen ilmarakojen vaikutuksen.

(c) Dynaamisesti testattu arvo, joka sisältää eristeen ulko- ja sisäpuolella sijaitsevien 25 mm paksujen ilmarakojen vaikutuksen.

(d) Hinnat eivät sisällä veroja ja rahtia. Hinnat on otettu Euroformin valmistamien eristeiden jälleenmyyjien internetsivuilta. ([www.just-insulation.com](http://www.just-insulation.com); [www.insulationexpress.co.uk](http://www.insulationexpress.co.uk))

**ACTIS Insulation Ltd:**

ACTIS on ranskalainen yritys, joka on erikoistunut rakentamiseen soveltuvien innovatiivisten eristeiden kehittämiseen ja valmistukseen. Yrityksen valmistamat multifoil-eristeet hallitsevat eurooppalaisia markkinoita. ACTIS valmistaa tuotetta nimeltä Triso-Super 10, joka on rakentamiseen soveltuva multifoil-eriste.

Triso-Super 10 on kuvan 3.18 mukainen multifoil-eriste, joka koostuu 19 erillisestä materiaalikerroksesta. Se sisältää kahdeksan metallista heijastavaa kalvoa, joista eristeen ulkopintojen kerrokset on vahvistettu kestämään mekaanista kulutusta. Kalvojen väleissä on yhteensä kolme pehmeää täytemateriaalikerrosta ja kahdeksan solumuovikerrosta.

Eristeen ominaisuudet on esitetty taulukossa 3.12, jossa esitetty lämmönvastusarvo perustuu koerakennuksessa suoritettuihin dynaamisiin mittauksiin (vrt. Xfoil -eristeet). Triso-Super 10 -eristeen sanotaan vastaavan 210 mm mineraalivillaa ( $\lambda = 0,040$  W/(mK)), jonka perusteella taulukossa 3.12 esitetty lämmönvastusarvo on laskettu. Edellä mainitun mineraalivillavastaavuuden on määrittänyt ja sertifioinut BM TRADA. Se on yksityinen yritys, joka tarjoaa tuotteiden sertifiointipalveluja Iso-Britanniassa. Tosin Iso-Britannian rakentamismääräykset eivät hyväksy kyseistä sertifikaattia (Frawley 2009). Tästä johtuen, ja kohdassa 3.3.1.3 esitettävien ristiriitaisuuksien vuoksi, kyseiseen lämmönvastusarvoon tulee suhtautua varauksella.

Triso-Super 10 -eristeet eivät ole paloluokiteltuja, joten ne kuuluvat eurooppalaisen standardin (EN 13501-1 2007) mukaan luokkaan F. Rakennuksen paloturvallisuus tulee varmistaa peittämällä eriste palamattomilla materiaaleilla. Triso-Super 10 -eristeet ovat valmistajan mukaan vesihöyrytiiviitä, mutta materiaalivalmistaja ei ilmoita niiden todellista vesihöyrynläpäisevyysarvoa.

Triso-Super 10 -eristeet on suunniteltu käytettäväksi lähinnä yläpohjan lämmöneristeenä, mutta ne soveltuvat myös seinärakenteisiin. Niiden sanotaan soveltuvan rakenteiden pääasialliseksi lämmöneristeeksi, mutta se perustuu ainoastaan taulukossa 3.12 ilmoitettuun kyseenalaiseen lämmönvastusarvoon. Näin ollen kyseisiä eristeitä voidaan pitää, samoin kuin muita multifoil-eristeitä, rakenteiden täydentävinä lämmöneristeinä.

Triso-Super 10 -eristeiden pitkäaikaiskestävyyttä on tarkkailtu silmämääräisesti todellisten rakennuksien kattorakenteista. 18 vuoden käytön jälkeen tuotteiden on havaittu olevan moitteettomassa kunnossa, joten materiaalivalmistaja lupaa tuotteen kestävän rakennuksen käyttöä. On huomattava, että pitkäaikaiskestävyyden tarkasteluissa ei ole tutkittu eristeiden eristävyysominaisuuksien mahdollista heikkenemistä.





**Kuva 3.18** Triso-Super 10 -eriste avattuna ja rullattuna (ACTIS Insulation Ltd).

**Taulukko 3.12** Triso-Super 10 -eristeen ominaisuudet (ACTIS Insulation Ltd).

<b>Leveys</b>	1,6 m
<b>Pituus</b>	6,25 m tai 12,5 m
<b>Paksuus</b>	30 mm
<b>Paino</b>	0,60 kg/m <sup>2</sup>
<b>Lämmönvastus rakenteessa, R<sup>(a)</sup></b>	5,25 m <sup>2</sup> K/W
<b>Paloluokka (EN 13501-1 2007)</b>	F
<b>Hinta<sup>(b)</sup></b>	n. 10,5 €/m <sup>2</sup>

(a) Dynaamisesti testattu arvo, joka sisältää eristeen ulko- ja sisäpuolella sijaitsevien ilmarakojen vaikutuksen.

(b) Hinnat eivät sisällä veroja ja rahtia. Hinnat on otettu ACTIS:in valmistamien eristeiden jälleenmyyjän Internet-sivuilta. ([www.just-insulation.com](http://www.just-insulation.com))

### 3.3.1.3 Lämpötekniisten ominaisuuksien testaus

Multifoil-eristeiden lämpötekniisistä ominaisuuksista on olemassa kaksi hyvin erilaista mielipidettä. Joidenkin multifoil-eristeisiin liittyvien raporttien ja materiaalivalmistajien mukaan noin 30 mm paksu eriste vastaa noin 200 mm paksua mineraalivillakerrosta, jonka lämmönvastus on 5 m<sup>2</sup>K/W (BM TRADA). Toisten raporttien ja materiaalivalmistajien mukaan vastaavien multifoil-eristeiden lämmönvastus on luokkaa 1,7–2,0 m<sup>2</sup>K/W (Williams et al. 2007; CSTB 2007; Schade 2008; Frawley 2009). Edellä mainitut vastusarvot sisältävät eristeen ulko- ja sisäpuolella olevat ilmaraot. Suuret erot lämmönvastusarvojen välillä johtuvat mittaustapojen eroavaisuuksista.

Multifoil-eristeiden lämmönvastusarvoja on määritetty kahdella tapaa: lämmönläpäisylaitteistolla ja vertailevilla kenttämittauksilla. Lämmönläpäisylaitteistolla standardin EN ISO 8990 (1996) mukaan tehdyillä mittauksilla määritetyt lämmönvastusarvot ovat luokkaa 1,7–2,0 m<sup>2</sup>K/W 30 mm paksulle multifoil-eristeelle.

Kaikki materiaalivalmistajat eivät pidä lämmönläpäisylaitteistoa soveltuvana multifoil-eristeiden mittaamiseen, materiaalin kerroksellisen rakenteen ja mittausmenetelmässä käytettyjen vakio-olosuhteiden vuoksi. Vakio-olosuhteissa ilmaston vaikutus kuten kosteuden ja lämpötilan vaihtelut sekä tuulen vaikutus eristeen lämpötekniseen toimintaan jäävät ottamatta huomioon. (Williams et al. 2007) Näin ollen osa yrityksistä on mitannut eristeiden lämmönvastusarvot koerakennuksissa tehdyillä vertailevilla mittauksilla. Koerakennuksissa tehtyjä mittauksia varten yritykset ovat rakentaneet kaksi identtistä rakennusta, joista toinen on eristetty mineraalivillalla ja toinen testattavalla multifoil-eristeellä. Molemmat rakennukset on lämmitetty samaan vakiolämpötilaan ja eristeiden lämpöteknistä toimivuutta on arvioitu lämmittämiseen vaadittavan lämmitysenergiankulutuksen perusteella. Vertailevilla mittauksilla 30 mm paksulle multifoil-eristeelle saadut lämmönvastusarvot vaihtelevat suuresti (välillä 1,7–5,0 m<sup>2</sup>K/W) riippuen mittauksen tekijästä. Syitä vertailevilla mittauksilla saatujen tulosten hajontaan on monia, mutta merkittävin niistä on mineraalivillan suuri ilmanläpäisevyys multifoil-eristeisiin verrattuna. Mittauksissa, joissa multifoil-eristeen lämmönvastuksen sanotaan olevan 5 m<sup>2</sup>K/W, multifoil-eristeitä on verrattu lasivillaan, jota ei ollut suojattu aktiivista konvektiota estävällä tuulensuojakerroksilla. Näin ollen lämmön siirtyminen konvektiolla lasivillakerroksen läpi on johtanut sen eristävyysominaisuuksien aliarviointiin ja samalla multifoil-eristeiden ominaisuuksien yliarviointiin.

CEN (European committee for standardization) tekee parhaillaan standardia heijastavien lämmöneristeiden lämmöneristävyysominaisuuksien määrittämisestä laboratoriossa. Standardia on valmistellut CEN:in teknisen komitean CEN/TC 89 ("Rakennusten ja rakennuskomponenttien lämpötekniset ominaisuudet") asettama työryhmä WG 12. Heidän valmistelemansa standardiehdotuksen loppuraportti on valmis ja se on teknisen komitean hyväksyttävänä. Standardin tarkoituksena on kuvailla menetelmä, jolla voidaan määrittää heijastavien lämmöneristeiden eristävyysominaisuudet käyttäen jo standardisoituja (CEN ja ISO) mittaustapoja ja laskentamenetelmiä. Standardiehdotuksessa heijastavat lämmöneristeet on jaettu neljään ryhmään, jotka ovat vastaavat kuin kappaleen 3.3 alussa esitetty jaottelu (ks. sivu 58). Multifoil-eristeet kuuluvat ryhmään 3, joille suositellaan kahta tapaa mitata eristävyysominaisuudet lämmönläpäisylaitteistolla standardin EN ISO 8990 (1996) mukaan. Ensimmäinen tapa on mitata eristeen ja ilmatilojen yhteinen lämmönvastus rakenteesta, jossa multifoil-eriste on asetettu kahden ilmatilan (> 25 mm) väliin. Ilmatilat on rajattu ympäristöstä esimerkiksi vanerilevyllä. Eristeen tukemiseen vanerilevyjen väliin voidaan käyttää pieniä EPS-paloja. Rakenne on siis kokonaisuudessaan seuraava: vaneri, ilmatila, eriste, ilmatila ja vaneri. Mittausanturit asetetaan vanerin sisäpuolelle, jolloin määritetty lämmönvastus sisältää vain ilmatilojen ja eristeen vaikutuksen. Kokeellisesti määritetyn vastusarvon perusteella voidaan määrittää pelkän eristeen osuus lämmönvastuksesta standardin EN ISO 6946 (2007) laskentamenetelmillä. Tätä varten tulee tietää eristeen ulkopintojen emissiviteetit, jotta kokonaisuudesta vähennettävät ilmatilojen vastukset voidaan määrittää. Toinen tapa multi-

foil-eristeiden lämpöteknisen toiminnan määrittämiseen on mitata koko rakenteen U-arvo lämmönläpäisylaitteistolla standardin EN ISO 8990 (1996) mukaan. Tällöin ei saada määritettyä pelkän eristeen ominaisuuksia, vaan U-arvoon sisältyy koko rakenne, eikä määritettyä U-arvoa voida yleistää muihin rakenteisiin.

On huomattava, että edellä esitetyt multifoil-eristeiden eristävyysominaisuuksien määrittämenetelmät sisältyvät standardiehdotukseen eivätkä näin ollen ole vielä standardisoituja menetelmiä. Osa multifoil-eristeiden valmistajista määrittää jo tällä hetkellä joidenkin tuotteidensa eristävyysominaisuudet standardoidulla mittausmenetelmällä, kuten lämmönläpäisylaitteistolla. Näistä voidaan mainita Web Dynamics Ltd:n TLX-eristeet ja Euroform Products Ltd:n Gen-X -eriste. Mittaustapa näkyy näiden eristeiden lämmönvastusarvoissa, jotka ovat välillä 1,69–1,90 m<sup>2</sup>K/W sisältäen ilmaraot. Nämä arvot kuvaavat kuitenkin tämän hetkisen käsityksen mukaan paremmin multifoil-eristeiden todellisia eristävyysominaisuuksia, kuin vertailevilla kenttämittauksilla määritetyt arvot.

#### 3.3.1.4 Käyttösovellukset ja asentaminen

Pääsääntöisesti multifoil-eristeet on suunniteltu puurankarunkoisen talon yläpohjan täydentäväksi lämmöneristeeksi, eli käytettäväksi tavanomaisten lämmöneristeiden rinnalla rakennuksen yläpohjarakenteissa. Tuotteet soveltuvat myös ulkoseinien lämmöneristämiseen. Osan tuotteista sanotaan riittävän eristävyysominaisuuksiltaan ainoaksi lämmöneristeeksi. Tämä väittämä perustuu kenttämittauksiin, joiden paikkansapitävyys kyseenalaistettiin edellisessä kappaleessa. Käyttösovelluksien tarkastelussa oletetaan, että multifoil-eristeiden lämmönvastukset ovat vastaavia kuin edellisessä kappaleessa esitetyt lämmönläpäisylaitteistolla mitatut arvot. Näin ollen ne soveltuvat käytettäväksi ainoastaan rakennuksen täydentävänä lämmöneristeinä.

Seuraavassa esitetyt multifoil-eristeiden asentamiseen ja käyttösovelluksiin liittyvät tiedot on kerätty multifoil-eristeiden valmistajien esitteistä ja Internet-sivuilta. Yläpohjassa tavanomaisten lämmöneristeiden käytöstä aiheutuvat suuret rakennepaksuudet eivät aiheuta erityistä haittaa. Seinärakenteissa puolestaan matalan lämmönjohtavuuden omaavien eristeiden käytöllä voidaan pienentää rakennepaksuuksia ja näin ollen seinärakenteiden viemät hukkaneliöt vähenevät. Sen vuoksi tässä tarkastellaan ainoastaan multifoil-eristeiden käyttöä ulkoseinärakenteissa.

Multifoil-eristerullat tulee varastoida työmaalla kuivalle ja puhtaalle alustalle, lisäksi ne tulee suojata suoralta auringonsäteilyltä ja saderasitukselta. Asennusvaiheessa tuotteet pitää suojata pitkäkestoiselta saderasitukselta ja kalvojen pintojen likaantumista tulee välttää, jotta niiden heijastusominaisuudet eivät heikkenisi.

Multifoil-eristeiden työstämiselle ei juurikaan aseteta erityisvaatimuksia. Niiden käsittely ja asentaminen eivät vaadi suojavaatetuksen käyttöä. Eristeitä voidaan leikata haluttuun muotoon esimerkiksi veitsellä, saksilla tai kyseisten eristeiden leikkaamiseen tar-

koitetuilla leikkureilla. Niiden eristeiden osalta, joiden saumat on suljettu valmistusvaiheessa, tulee leikkaukset toteuttaa niin, että mahdollisimman suuri osa koneellisesti suljetuista saumoista säästyisi. Eristeiden auki leikatut reunat teipataan kiinni tarkoituksenmukaisella teipillä.

Rullalle käärityt 6–15 m pitkät multifoil-eristeet voidaan asentaa joko vaaka- tai pystysuuntaan, riippuen kumpi asennustapa soveltuu kuhunkin tapaukseen paremmin. Multifoil-eristeiden asennuksessa on otettava huomioon, että ne ovat kokoonpuristuvia eristeitä ja kokoonpuristuessa niiden eristävyysominaisuudet heikkenevät. Tämän vuoksi multifoil-eristeitä ei voi asentaa perinteisten lämmöneristeiden tapaan puristuksiin kahden materiaalikerroksen väliin. Siksi niitä käytetään lähinnä puurankarunkoisissa rakennuksissa, joissa ne voidaan asentaa koolauksien tai kantavien runkotolppien väliin. Kokoonpuristuvuusongelmien ja lämpösäteilyn vaikutuksen rajoittamiseksi eristeiden sisä- ja ulkopuolelle jätetään ilmaraoit, joiden tulisi olla vähintään 25 mm paksuja. Vaikka multifoil-eriste saataisiin asennettua ideaalisesti kahden tiiviin pinnan väliin, ei sen käytöstä saataisi juurikaan hyötyä sillä, pelkän eristeen lämmönjohtavuus on luokkaa 0,033–0,035 W/(mK) (ks. taulukot 3.10 ja 3.11), joka vastaa nykyaikaisten mineraalivil- laeristeiden lämmönjohtavuutta.

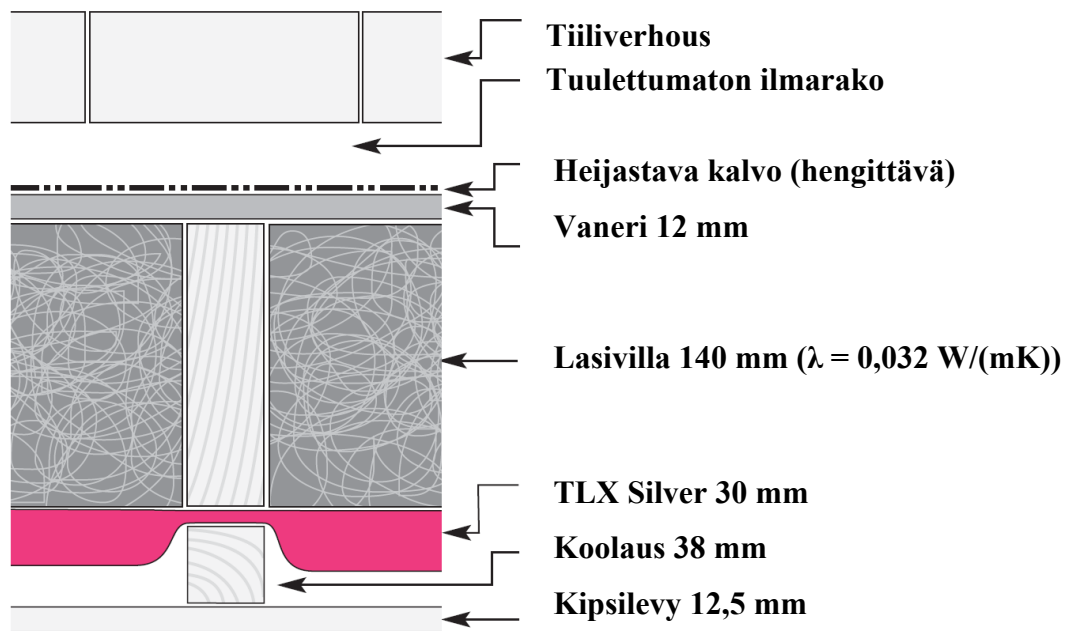
Eristeet kiinnitetään puuhun niiteillä (> 14 mm) tai nautoilla. Kiinnikkeiksi suositellaan galvanisoituja tai ruostumattomasta teräksestä valmistettuja niittejä tai nautoja. Triso-Super 10 -eristeen kosketusta kuparin ja emäksisten materiaalien kanssa tulee välttää (ACTIS Insulation Ltd). Siksi kyseinen tuote ei sovellu käytettäväksi betonirakenteissa, jotka ovat vahvasti emäksisiä.

Eristeiden saumat tulee limittää ja teipata molemmilta puolin tarkoituksenmukaisilla teipeillä, jotta eristeet saadaan asennettua ilmatiiviiksi kerroksiksi. Eristeen pinnan tulee olla puhdas ja kuiva teipin tarttuvuuden varmistamiseksi. Erityistä huomiota teippaukseen ja limittämiseen tulee kiinnittää muun muassa ikkunaliitosten kohdalla. Teippaukset ovat oleellisia myös multifoil-eristeen vesihöyrytiivyyden vuoksi, mikäli eriste toimii myös höyrynsulkuna rakenteessa. Eristeiden teippaukseen tarkoitettavia teippejä on saatavilla multifoil-eristeiden jälleenmyyjiltä.

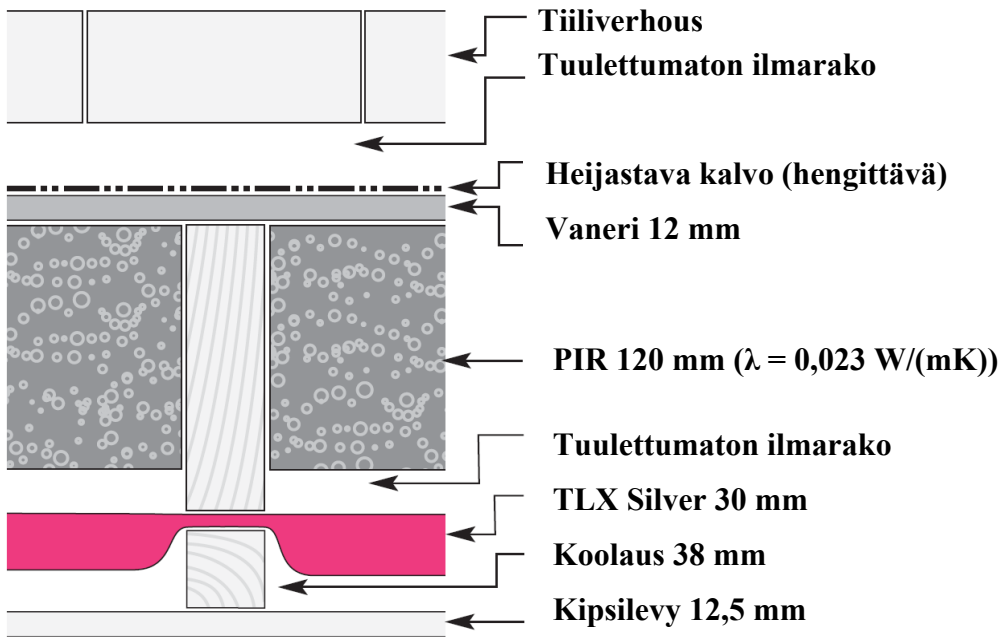
Eristeiden kuorikalvojen rikkoutumista tulee varoa ja asennettavan eristeen tulee olla kauttaaltaan ehjä. Eristeen pintojen eheys on tärkeää, jotta eriste toimii suunnitellulla tavalla sekä kosteus- että lämpötekniisesti. Kuljetus- tai asennusvaiheessa aiheutuneet multifoil-eristeiden kuorikalvojen repeämät voidaan paikata samoilla teipeillä, joita käytetään niiden saumojen teippaamiseen.

Kuvissa 3.19 ja 3.20 nähdään kaksi erilaista tapaa multifoil-eristeiden sijoittamisesta ulkoseinärakenteeseen. Kuvassa 3.19 multifoil-eriste on asennettu kiinni primäärisen eristeeseen ja varsinainen ilmarako on vain eristeen sisäpuolella. Kuvan 3.20 multifoil-

eriste on asennettu ideaalisesti, eli kahden ilma-araon väliin. **Kuvien rakenteita tarkas- teltaessa on huomattava, että ne eivät ole sellaisenaan kosteusteknisesti toimivia rakenteita Suomen ilmasto-oloissa.** Rakenteista havaitaan kuitenkin multifoil-eristeiden periaatteellinen sijoittaminen tavanomaisen lämmöneristeiden lämpimälle puolelle. Tämä on käytännössä välttämätöntä Suomen ilmasto-olosuhteissa, mikäli pääasiallisena läm- möneristeenä käytetään vesihöyryä läpäisevää eristettä, kuten mineraalivillaa. Tiiviitä, heikosti vesihöyryä läpäiseviä eristeitä käytettäessä multifoil-eristeiden sijoittaminen varsinaisen lämmöneristeiden ulkopuolelle voi olla mahdollista. Tällöin multifoil-eristeiden vesihöyrynläpäisevyyden tulee olla varsinaista lämmöneristettä suurempi.



**Kuva 3.19** Multifoil-eristeiden soveltaminen ulkoseinärakenteessa. Seinän U-arvo on 0,18 W/(m<sup>2</sup>K). (Web Dynamics Ltd)



**Kuva 3.20** Multifoil-eristeen soveltaminen ulkoseinärakenteessa. Kuvan seinän U-arvo on 0,15 W/(m<sup>2</sup>K). (Web Dynamics Ltd)

Kuvassa 3.21 on esitetty ulkoseinän sisäpuolinen lämmöneristäminen multifoil-eristeellä, vastaavasti kuin kuvien 3.19 ja 3.20 rakenneleikkauksissa on esitetty.



**Kuva 3.21** Multifoil-eristeen asentaminen seinän sisäosaan vastaavasti kuin kuvissa 3.22 ja 3.23. Kuvassa näkyvän koolauksen päälle asennetaan sisäverhouk, esim. kipsilevy. (Web Dynamics Ltd)

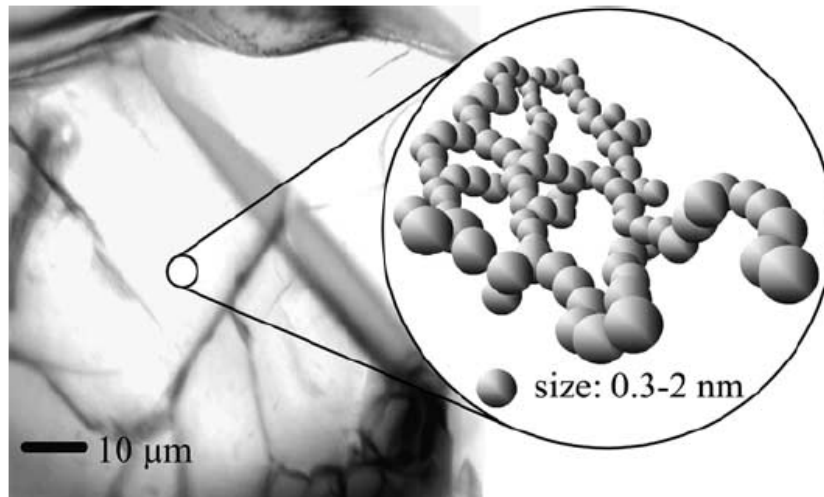
### 3.4 Aerogeeli-eristeet

Aerogeelit ovat nanohuokoisia kevyitä materiaaleja, jotka kehitettiin jo 1930-luvulla yhdysvalloissa. Aina 2000-luvulle saakka aerogeelien valmistukseen käytettävät valmistusmenetelmät ja raaka-aineet olivat kalliita. Näin ollen itse lopullinen lämmöneristämiseen käytettävä tuote oli kallis. Hinta rajoitti niiden käytön sovelluksiin, joissa eristämiseen käytettävä tila oli rajoitettu ja itse hinta oli toissijainen tekijä. Nykyään aerogeelien teollisen valmistuksen ongelmat on saatu ratkaistua ja niitä käytetään useissa kaupallisissa sovelluksissa. Tosin kaupallisten tuotteiden hinnat ovat edelleen korkeat tavanomaisiin rakennussovelluksiin ja saatavilla olevat materiaalipaksuudet riittämättömät varsinaiseksi rakennuksen ulkovaipan lämmöneristeeksi. Tähän päivään mennessä aerogeelejä on kehitetty eri raaka-aineista ja erilaisilla valmistusmenetelmillä lukuisiin sovelluksiin avaruussukkulan eristämisestä rakennusten lämmöneristämiseen.

#### 3.4.1 Valmistus ja lämpötekkinen toiminta

Aerogeelien valmistukseen käytetään geelimäisiä materiaaleja. Geelimateriaalit koostuvat kiinteästä ja nestemäisestä faasista, jotka ovat toisistaan riippumattomia. Aerogeelien valmistuksen perusidea on poistaa nestemäinen faasi geelimateriaalista, jolloin jäljelle jää kiinteä huokoinen materiaali, jonka koostumus ja tilavuus ovat suunnilleen samanlaiset kuin alkuperäisellä geelin sisältämällä kiinteällä faasilla. Nestemäisen faasin poistamiseen on käytetty mm. paineastiaa, jossa aluksi paine ja sen jälkeen lämpötila nostetaan nesteen kriittisen pisteen yläpuolelle. Tällöin neste on superkriittisellä alueella, jolloin sillä on sekä nesteen että kaasun ominaisuuksia ja se saadaan poistettua geelimateriaalista. Silikasta valmistettuja aerogeelejä on onnistuttu valmistamaan myös ilman paineastiaa ympäröivässä ilmanpaineessa, jolloin nestemäinen faasi on koostunut vedestä ja alkoholista. (Fricke & Tillotson 1997)

Kuvassa 3.22 on esitetty nanohuokoisen silikasta valmistetun aerogeelin huokosverkosto. Aerogeeli on hyvin kevyt, lähes pelkkää ilmaa (yli 90 % tilavuudesta) sisältävä materiaali. Sen rakenne koostuu noin 0,3–2 nm kokoisista silikapartikkeleista, jotka muodostavat ketjumaisen rakenteen. Ketjujen väliset huokokset ovat keskimäärin 30–40 nm kokoisia.



**Kuva 3.22** Nanohuokoisen silikasta valmistetun aerogelin huokosverkosto (Reim et al. 2005).

Aerogeelien merkittävimpanä ominaisuutena voidaan pitää alhaista lämmönjohtavuutta, jonka sanotaan olevan alhaisin kaikista koskaan testatuista kiinteistä materiaaleista normaalissa ilmanpaineessa. Muut hyvät ominaisuudet ovat; korkeiden lämpötilojen sietokyky, hyvä ääneneristävyys ja painoonsa nähden hyvin suuri puristuslujuus. (Fricke & Tillotson 1997)

Rakentamiseen sovellettavat aerogeeli-eristeet eivät koostu pelkästään puhtaasta aerogeeli-materiaalista, joita aiheeseen liittyvät tieteelliset artikkelit (mm. Fricke & Tillotson 1997; Reim et al. 2005) käsittelevät, vaan ne ovat komposiittimateriaaleja. Ne koostuvat silikasta ( $\text{SiO}_2$ ) eli piidioksidista ja kuitumaisesta huopamateriaalista. Komposiittimateriaali valmistetaan kyllästämällä huopalevyt juoksevilla geelimäisellä piioksidilla, jonka jälkeen valmistusperiaate on vastaava kuin puhtaiden aerogeelien valmistuksessa, eli geelimateriaalin sisältämä neste poistetaan. Rakennetta vahvistavan huopamateriaalin ansiosta komposiittimateriaalista tulee joustavaa ja sen lämmöneristävyysominaisuudet ovat lähes samaa tasoa kuin puhtaan aerogelin. (Aspen Aerogels) Vaikka rakentamiseen soveltuvat aerogeeli-materiaalit ovat komposiittimateriaaleja ja ne tulee erottaa puhtaista aerogeeleistä, käytetään tässä työssä näille eristeille yleistä nimitystä aerogeeli-eristeet.

Rakennusten lämmöneristämistä silmälläpitäen aerogeeli-eristeiden tärkeimpänä ominaisuutena voidaan pitää niiden alhaista lämmönjohtavuutta, joka on noin 0,014–0,015 W/(mK). Lämmön siirtyminen aerogeeli-eristeen läpi on seurausta kolmesta siirtymismuodosta: huokosilmassa tapahtuvasta johtumisesta, kiinteiden partikkeliketjujen ja kuitujen kautta tapahtuvasta johtumisesta ja säteilystä huokosilmassa (Fricke & Tillotson 1997). Lämmön siirtymistä aerogeeli-eristeissä voidaan verrata tyhjiöeristeisiin ilman tyhjiötä. Tyhjiöeristeitä pienemmän huokoskoon ansiosta aerogeeli-eristeiden lämmönjohtavuus on pienempi, kuin alipaineistamattoman VIP-eristeen (0,020 W/(mK)). Aerogeeli-eristeiden merkittävin lämmön siirtymistä rajoittava tekijä voidaan



perustella kaavalla 3.1 (ks. sivu 24). Sen mukaan pieni huokoskoko rajoittaa lämmön johtumista huokosilmassa, sillä ilmamolekyylit eivät mahdu törmäilemään keskenään vaan törmäilevät huokosseinämiin. Tällöin lämpö pyrkii siirtymään kaasussa tapahtuvan johtumisen sijasta partikkeliketjuja ja kuituja pitkin johtumalla. Säteilyn vaikutuksen rajoittamisen vuoksi aerogeeli-eristeisiin voidaan lisätä hiilipartikkeleita vastaavasti kuin tyhjiöeristeisiin.

### 3.4.2 Kaupalliset tuotteet

Muutama lämmöneristeyrittäjä valmistaa aerogeeli-eristeitä rakennussovelluksiin. Kuitenkin näiden tuotteiden käyttö on hyvin rajoittunutta, johtuen suhteellisen korkeasta hinnasta. Tämän hetkisistä, rakentamiseen soveltuvista aerogeeli-eristeistä voidaan mainita yhdysvaltalaisen Aspen Aerogels -nimisen yrityksen valmistama tuote nimeltä Spaceline ja Spaceloft sekä yrityksen nimeltä Thermablok valmistamat tuotteet. Kyseiset tuotteet ovat ominaisuuksiltaan hyvin samankaltaisia, joten tässä esitellään lyhyesti vain Aspen Aerogelsin Spaceline-eriste, jota tuo maahan suomalainen lämmöneristealan yritys Thermisol. Spaceline-eristeen lisäksi Aspen Aerogels valmistaa eristettä nimeltä Pyrogel, joka vastaa lämmönjohtavuudeltaan edellä mainittuja tuotteita, mutta on palamaton materiaali.

Aspen Aerogels aloitti aerogeelien tutkimisen 1990-luvun loppupuolella. 2000-luvun alkupuolella he alkoivat kehittää aiemmin mainittua kuitumaista huopaa ja aerogeeliä sisältävää komposiittimateriaalia, joka tunnetaan kaupallisilla markkinoilla nimellä Spaceline. Se on kuvan 3.23 mukainen valkoinen, taipuisa, huopamainen materiaali, jonka merkittävimmät vahvuudet alhaisen lämmönjohtavuuden lisäksi ovat suuri puristuslujuus ja hyvä ääneneristävyys. Spaceline-eristeen tärkeimmät ominaisuudet on esitetty taulukossa 3.13.



**Kuva 3.23**

Spaceline, huopamainen kuituja ja aerogeeliä sisältävä komposiittimateriaali (Aspen Aerogels).

**Taulukko 3.13** Spaceline-eristeen ominaisuudet (Aspen Aerogels; Thermisol).

<b>Lämmönjohtavuus</b>	0,014 W/(mK)
<b>Vesihöyrynläpäisevyys, <math>\delta_v</math></b>	n. $4,72 \cdot 10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s
<b>Leveys</b>	1,450 m
<b>Pituus<sup>(a)</sup></b>	44,7 m
<b>Paksuus</b>	10 mm
<b>Tiheys</b>	150 kg/m <sup>3</sup>
<b>Käyttölämpötila-alue</b>	-200...+200 °C
<b>Paloluokka (RakMk E1 2002)</b>	C-s1, d0
<b>Lyhytaikainen puristuslujuus</b>	53 kPa
<b>Hinta<sup>(b)</sup></b>	n. 30 €/m <sup>2</sup>

(a) Voidaan tilata myös lyhyempiä pituuksia.

(b) Thermisolin mukainen hinta-arvio teolliselle rakentamiselle.

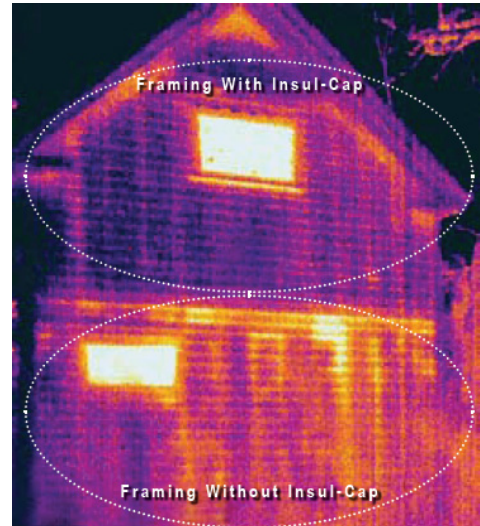
Spaceline-eristeet toimitetaan rullissa taulukon 3.13 mukaisissa mitoissa. Materiaalia käsiteltäessä suositellaan käytettävän suojahansikkaita, sillä niiden käsittely voi ärsyttää ihoa ja limakalvoja. Niitä voidaan leikata terävällä puukolla tai saksilla. Spaceline-levyistä irtoaa käsiteltäessä hieman pulverimaista ainetta ja pölyä. Sen vuoksi niiden työstäminen tulee tehdä hyvin tuulettuvassa tilassa. Käytöstä poistettavat tuotteet voidaan hävittää kaatopaikalle pusseihin pakattuina.

### 3.4.3 Aerogeeli-eristeiden soveltaminen rakentamisessa

Aerogeeli-eristeet soveltuvat sekä uudisrakentamiseen että vanhojen rakennusten lisälämmöneristämiseen. Paksuimmat rakentamiseen soveltuvat aerogeeli-eristeet ovat 10 mm paksuja, joten ne soveltuvat lähinnä rakennuksen vaipan täydentäviksi lämmöneristeiksi käytettäväksi varsinaisen lämmöneristeen rinnalla. Niitä on käytetty myös varsinaisena lämmöneristeenä ulkoseinässä. Suomen lämmöneristysmääräykset (RakMk C3 2010) vaativat ulkoseinän lämmöneristekerroksen paksuudeksi noin 80 mm Spaceline-eristettä, jotta U-arvovaatimus 0,17 W/(m<sup>2</sup>K) toteutuisi. Näin ollen niiden käyttö varsinaisena lämmöneristeenä Suomessa ei ole taloudellisesti järkevää.

Tämän hetkisten aerogeeli-eristeiden hintojen ja paksuuksien johdosta niiden merkittävimpanä käyttökohteena on kylmäsiltojen eristäminen tai palamattomien eristeiden käyttäminen palavia eristeitä suojaavana kerroksena. Kylmäsiltojen vaikutus rakennuksen vaipan kautta johtumisesta aiheutuvaan lämpöhäviöön korostuu rakennusten vaipan eristävyuden kasvaessa. Tästä johtuen aerogeeli-eristeiden käytöstä kylmäsiltoja katkaisevana kerroksena saadaan merkittävin hyöty, sillä arvokkaan eristemateriaalin menekki on tällöin huomattavasti pienempi kuin koko seinäalan eristämässä. Aerogeeli-eristeet kestävät hyvin puristusta kokoonpuristumatta, joten niitä voidaan käyttää myös kuormia kantavien rakenteiden välisiä kylmäsiltoja katkaisevana kerroksena.

Aerogeeli-eristeitä on käytetty lähinnä ulkoseinien sisä- ja ulkopuoliseen lämmöneristämiseen korjausrakentamisessa ja rakennuksen rungon eristekerrosta läpäisevien osien kylmäsiltojen katkaisemiseen. Useat aerogeeli-eristeet soveltuvat myös tavanomaisten rappausjärjestelmien pohjaksi. Kuvassa 3.24 on esitetty liimattavan aerogeeli-eristeen asentaminen runkotolpan kylkeen kylmäsiltaa katkaisevaksi kerrokseksi ja samaisesta rakennuksesta otettu lämpökamerakuva. Kuvasta havaitaan kylmäsiltaa katkaisevan eristeen vaikutus vaipan lämpöhäviöön.



**Kuva 3.24** Liimattavan Spaceloft-eristeen asentaminen runkotolppaan (vasemmalla). Oikealla lämpökamerakuva samasta rakennuksesta, jonka yläkerran runkotolppiin on asennettu Spaceloft-eriste. Alakerrassa runkotolpissa ei ole käytetty kylmäsiltoja katkaisevaa eristettä. (Aspen Aerogels)

### 3.5 Valoa läpäisevät lämmöneristeet

Valoa läpäisevät lämmöneristeet (transparent insulation materials, lyhyemmin TIM) ovat rakennuksen julkisivuun tai kattoon asennettavia kennomaisia rakenteita. Ne läpäisevät nimensä mukaisesti valoa, mutta eivät ole täysin läpinäkyviä kuten tavanomaiset ikkunat. TIM-eristeiden varsinaisena lämpöä eristävänä materiaalina on kennojen välitiloissa sijaitseva ilma tai täytekaasu. Lisäksi kennojen välitiloissa on käytetty myös valoaläpäisevää aerogeeli-materiaalia. TIM-eristeitä on tutkittu jo 1900-luvun alkupuoliskolta saakka, mutta tavanomaisten rakentamisessa käytettävien lämmöneristeiden korvaamista TIM-eristeillä on tutkittu vasta 20 vuoden ajan (Wong et al. 2007).

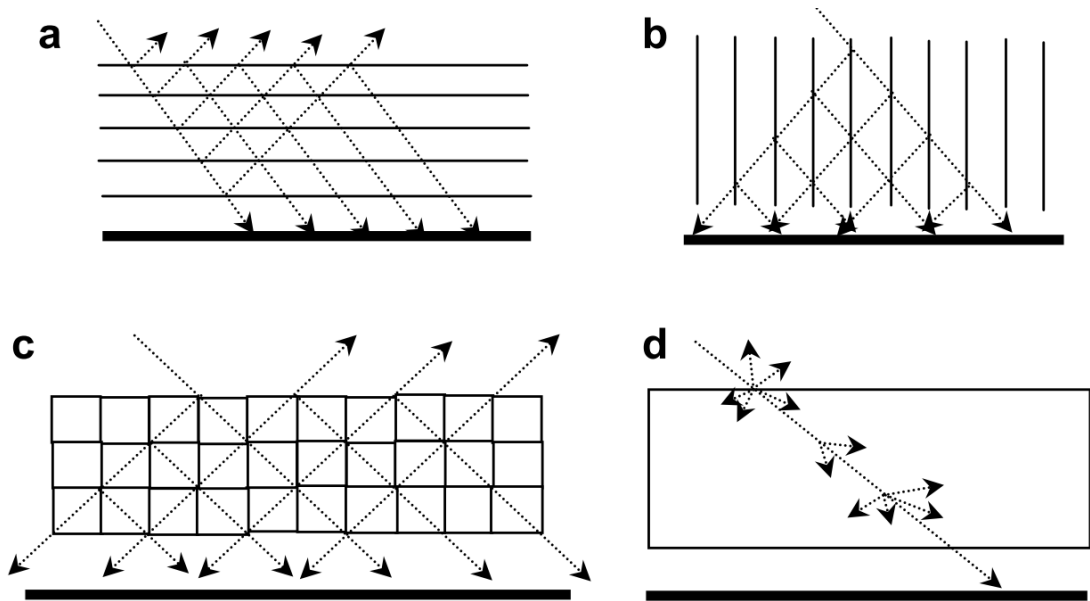
#### 3.5.1 Toiminta ja soveltaminen

Tärkeimpänä erona tavanomaisten lämmöneristeiden ja TIM-eristeiden välillä on se, että TIM-eristeet läpäisevät yli 50 % auringonsäteilyä. TIM-eristeet koostuvat yleensä muovista tai lasista valmistetusta kennomaisesta rakenteesta, jonka muutaman millimetrin kokoiset ontelot on täytetty ilmalla tai alhaisemman lämmönjohtavuuden omaavalla kaasulla. Lisäksi on olemassa valoa läpäisevällä aerogeeli-eristeellä täytettyjä rakenteita. (Wong et al. 2007)

TIM-eristeiden eristävyysominaisuuksia kuvataan U-arvolla vastaavasti kuin muiden lämmöneristeiden osalta. Lisäksi niiden läpäisevyysominaisuuksia kuvataan valonläpäisykertoimella  $\tau$  (-) ja auringonsäteilyn kokonaisläpäisykertoimella  $g$  (-). Valonläpäisykerroin kuvaa eristeiden läpäisevää näkyvän valon suhteellista osuutta ja auringonsäteilyn kokonaisläpäisykerroin kuvaa puolestaan eristeiden läpäisevän auringonsäteilyenergian suhteellista osuutta. Valonläpäisykertoimen ja auringonsäteilyn kokonaisläpäisykertoimen optimaaliset arvot riippuvat sovelluksesta, jossa TIM-eristettä käytetään. (Wong et al. 2007)

Kuvassa 3.25 on esitetty valoa läpäisevien eristeiden runkorakenteiden luokittelu neljään kategoriaan niiden geometrian perusteella. Ryhmään (a) kuuluvissa eristeissä kennomainen rakenne koostuu eristeiden pituussuuntaisista kennoista. Kennojen lukumäärän kasvattamisella voidaan vähentää lämpöhäviötä eristeiden läpi, mutta samalla eristeestä heijastuvan säteilyn määrä kasvaa ja läpäisevän auringonsäteilyn määrä pienenee. Näin ollen kyseisellä rakenteella ei voida saavuttaa yhtä aikaa hyviä eristävyys- ja läpäisyominaisuuksia. Ryhmän (b) eristeissä kennot ovat eristeiden pituussuuntaa vastaan koh-tisuorassa eli ne ovat saapuvan säteilyn suuntaisia. Kennot voivat olla suorakaiteenmuotoisia tai putkimaisia. Kyseinen rakenne takaa ryhmän (a) eristeitä suuremman auringonsäteilyn läpäisyn ja ovat yleisesti käytettyjä TIM-eristeissä. Ryhmään (c) kuuluvien eristeiden rakenteessa yhdistyy edellisten ryhmien rakenteet. Ryhmän (d) eriste koostuu yhdestä kennosta, joka sisältää lämpöä eristävää ja valoa läpäisevää aerogeeliä.

Kyseen eriste voi olla rakenteesta ja aerogeelin ominaisuuksista riippuen lähes yhtä läpäisevä kuin tavanomainen lasi. (Wong et al. 2007)



**Kuva 3.25** Valoa läpäisevien eristeiden luokittelu. (Wong et al. 2007)

Valoa läpäisevien lämmöneristeiden käytön tarkoituksena on rakennuksen lämmitysenergian kulutuksen alentaminen tai rakennuksen valaistustarpeen pienentäminen. Tietyssä sovelluksessa niiden käytöstä voidaan saada molempia edellä mainittuja hyötyjä. Tyypillinen sovellus, jossa TIM-eristeitä käytetään rakennuksen lämmitysenergian alentamisessa tunnetaan nimellä solar wall. Siinä valoa läpäisevä lämmöneriste asennetaan tumman massiivisen rakenteen tai faasimuutosmateriaalia sisältävän rakenteen ulkopuolelle. TIM-eriste päästää lävitseen lyhytaaltoisen auringonsäteilyn, joka varastoituu sen takana olevaan rakenteeseen. Seinästä lähtevä säteily on puolestaan pitkäaaltoista lämpösäteilyä, jonka siirtymistä takaisin ulkoilmaan TIM-eriste eristää. Eristeen sisäpuolen rakenteeseen varastoituva lämpöenergia siirtyy useiden tuntien viiveellä sisätilaan lämmittäen rakennusta yöaikaan. Solar wall -sovellus ei vaadi välttämättä TIM-eristeen takana olevalta rakenteelta suurta lämmönvarastointikykyä, vaan sitä voidaan soveltaa myös kevytrakenteisten rakenteiden yhteydessä, jolloin eristeen ja rakenteen välisen tilan lämmentynyt ilma pienentää lämmön siirtymiseen vaadittavaa lämpötilaeroa sen ja rakennuksen sisätilan välillä. Tällöin ongelmana voi kuitenkin olla rakennuksen ylikuumentuminen kesäisin. Solar wall -sovellusta on käytetty muun muassa asuin- ja toimistorakennuksissa. (Association for Transparent Insulation) Valoa läpäisevän lämmöneristeen käyttöä lämmön varastointiin yhdessä faasimuutosmateriaalin kanssa tarkastellaan lyhyesti kohdassa 4.6.4.2.

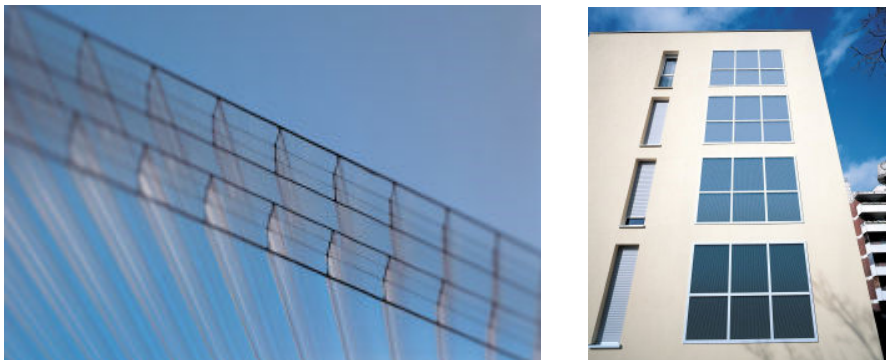
Sovellukset, joissa valoa läpäisevää lämmöneristettä käytetään rakennuksen valaistustarpeen vähentämiseen, tunnetaan englanninkielisellä nimellä daylighting systems. Täl-

löin valoa läpäisevä lämmöneriste asennetaan ikkunoiden tavoin seinä- ja/tai kattorakenteisiin. Valoisaan aikaan valoa läpäisevä lämmöneriste takaa rakennukseen luonnollisen ja tasaisen valaistuksen, mutta estää häikäisyä. Valoa läpäisevien eristeiden U-arvot ovat samaa luokkaa tai alhaisempia kuin nykyisin käytössä olevien ikkunoiden U-arvot. Näin ollen TIM-eristeden soveltaminen ikkunoiden tapaan on perusteltua rakennuksissa, joissa ikkunoiden läpinäkyvyyttä ei tarvita, vaan niiden käyttö perustuu valaistuskustannuksien pienentämiseen. Tällaisia rakennuksia ovat muun muassa kauppa- ja tehdasrakennukset sekä urheiluhallit. (Association for Transparent Insulation)

### 3.5.2 Kaupalliset tuotteet

Markkinoilla on useita TIM-eristeitä, joiden U-arvot vaihtelevat välillä 0,28–2,8 W/(m<sup>2</sup>K) tuotteen paksuudesta ja rakenteesta riippuen. Seuraavassa on esitetty muutama potentiaalinen tuote, jotka soveltuvat alhaisen U-arvon vuoksi käytettäväksi rakennuksissa Suomessa. Yhteenvedo eri materiaalivalmistajien tuotteista on esitetty taulukossa 3.14.

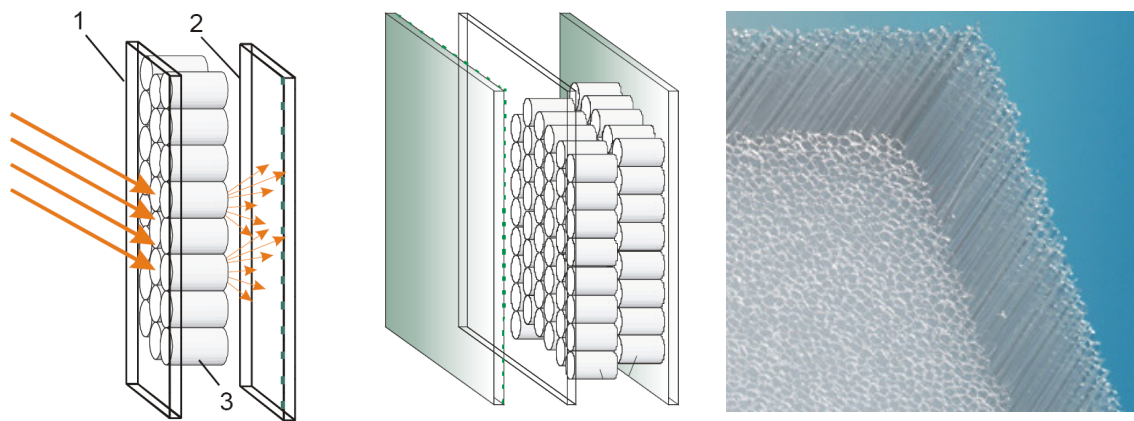
Bayer Sheet Europe GmbH:n valmistama tuote nimeltä Makrolon on kuvan 3.26 mukainen kennomainen rakenne, jonka U-arvot ovat välillä 0,8–1,8 W/(m<sup>2</sup>K). Makrolon paneelia voidaan käyttää joko lämmönvarastointiin asentaen se lämpöä varastoivan materiaalin ulkopuolelle (solar wall) tai valaistustarpeen vähentämiseen asentamalla se tavanomaisen ikkunan tavoin (daylighting). Kuvassa 3.26 oikealla on esimerkki TIM-eristeiden sijoittamisesta rakennuksen julkisivuun. Kyseinen kohde on asuinkerrostalo Saksassa, jossa eristepaneelit on asennettu massiivisen seinärakenteen ulkopuolelle.



**Kuva 3.26** Makrolon-eriste ja sen soveltaminen rakennuksen julkisivussa (Bayer Sheet Europe GmbH).

Saksalaisen OKALUX GmbH:n tuotevalikoimasta löytyy kolme TIM-eristettä, joiden lämmöneristävyys ja läpäisyominaisuudet voidaan valmistaa asiakkaan vaatimuksien mukaisiksi. Parhaimmillaan OKALUX:in valmistamilla paneeleilla päästään U-arvoon 0,7 W/(m<sup>2</sup>K). KAPILUX-TWD on kuvan 3.27 (vasemmalla) mukainen elementtimäinen rakenne, joka koostuu 5 mm paksusta ulkopinnan lasista (1), matalaemissiviteetti-pintaisesta 4 mm paksusta sisäpinnan lasista (2) ja niiden välissä olevasta ontoista put-

kista koostuvasta kennomaisesta rakenteesta (3) (kuva 3.27 oikealla). Kennomaisen rakenteen tarkoituksena on parantaa elementin lämmöneristävyysominaisuuksia, hajottaa auringonsäteilyä ja suojata rakennusta ylikuumentumiselta kesällä auringon paistaessa korkealta. Elementti on suljettu ilmatiiviisti ja täytetty jalokaasulla. KAPILUX-TWD -elementtien maksimikoko on 2 m x 2 m ja ne on suunniteltu käytettäväksi solar wallin tapaan energiavarastona toimivan rakenteen ulkopuolella. Kuvassa 3.27 (keskellä) on esitetty KAPILUX-T -eriste. Sen rakenne ulkoa sisällepäin on seuraava: ulkopinnan lasi, kaasua tai ilmatäytteenä 8 mm leveä rako, keskiosan lasi, kaksi 10 mm paksua kennomaista rakennetta ja sisäpinnan lasi. KAPILUX-T -eristeet on tarkoitettu asennettavaksi ikkunoiden tapaan vähentämään rakennuksen valaistustarvetta ja niitä on saatavissa, jopa 4 m korkeina ja 2,4 m leveinä elementteinä.



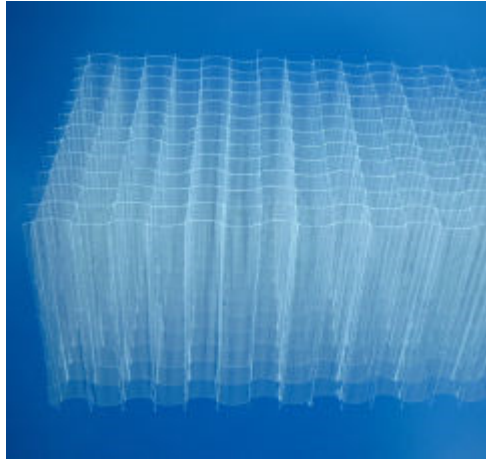
**Kuva 3.27** KAPILUX-TWD -eristeiden rakenne (vasemmalla). KAPILUX-T -eristeiden rakenne (keskellä). Oikealla lähikuva OKALUX GmbH:n eristeissä käytettävästä ontoista putkista ( $d \approx 2,5$  mm) koostuvasta kennomaisesta rakenteesta. (OKALUX GmbH)

Kolmas OKALUX GmbH:n valmistama valoa läpäisevä lämmöneriste on kuvan 3.28 (vasemmalla) mukainen OKAPANE-elementti. Se on kahdesta lasista koostuva elementtimäinen rakenne, jonka sisällä on kuvan 3.27 mukainen kennomainen rakenne. OKAPANE-elementtejä on käytetty ikkunoiden tapaan (kuva 3.28 keskellä) ja rakennusten varsinaisena seinärakenteena (kuva 3.28 oikealla).



**Kuva 3.28** OKAPANE-elementti (vasemmalla). Sen soveltaminen ikkunoiden tapaan tehdasrakennuksessa Saksassa (keskellä) ja rakennuksen varsinaisena seinärakenteena museossa Yhdysvalloissa (oikealla). (OKALUX GmbH)

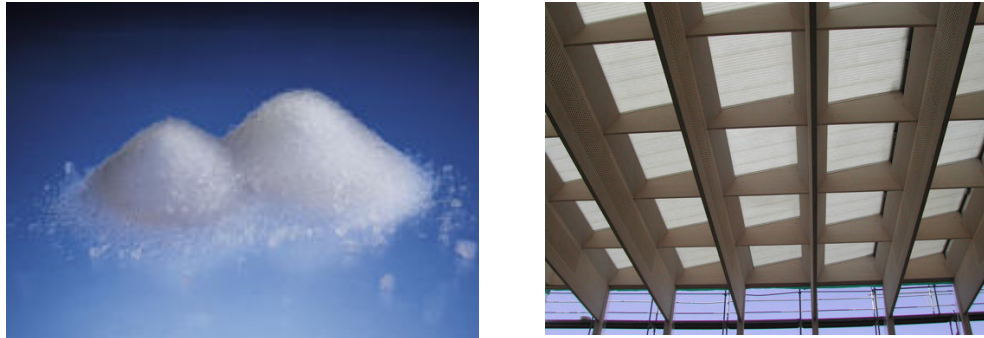
Saksalainen Wacotech GmbH & Co.KG valmistaa valoa läpäiseviä eristeitä, jotka koostuvat kuvan 3.29 mukaisesta muovista valmistetusta kennomaisesta rakenteesta, jonka molemmiin puolin on 4 mm paksut lasit. Kyseinen tuote tunnetaan nimellä TIMax CA. Siinä käytettävien muovikennojen onteloiden halkaisijat ovat 9 mm. Kennojen paksuudet vaihtelevat välillä 20–150 mm ja U-arvot vastaavasti välillä 2,2–0,4 W/(m<sup>2</sup>K). TIMax CA soveltuu käytettäväksi sekä lämpöenergian varastona toimivan rakenteen ulkopuolella että varsinaisena seinä- tai kattorakenteena.



**Kuva 3.29** Wacotechin valoa läpäisevän eristeen muovista valmistettu kennomainen rakenne. (Wacotech GmbH & Co.KG)

Tällä hetkellä markkinoilla olevista TIM-eristeistä alhaisimpiin U-arvoihin päästään käyttämällä ilman tai kaasun sijaan lämpöä eristävänä materiaalina valoa läpäisevää aerogeeleimateriaalia. Scobalit AG valmistaa valoa läpäiseviä eristeitä nimeltään Scobatherm Nanogel Panels, jotka koostuvat lasikuituvahvisteisista polyesterihartsista valmistetuista kuorista ja niiden välissä olevasta heikosti lämpöä johtavasta aerogelistä. Paneeleissa käytettävä aerogeele on Capot Corporationin valmistamaa silikageeliä nimeltä Nanogel (kuva 3.30 vasemmalla), jonka lämmönjohtavuus on 0,018 W/(mK). Geelin alhainen lämmönjohtavuus perustuu sen hyvin pieneen huokoskokoan (n. 20 nm).





**Kuva 3.30** Cabot Corporationin valmistama aerogeeli nimeltä Nanogel (vasemmalla). Kyseistä aerogeeliä sisältävien Scobalit AG:n valmistamien Scobatherm-paneelien soveltaminen sveitsiläisen koulun liikuntasalin katto- ja seinärakenteissa (oikealla). (Scobalit AG)

Scobatherm-paneelit soveltuvat käytettäväksi lähes kaikenlaisten rakennusten seinä- ja kattorakenteina. Kuvassa 3.30 (oikealla) on esimerkki Scobatherm-paneelien käyttämisestä rakennuksen seinä- ja kattorakenteena. Kyseinen kuva on sveitsiläisen koulun liikuntasalista, jonka katto ja pohjoisjulkisivu on valmistettu 50 mm paksuista Scobatherm-paneeleista, joiden U-arvo on 0,41 W/(m<sup>2</sup>K).

Taulukkoon 3.14 on koottu yhteenveto edellä esitellyistä eri materiaalivalmistajien valoa läpäisevistä eristeistä. Taulukossa on esitetty yhden tuotteen ominaisuudet kultakin tuotemerkillä. Useilta materiaalivalmistajilta on mahdollista tilata valoa läpäiseviä eristeitä mittatilauksena, jolloin on mahdollista päästä taulukossa esitettyjä arvoja alhaisempiin U-arvoihin sekä erilaisiin läpäisevyysominaisuuksiin.

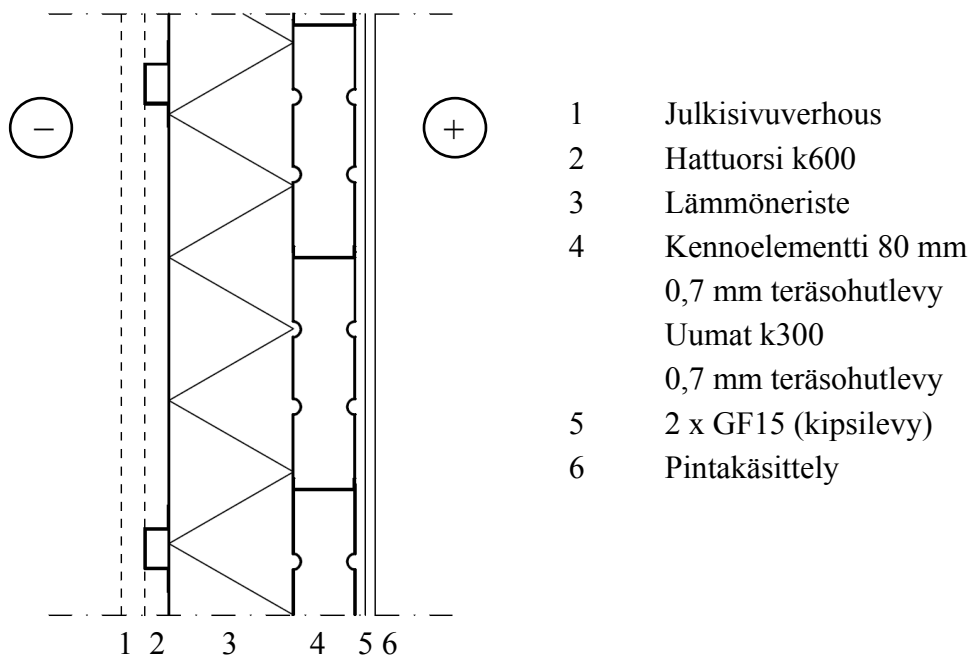
**Taulukko 3.14** Valoa läpäisevien TIM-eristeiden ominaisuuksia.

Nimi	Paksuus (mm)	Valonläpäisykerroin (-)	Auringonsäteilyn kokonaisläpäisykerroin (-)	U-arvo (W/(m <sup>2</sup> K))	Valmistaja
TIMax CA	150	0,45...0,83	0,48	0,4	Wacotech GmbH & Co.KG
Scobatherm	50	–	0,25	0,41	Scobalit AG
KAPILUX-TWD	49	0,72	0,49...0,62	0,7	OKALUX GmbH
Makrolon 2x4/25-25	64	0,48	0,40...0,49	0,8	Bayer Sheet Europe GmbH
KAPILUX-T	–	–	–	0,8	OKALUX GmbH
OKAPANE	56 <sup>(a)</sup>	0,35	0,36	1,2	OKALUX GmbH

(a) Ei sisällä ulko- ja sisäpinnan lasia.

### 3.6 Tutkittujen eristemateriaalien toiminta teräsrakenteisessa seinässä

Tässä kappaleessa tutkitaan kuvan 3.31 mukaisen ulkoseinärakenteen lämpöteknistä toimintaa. Kyseiselle seinälle määritettiin eristepaksuudet eri eristemateriaaleilla ja kombinaatioilla, jotka täyttävät vuoden 2010 rakentamismääräysten mukaisen lämpimään tilaan rajoittuvan ulkoseinän U-arvovaatimuksen  $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Laskelmat suoritettiin kaksikulotteiseen lämmönsiirtymisen laskentaan tarkoitettulla HEAT 2 – ohjelmalla. Lisäksi laskettujen eristekerrosten taloudellisuutta arvioidaan niihin käytettävien materiaalien neliöhinnan ja käytöstä saatavan tilansäästön perusteella.



**Kuva 3.31** U-arvon laskennassa käytetyn teräsrakenteisen ulkoseinän vaakaleikkaus.

#### 3.6.1 Laskennassa käytetyt lämmöneristeet

Kuvan 3.31 mukaisen ulkoseinärakenteeseen soveltuviksi lämmöneristeiksi valittiin tässä tutkimuksessa tarkastelluista uusista lämmöneristeistä VIP-eristeet ja arogeeli-eristeet. Heijastavat lämmöneristeet jätettiin tarkastelun ulkopuolelle, sillä niiden soveltamisesta kuvan 3.31 mukaisessa seinärakenteessa ei saada lämpöteknisesti merkittävää hyötyä. Kuten heijastavien eristeiden tarkasteluissa todettiin, tulisi niiden ulko- ja/tai sisäpuolella olla tuulettumaton ilmatila, jotta voitaisiin käyttää valmistajien ilmoittamia ilmatilan ja eristeen yhteisiä lämmönvastusarvoja. Mikäli heijastavaa eristekerrosta sovellettaisiin kuvan 3.19 tai 3.20 mukaisesti varsinaisen lämmöneristeen sisäpuolella, jouduttaisiin tarkasteltavaan seinärakenteeseen lisäämään koolauksia heijastavan eris-

teen asentamista varten. Tästä johtuen rakenteesta tulisi selkeästi monimutkaisempi kuin kuvan 3.31 mukainen rakenne. Heijastava eriste voitaisiin sijoittaa myös varsinaisen lämmöneristeen ulkopuolelle, mikäli varsinainen lämmöneriste olisi riittävän vesihöyrytiivis. Siitä ei kuitenkaan saada lämpöteknisesti merkittävää hyötyä, koska ilmatilalle ei voida käyttää eristeen pinnan emissiviteetin perusteella laskettua lämmönvastusarvoa. Tämä johtuu siitä, että tarkasteltavassa seinärakenteessa eristeen ulkopuolinen ilmarako luokitellaan hyvin tuulettuvaksi.

Uusien lämmöneristeiden lisäksi laskennassa käytettiin myös tavanomaisia lämmöneristeitä, kuten mineraalivillaa, grafiittia sisältävää paisutettua polystyreeniä (EPS) ja polyuretaania (PUR). Tällä tavoin materiaalikerrosten paksuuksia ja kustannusten muuttamista voitiin verrata tavanomaisten ja uudentyyppisten eristeiden välillä. Laskennassa määritettiin myös eri eristemateriaalien kombinaatioita, esimerkiksi mineraalivillaa käytettiin VIP-eristeen ulkopuolella palokatkona. Tavanomaisista eristemateriaaleista valittiin tuotteet, joiden lämmönjohtavuusarvot edustavat kyseisten materiaaliryhmien alhaisimpia arvoja. Taulukossa 3.15 on esitetty U-arvolaskuissa käytettyjen eristemateriaalien lämmönjohtavuudet ja hinnat. Kuutiohinnat eivät sisällä rahtien kustannuksia ja ovat karkeita hinta-arvioita. Eristeiden kuutiohinnat voivat vaihdella riippuen minkä paksuista eristelevyistä käytetään. PUR- ja mineraalivillaeristeiden kuutiohinnat on selvitetty eristeiden jälleenmyyjältä (K-rauta). Thermisol Platina -eristeen hinta löytyy Thermisol Oy:n Internet-sivuilta. VIP- ja aerogeeli-eristeiden hintoina on käytetty aiemmin tässä työssä esitettyjä arvoja.

**Taulukko 3.15** U-arvon laskennassa käytetyt lämmöneristemateriaalit.

Eristetyyppi	Valmistaja	Tuotenimi	Lämmönjohtavuus $\lambda_d$ (W/(mK))	Hinta (€/m <sup>3</sup> )
VIP-eristeet	Useita	Useita	0,008	3000...4000 <sup>(a)</sup>
Aerogeeli	Aspen Aerogels	Spaceline	0,014	3000
PUR	SPU Systems Oy	SPU AL	0,023	290
Grafiitti-eristeet (EPS)	Thermisol Oy	Thermisol Platina	0,031	190
Mineraalivilla				
– Tuulensuoja	Saint-Gobain Oy	ISOVER RKL 31 FACADE	0,031	370
– Julkisivueriste	Saint-Gobain Oy	ISOVER KL 33	0,033	75

(a) 30-50 mm:n paksuisilla levyillä (ohuemmat paksuudet kalliimpia)

### 3.6.2 Laskennan lähtötiedot ja oletukset

Sinkityn teräsohuttelevyn lämmönjohtavuutena käytettiin standardin (EN ISO 10456 2007) mukaista teräksen lämmönjohtavuutta 50 W/(mK). Kipsilevyn lämmönjohtavuutena käytettiin vastaavan standardin mukaista arvoa 0,25 W/(mK). Kennoelementtien sisäosat ovat tuulettumattomia tilatiloja ja niissä tapahtuvaan lämmönsiirtymiseen vaikuttaa merkittävästi tilatiloja ympäröivien materiaalien emissiviteetit. Tämän vuoksi sinkityn teräsohuttelevyn pinnan emissiviteettinä käytettiin arvoa 0,07, joka on huomattavasti pienempi kuin HEAT 2 – ohjelman oletusarvo pintojen emissiviteetiksi (0,90).

Laskennassa ei otettu huomioon mahdollisia eristeiden kiinnittämiseen tarvittavien mekaanisten kiinnikkeiden aiheuttamia lisäkonduktansseja. Niiden vaikutus lopulliseen U-arvoon riippuu kiinnikkeiden materiaalista.

Rakenteen sisäpinnan pintavastukseksi  $R_{si}$  valittiin standardin EN ISO 6946 (2007) mukainen arvo 0,13 m<sup>2</sup>K/W (taulukko 2.1). Lämmöneristeen ulkopuolista tuuletusrakoa voidaan pitää hyvin tuulettuvana, joten tilatilaa ja sen ulkopuolisia rakenteita ei oteta huomioon U-arvon laskennassa ja ulkopinnan pintavastuksena  $R_{se}$  voidaan käyttää sisäpinnan arvoa. (EN ISO 6946 2007)

Kuvan 3.31 mukaista seinärakennetta mallinnettiin 600 mm:n levyisenä, jolloin voitiin ottaa huomioon kennoelementin uumien vaikutus U-arvoon. HEAT 2 – ohjelmalla määritettiin kyseisen seinärakenteen läpäisevä lämpövirta  $q$  pituusyksikköä kohden (W/m). Lämpövirran laskennassa rakenteen yli vallitseva lämpötilaero  $\Delta T$  oli 20 °C. U-arvo (W/(m<sup>2</sup>K)) laskettiin kaavalla 3.9 seuraavasti:

$$U = \frac{q}{L\Delta T} \quad (3.9)$$

missä

$q$	on	lämpövirta pituusyksikköä kohden (W/m)
$L$	on	seinän leveys (m)
$\Delta T$	on	lämpötilaero (K)

Mallinnuksessa käytettävällä lämpötilaerolla ei ole vaikutusta seinän lopulliseen U-arvoon, sillä sen vaikutus otetaan huomioon U-arvon laskentakaavassa 3.9.

### 3.6.3 Tulokset

Taulukossa 3.16 on esitetty HEAT – ohjelmalla ja kaavalla 3.9 määritetyt U-arvot kuvan 3.31 mukaiselle seinärakenteelle eri lämmöneristevariaatioilla. Taulukon viimeisessä sarakkeessa on esitetty eristeiden neliöhinnat.

Mineraalivillan ja muiden tavanomaisten eristeiden materiaalikustannukset ovat huomattavasti alhaisemmat kuin VIP-eristettä käytettäessä. Paksuimman (170 mm) ja ohuimman (45 mm) eristekerroksen välinen paksuusero on 125 mm. Ohuimman eristekerroksen hinta on noin 7-kertainen verrattuna paksuimpaan eristekerrokseen. Vaikka hintaero on suuri, pelkästään eristeiden investointikustannuksia tarkastelemalla ei voida sulkea pois kalliimpien eristeiden käytön kannattavuutta.

**Taulukko 3.16** Kuvan 3.31 mukaiselle seinärakenteelle lasketut U-arvot ja eristeiden neliöhinnat eri lämmöneristevariaatioilla.

Lämmöneriste (ulkopinta-sisäpinta)	Eristekerroksen paksuus (mm)	U-arvo (tarkka) (W/(m <sup>2</sup> K))	U-arvo (W/(m <sup>2</sup> K))	Eristeiden hinta (€/m <sup>2</sup> )
Aerogeeli 10 mm + VIP 35 mm	45	0,1746	0,17	152,50
VIP 45 mm	45	0,1597	0,16	157,50
VIP 50 mm	50	0,1452	0,15	175,00
Tuulensuoja (villa) + VIP 35 mm	65	0,1672	0,17	133,60
PUR 35 mm + VIP 30 mm	65	0,1692	0,17	115,15
EPS 20 mm + VIP 35 mm + EPS 10 mm <sup>(a)</sup>	65	0,1710	0,17	127,00
PUR 60 mm + VIP 20 mm	80	0,1740	0,17	87,40
PUR 120 mm	120	0,1708	0,17	34,80
Grafiitti-eriste (EPS) 160 mm	160	0,1725	0,17	30,40
Tuulensuoja (villa) 30 mm + Julkisivueriste (villa) 140 mm	170	0,1710	0,17	21,60

(a) Porexthermin valmistama eriste Vacupor PS-B2 (EPS:n lämmönjohtavuutena käytetty arvoa 0,036 W/mK)

### 3.6.4 Taloudellisuus

Matalan lämmönjohtavuuden omaavien eristeiden kustannustehokkuutta voidaan tarkastella kahdella tapaa. Ensimmäinen tapa on vertailla ohuiden eristekerrosten käytöstä ulkoseinässä saatavan tilansäästön vaikutusta kokonaiskustannuksiin ottaen huomioon rakennuksen neliövuokra. Toinen tapa on vertailla lämmönjohtavuudeltaan alhaisien eristeden käytöstä saatavaa energiansäästöä suhteessa tavanomaisiin eristeisiin tilanteessa, jossa eristepaksuus on rajoitettu. Tässä kohtaa ohuiden eristekerrosten käytöstä ulkoseinässä saatavaa taloudellista hyötyä tarkastellaan tilansäästön myötä saatavien vuokratulojen kasvamisella. Vertailu tehdään taulukossa 3.16 esitetyn mineraalivillaeristeisen seinän (Tuulensuoja 30 mm + Julkisivueriste 140 mm) ja VIP-eristeisen (VIP 45 mm) seinän välillä.

Vuosittaista minimivuokravaatimusta,  $C_t$  (€/m<sup>2</sup>/a) voidaan arvioida seuraavalla kaavalla (Tenpierik & Cauberg 2006):

$$\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} \geq \frac{\Delta K_A \cdot h_{\text{kerros}}}{\delta d} \quad (3.10)$$

$C_t$	on	vuosittainen minimivuokravaatimus (€/m <sup>2</sup> /a)
$\Delta K_A$	on	eristemateriaalien kustannusero neliömetriä kohden (€/m <sup>2</sup> )
$h_{\text{kerros}}$	on	julkisivun kerroskorkeus (m)
$\delta d$	on	verrattavien eristeiden paksuuksien erotus (m)
$t$	on	aika vuosina (a)
$i$	on	korko (-)

Kaavalla 3.10 lasketut arvot ovat diskontattu nykyaikaan, eli laskelma ottaa huomioon vuosittaisen koron, jolle voidaan käyttää laskelmissa arvoa 5 %. Tarkasteluajanjaksoksi valitaan 25 vuoden ajanjakso. Muut laskennan lähtötiedot ovat seuraavat:

$$\begin{aligned} \Delta K_A &= (157,5 - 21,6) \text{ €/m}^2 = 135,9 \text{ €/m}^2 \\ h_{\text{kerros}} &= 3,6 \text{ m} \\ \delta d &= (0,170 - 0,045) \text{ m} = 0,125 \text{ m} \end{aligned}$$

Yllä olevilla lähtöarvoilla vuosittaiseksi minimivuokravaatimukseksi ( $C_t$ ) saadaan noin 278 €/m<sup>2</sup>/a. Kuukausitasolla vuokran tulee olla vähintään 23 €/kk, jotta sijoittaminen investointikustannuksiltaan kalliimpiin VIP-eristeisiin on kannattavaa 25 vuoden tarkastelujaksolla. 50 vuoden tarkastelujaksolla vuosittainen ja kuukausittainen minimivuokravaatimus ovat laskeneet arvoihin 215 €/m<sup>2</sup>/a ja 18 €/kk. Näin ollen tilansäästö voi

vuosien mittaan tehdä VIP-eristeiden käytöstä kannattavaa, vaikka investointikustannukset ovat merkittävästi suuremmat.

### 3.7 Yhteenveto ja johtopäätökset

Lämmöneristysmääräysten tiukkenemisen johdosta eristemateriaalien tuotekehitykseen on panostettu suomalaisissa eristealan yrityksissä. Tavanomaisten lämmöneristeiden kehittyminen vaikeuttaa uusien lämmöneristeiden esiintuloa Suomen rakennusmarkkinoille. Kansainvälisiltä rakennusmarkkinoilta löytyy muutama lämpötekniseltä toiminnaltaan toisistaan eroava eristetuote, joita ei ole sovellettu laajamittaisesti Suomessa.

Tyhjiöeristeet ovat tällä hetkellä alhaisimman lämmönjohtavuuden omaavia lämmöneristeitä. Eristeiden paremmuuden vertailussa tulee kuitenkin tarkastella kokonaisuutta, eikä pelkästään lämmönjohtavuusarvoa. VIP-eristeiden käyttöön liittyy kolme heikkoutta: mekaaninen kestävyys, pitkäaikaiskestävyys ja hinta. VIP-eristeiden kestävyys asettaa haasteita rakennesuunnittelulle ja toteutukselle. Se voi olla merkittävä kynnyksen niiden käytön yleistymiselle. Tosin VIP-eristeiden ominaispiirteisiin on jo sopeututtu Keski-Euroopassa, joten kysymys on lähinnä asenteiden muuttamisesta. Pitkäaikaiskestävyydestä on olemassa lähinnä laboratoriokokein ja laskennallisin tarkasteluin tehtyjä käyttöikäarvioita. Vasta todellisista rakennuskohteista saatujen pitkäaikaiskokemusten perusteella voidaan arvioida niiden todellista käyttöikää. On myös huomattava, että eristeiden vanheneminen riippuu merkittävästi myös käyttöolosuhteista. VIP-eristeiden hinnat ovat tällä hetkellä merkittävästi korkeammat kuin tavanomaisten eristeiden. Siitä huolimatta, kuten kohdan 3.6.4 yksinkertainen laskuesimerkki osoitti, muiden ohuista eristepaksuuksista saatavien hyötyjen perusteella VIP-eristeiden käyttö voi tulla taloudellisemmaksi. VIP-eristeiden käyttö tavanomaisten eristeiden rinnalla on yksi potentiaalisimmista tyhjiöeristesovelluksista. Tällöin tavanomainen eriste suojaa tyhjiöeristettä ja matalaenergiatalon tai passiivitalon U-arvoihin päästään kohutuullisilla eristepaksuuksilla. VIP-eristeiden tuotekehityksessä tulisi panostaa edellä mainittujen heikkouksien poistamiseen. Kuorikalvoista ja niiden saumoista tulisi tehdä tiiviimpiä ja halvempien ominaisuuksiltaan tämän hetkisiä runkoaineita vastaavien materiaalien kehittämiseen tulisi panostaa. Huolimatta VIP-eristeiden tämän hetkisistä heikkouksista, ovat ne tässä työssä esitellyistä lämmöneristeistä potentiaalisimpia vaihtoehtoja rakennuksen ulkovaipan varsinaiseksi lämmöneristeeksi.

Heijastavien multifoil-eristeiden soveltaminen on keskittynyt lähinnä rankarunkoisten pientalojen lämmöneristämiseen. Niiden lämmöneristävyysominaisuudet ovat osoittautuneet useiden materiaalivalmistajien ilmoittamia arvoja heikommiksi. Ristiriitaisuudet lämpöteknisissä ominaisuuksissa johtuvat erilaisista mittaustavoista. Uusien yhtenevien eurooppalaisten heijastavia lämmöneristeiden mittausta koskevien standardien tulo lopettanee multifoil-eristeiden ympärillä pyörivän keskustelun. Samalla materiaalivalmistajien ilmoittamat eristävyysarvot tulevat muuttumaan ja multifoil-eristeiden kilpailuky-

ky eristemarkkinoilla heikkenee. Multifoil-eristeitä voidaan pitää kilpailukykyisinä tavanomaisiin eristeisiin verrattuna rakenteissa, joissa eristeen molemmin puolin on tuuletettumaton ilmatila. Muussa tapauksessa multifoil-eristeiden hinta-laatu-suhde on tavanomaisia eristeitä heikompi. Multifoil-eristeiden käyttö Suomessa ei tule näillä näkymin yleistymään.

Aerogeeli-eristeiden lämmönjohtavuus on alhaisin kaikista ilmatäytteisistä lämmöneristeistä. Aerogeeli-eristeiden hinnat ovat vuosien mittaan tulleet alaspäin, mutta ne ovat vielä liian korkeat, jotta eristeitä voitaisiin käyttää varsinaisena ulkovaipan lämmöneristeenä. Ottaen huomioon aerogeeli-eristeiden korkean kuutiohinnan, joka on samaa luokkaa kuin VIP-eristeillä, ja niiden lämmönjohtavuuden (suurempi kuin VIP-eristeillä), ei niitä kannata taloudellisista syistä valmistaa paksuina kerroksina. Tällä hetkellä aerogeeli-eristeitä on taloudellista käyttää lähinnä kylmäsiltojen katkaisuun. Mikäli aerogeeli-eristeiden valmistuskustannukset saadaan tulevaisuudessa alhaisemmaksi, tulisi niistä vartenotettava lämmöneriste rakennuksen ulkovaipan lämmöneristämiseen. Tämä johtuu siitä, että niiden käytettävyys on vastaava kuin tavanomaisilla eristeillä ja lämmönjohtavuus yli puolet pienempi nykyaikaiseen mineraalivillaan verrattuna.

Valoa läpäisevät lämmöneristeet ovat hyviä vaihtoehtoja tiettyihin rakennussovelluksiin kuten ikkunoiden korvikkeiksi, sillä niiden U-arvot ovat pääsääntöisesti alhaisempia verrattuna tavanomaisiin ikkunarakenteisiin. TIM-eristeiden soveltamisen suunnittelu tulisi aloittaa arvioimalla vuotuisia valaistuskustannuksia ja niihin tulevien säästöjen suuruutta, mikäli esimerkiksi tehdasrakennuksen katto- ja/tai seinärakenteet korvattaisiin osittain valoa läpäisevillä eristeillä.

Tulevaisuudessa lämmöneristeiden kehityksessä potentiaalisia eristemateriaaleja ovat pienihuokoiset materiaalit, joilla lämmönjohtavuus on alhainen ilman eristeen sisäistä tyhjiötä, kuten aerogeeli-eristeillä. VIP-eristeiden lämmönjohtavuus on tyhjiön täytyttyä luokkaa 0,020 W/(mK) ja aerogeeli-eristeillä noin 0,014 W/(mK). Tämä osoittaa, että uusilla eristemateriaaleilla on mahdollista päästä alhaisiin lämmönjohtavuuksiin ilman eristeen sisäisen paineen alentamistakin. Huokoskokoa edelleen pienentämällä on mahdollista päästä vielä pienemmän lämmönjohtavuuden omaaviin tuotteisiin. Tähän mennessä nanohuokoisten eristeiden ongelmana ovat kuitenkin niiden suuret materiaali- ja/tai valmistuskustannukset.

Aika näyttää yleistyykö VIP- ja aerogeeli-eristeiden käyttö Suomen rakentamisessa. Vaikka niitä valmistetaan ulkomailla, on Suomessa tällä hetkellä kaksi yritystä, jotka tuovat maahan kyseisiä eristeitä. VIP-eristeiden osalta suomenkielisten sovellusohjeiden valmistuminen ja suomalaiset tuotesertifikaatit helpottavat niiden käytön omaksumista. Nähtäväksi jää onko Suomen rakentaminen valmis ottamaan vastaan uusien lämmöneristeiden tuomia mahdollisuuksia ja haasteita.



## 4 FAASIMUUTOSMATERIAALIT

### 4.1 Johdanto

Faasimuutosmateriaalit ovat materiaaleja, joilla voidaan tasata rakennuksen lämpötilaa käyttämällä hyväksi kyseisten materiaalien termodynaamisia prosesseja rakennuksen käyttölämpötila-alueella. Lämpötilan tasaaminen perustuu materiaalin kykyyn varastoida ja luovuttaa lämpöä. Suuri sulamislämpö ja sopiva sulamispiste ovat kaksi keskeisintä ominaisuutta, jotka PCM-materiaaliksi kutsutulla materiaalilla tulee olla. Rakennuksen lämpötilan noustessa päivällä PCM-materiaalin sulamispisteeseen sen kemialliset sidokset hajoavat ja materiaali muuttuu faasia kiinteästä nestemäiseksi. Sulaminen on endoterminen prosessi, joten PCM-materiaali absorboi ja varastoi lämpöä sulaessaan. Faasimuutosprosessissa materiaaliin sitoutunutta lämpöä kutsutaan latentiksi eli piileväksi lämmöksi. Sulamisen aikana materiaalin lämpötila pysyy muuttumattomana. Yöllä, rakennuksen lämpötilan laskiessa PCM-materiaalin sulamispisteen alapuolelle, materiaali jähmettyy. Jähmettyminen on eksoterminen prosessi, joten PCM-materiaali luovuttaa päivällä varastoimansa lämpöenergian huoneilmaan. (Sharma & Sagara 2005)

Faasimuutosmateriaaleja voidaan hyödyntää kahdella tavalla. Niillä on mahdollista varastoida suuria määriä lämpöä pienillä lämpötilamuutoksilla, jolloin pienellä materiaalmäärällä saadaan aikaan tavanomaisia rakennusmateriaaleja huomattavasti suurempi varastointikapasiteetti. Lisäksi niillä voidaan tasata rakennuksen lämpötilavaihteluita, mikä perustuu faasimuutoksen aikana vallitsevaan vakio­lämpötilaan (Sharma & Sagara 2005). Rakennuksessa kesällä vallitsevan vuorokautisen maksimilämpötilan esiintymisajankohtaa voidaan näin ollen siirtää myöhäisempään. Tällä voi olla toimistorakennuksen kannalta merkittävä vaikutus työskentelyolosuhteisiin tavanomaisena työaikana (8–16). Toisin sanoen PCM-materiaalien käytöllä on tarkoitus vähentää rakennuksen jäähtymisen sekä lämmityksen primäärienergian kulutusta käyttämällä hyödyksi materiaalien kykyä varastoida ja luovuttaa lämpöä.

PCM-materiaaleja voidaan integroida tavanomaisiin rakennusmateriaaleihin tai käyttää säiliömäisessä muodossa, jolloin niitä voidaan lisätä suoraan rakenteisiin. PCM-materiaalien käyttöön liittyviä sovelluksia on käsitelty tarkemmin kohdassa 4.6.

## 4.2 Tuotteiden valintakriteerit

Faasimuutosmateriaalien valinnassa tulee ottaa huomioon useita ominaisuuksia, jotta voitaisiin valita sovellukseen oikeanlainen tuote. Lämmön varastointiin tarkoitetun PCM-materiaalin tulisi täyttää lämpötekniset, kineettiset sekä kemialliset ominaisuudet, jotka esitetään seuraavaksi. Näiden lisäksi on otettava huomioon tuotteiden taloudellinen kannattavuus.

### 4.2.1 Lämpöfysikaaliset ominaisuudet

Faasimuutosmateriaalien lämpöfysikaalisen toiminnan kannalta keskeisimmät valintakriteerit ovat (Sharma & Sagara 2005; Sharma et al. 2009):

- materiaalin sulamis- ja jäähdytyspiste halutulla käyttölämpötila-alueella
- suuri sulamislämpö
- hyvä lämmönjohtavuus
- pieni tilavuuden muutos faasimuutoksessa
- yhdenmukainen toiminta
- suuri ominaislämpökapasiteetti

Lähtökohtana PCM-materiaalin valinnassa voidaan pitää sulamis- ja jäähdytyspisteeltään sopivan tuotteen valintaa. Sulamis- ja jäähdytyspiste voivat erota toisistaan muutamalla asteella PCM-materiaalin koostumuksesta riippuen. Etenkin sulamispisteen on oltava rakennuksen halutulla käyttölämpötila-alueella, jotta faasimuutos on mahdollista tapahtua. Tavanomaisessa rakennussovelluksessa PCM-materiaalin sulamispiste on oltava muutamaa astetta rakennuksen tavoitelämpötilaa eli käyttölämpötilaa korkeampi ja jäähdytyspisteen tulisi olla lähellä sulamispistettä. Mikäli PCM-materiaali jäädytetään koneellisesti, voi jäähdytyspiste olla rakennuksen käyttölämpötilaa alhaisempi. Sulamispisteen ja käyttölämpötilan välistä suhdetta käsitellään tarkemmin kohdassa 4.7.

PCM-materiaalin sulamislämmön tilavuusyksikköä kohden on oltava mahdollisimman suuri, jotta se voi varastoida tai luovuttaa riittävästi lämpöä materiaalin sulassa tai jäähdytyksessä. Sulamislämmön valinta vaatii tapauskohtaisia laskennallisia tarkasteluja, joilla varmistetaan PCM-materiaalin käytöstä saatava riittävä hyöty. Suuremman sulamislämmön omaavan tuotteen valinnalla voidaan parantaa rakenteen lämmönvaraamiskapasiteettia tai vastaavasti pienentää tarvittavaa faasimuutosmateriaalin määrää.

PCM-materiaalin suuri lämmönjohtavuus sekä kiinteässä että sulaneessa olomuodossa edistää materiaalin lämmön varastointia ja luovutusta. Lämmönjohtavuuden suuruuden

merkitys kasvaa materiaalikerroksen kasvaessa. Pienestä lämmönjohtavuudesta voi seurata, että vain rakenteen uloimmissa osissa lämpötilanvaihtelut ovat riittävät faasimuutokseen. Seurauksena voi olla faasimuutosmateriaalin vajavainen toiminta. PCM-materiaalin ja huoneilman väliset rakennekerrokset aiheuttavat lämmönvastusta, joten lämmönsiirtyminen PCM-materiaalin ja huoneilman välillä hidastuu. Näin ollen PCM-materiaalin tulisi sijaita mahdollisimman lähellä huoneilmaa, jotta lämmönsiirtyminen varmistettaisiin. Integroitaessa faasimuutosmateriaaleja tavanomaisiin rakennusmateriaaleihin on otettava huomioon runkomateriaalin lämmönjohtavuus. Lämmönjohtavuutta voidaan parantaa lisäämällä PCM-materiaaliin metallista täyteainetta olettaen, että yhteensopivuusongelmia materiaalien välillä ei esiinny. Faasimuutosmateriaaleja voidaan käyttää myös rakenteiden ulkopinnoilla auringonsäteilystä saatavan lämpöenergian varastoinnissa. Tällöin niiden toimintaperiaate on erilainen ja sitä käsitellään kohdassa 4.6.4.

Faasimuutoksesta aiheutuva PCM-materiaalin tilavuudenmuutos on oltava hallittavissa, jotta sitä voitaisiin lisätä rakennusmateriaaleihin. Lisäksi PCM-materiaalin on toimittava yhdenmukaisesti toistuvissa jähmettymis-sulamis-sykleissä.

Materiaalin ominaislämpökapasiteetti vaikuttaa lämmönvaraamiskykyyn materiaalin lämmitessä sekä kiinteässä että sulaneessa olomuodossa. Vastaavasti se vaikuttaa lämmönluovutuskykyyn materiaalin jäähtyessä. Suurella ominaislämpökapasiteetilla voidaan tehostaa faasimuutosmateriaalin varastointi- ja luovutuskykyä, mutta sen vaikutus on kuitenkin huomattavasti pienempi kuin sulamislämmön. PCM-materiaalit varastoivat 5–14 kertaa enemmän lämpöä tilavuusyksikköä kohden, kuin tavanomaiset lämmönvarastointimateriaalit, kuten vesi, betoni ja kivi. Niiden varastointikyky perustuu pelkästään ominaislämpökapasiteettiin (Sharma et al. 2009).

#### 4.2.2 Kineettiset ominaisuudet

Alan kirjallisuuden mukaan (Sharma & Sagara 2005; Sharma et al. 2009) PCM-materiaalien tulisi täyttää seuraavat kineettiset ominaisuudet:

- alijäähtyminen on estetty tai rajoitettu
- kiteytyminen tapahtuu nopeasti

Yhdeksi ongelmaksi joidenkin PCM-materiaalien, etenkin suolahydraattien, osalta on havaittu niiden taipumus alijäähtymiseen. Tämä ilmiö häiritsee eksotermisen faasimuutoksen tapahtumista, jolloin materiaali ei ala kiteytyä, vaikka sen lämpötila olisi jähmettymispisteen alapuolella. Tällöin materiaali ei luovuta varastoimaansa lämpöenergiaa huoneilmaan. Jo muutaman asteen alijäähtyminen aiheuttaa epätäydellisen faasimuutoksen, ja 5–10 °C alijäähtyminen voi estää faasimuutoksen kokonaan. PCM-materiaalin alijäähtymisen estämiseksi tulee valita sellainen tuote, jolle on ominaista nopea kitey-

tyminen faasimuutoksessa. Kiteytymistä voidaan nopeuttaa myös lisäämällä PCM-seokseen lisäaineita (nucleating agents), jotka toimivat katalyyttinä kiteytymisreaktiolle.

### 4.2.3 Kemialliset ominaisuudet

Lämmönvarastoitamiseen tarkoitettujen PCM-materiaalien tulisi täyttää seuraavat kemialliset ominaisuudet (Sharma & Sagara 2005; Sharma et al. 2009):

- pitkäaikainen kemiallinen tasapaino
  - täysin palautuva jähmettymis-sulamis-sykli
  - ei väsymistä lukuisissa jähmettymis-sulamis-sykleissä
- yhteensopivuus rakennusmateriaalien kanssa
  - materiaalien korroosio
- materiaalien turvallisuus
  - terveellisyys/myrkyllisyys
  - tulenarkuus (helposti syttyvä)
  - räjähdysherkkyys

Faasimuutosmateriaalien pitkäaikainen kemiallinen tasapaino tulee varmistaa ennen tuotteen ottamista rakennusmarkkinoille. PCM-materiaali käy elinkaarensa aikana läpi useita faasimuutossyklejä, joten kokeellisesti on osoitettava, että materiaalin toiminta ei heikkene merkittävästi ajan kuluessa. Lisäksi jähmettymis-sulamis-syklin on oltava täysin reversiibeli eli palautuva. PCM-materiaalin vanheneminen voi olla seurausta sen kemiallisesta hajoamisesta ja yhteensopimattomuudesta rakennusmateriaalien kanssa. Myös yhteensopivuus ympäröivien materiaalien kanssa on otettava huomioon, jottei aiheutuisi rakenteellisia vaurioita, kuten teräksen korroosiota.

Kaikissa rakentamiseen liittyvissä materiaalivalinnoissa on kiinnitettävä huomiota erityisesti niiden turvallisuuteen. Turvallisuuden arvioinnissa on otettava huomioon materiaalien terveellisyys, tulenarkuus ja räjähdysherkkyys. Tämä tarkastelu on tärkeä, jotta voitaisiin taata asukkaiden turvallisuus ja ympäristön vahingoittumattomuus rakennuksen ja materiaalien elinkaaren aikana.

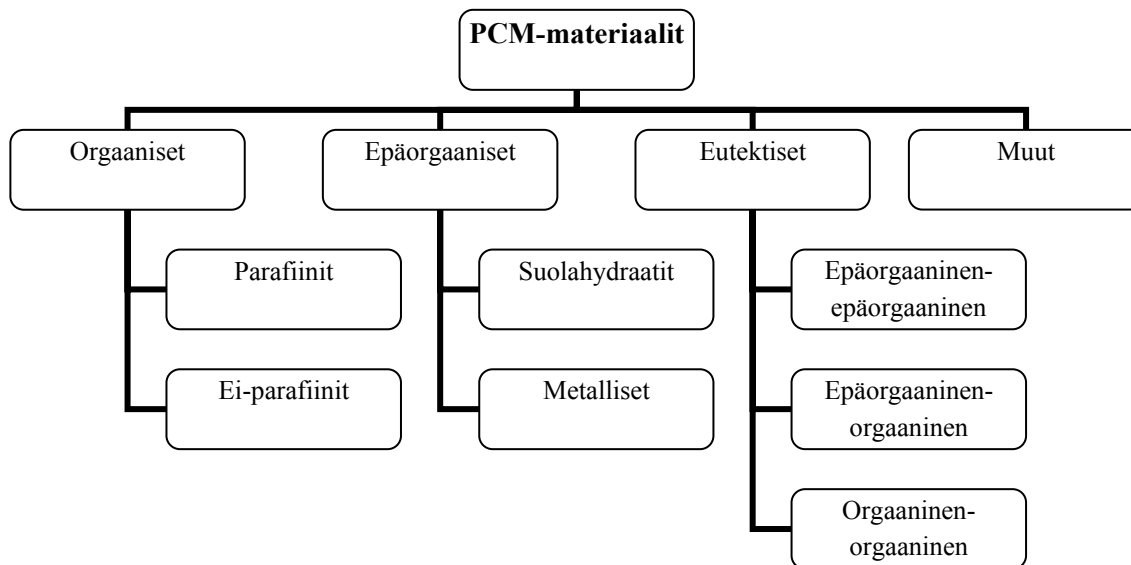
#### 4.2.4 Taloudellisuus

Faasimuutosmateriaalien käyttöönoton rakentamiseen liittyvissä sovelluksissa tulee perustua käytöstä saatavaan hyötyyn. Se voi olla taloudellista hyötyä tai faasimuutosmateriaalin käytön tuomaa rakennuksen käyttömukavuutta. Tällä hetkellä PCM-materiaalien hankintakustannukset voivat muodostua yhdeksi esteeksi niiden yleistymiselle rakennussovelluksissa. Toisaalta tuotteiden yleistyminen massatuotteeksi madaltaisi niiden hankintakustannuksia. Ratkaisuna tähän ongelmaan voitaisiin pitää muilta ominaisuuksiltaan ylivertaisen tuotteen löytymistä sekä positiivisia kokemuksia tuotteiden käytöstä.

- hyöty
  - taloudellinen
  - mukavuus
- saatavuus (massatuote)
- hinta-laatusuhde (edullisuus)

### 4.3 Tuotteiden jaottelu

Korkean sulamislämmön ja tarkoituksen mukaisen sulamispisteen perusteella on olemassa suuri joukko orgaanisia, epäorgaanisia ja eutektisia materiaaleja, jotka voidaan luokitella PCM-materiaaleiksi. Tuotteiden jaottelu on esitetty kuvassa 4.1. Sopivasta sulamispisteestä huolimatta suurin osa tuotteista ei täytä muita kappaleessa 4.2 esitettyjä valintakriteerejä. Näin ollen sopivan tuotteen valintaa voidaan pitää kompromissina, jossa etsitään kokonaisvaltaisesti toimiva ja turvallinen tuote. On huomattava, että puh- taiden faasimuutosmateriaalien sulamislämpö on selkeästi suurempi kuin niistä lisäai- neilla aikaansaatujen rakentamiseen soveltuvien tuotteiden (Koschenz & Lehmann 2004). Lisäaineilla voidaan vaikuttaa lähes kaikkiin puhtaan materiaalin ominaisuuksiin ja esimerkiksi terävöittää sulamispistettä. PCM-materiaalin yksittäisen huonon ominai- suuden vaikutusta kokonaisuuteen voidaan pienentää myös hyvällä varastoinnin suun- nittelulla. Esimerkiksi epätäydellinen faasimuutos voidaan estää sopivan paksuisen PCM-kerroksen valinnalla (Pasupathy et al. 2008). Tässä työssä esitellään yksityiskoh- taisesti näistä PCM-materiaaleista vain rakentamiseen soveltuvat kaupalliset tuotteet.



**Kuva 4.1** PCM-materiaalien jaottelu (Sharma & Sagara 2005; Pasupathy et al. 2008; Sharma et al. 2009).

### 4.3.1 Epäorgaaniset materiaalit

Epäorgaaniset materiaalit ovat olleet ensimmäiseksi mielenkiinnon kohteena tutkittaessa faasimuutosmateriaaleja. Epäorgaaniset materiaalit voidaan jakaa suolahydraatteihin ja metallisiin yhdisteisiin.

#### *Suolahydraatit*

Suolahydraatit ovat vanhimpia ja tutkituimpia lämmönvarastointiin soveltuvia faasimuutosmateriaaleja. Ne ovat epäorgaanisten suolojen ja veden seoksia, jotka muodostavat jähmettyessään kiteisen rakenteen. Sulamispisteessä hydraattikiteet hajoavat suolaksi ja vedeksi tai vähemmän vettä sisältäväksi hydraatiksi ja vedeksi. (Sharma & Sagara 2005; Sharma et al. 2009)

Suolahydraateilla on suuri määrä lämmönvarastointiin käytettävältä PCM-materiaaleilta vaadittavia ominaisuuksia. Ne ovat yleisesti ottaen halvempia ja omaavat suuremman sulamislämmön kuin orgaaniset PCM-materiaalit. Suolahydraateilla on selkeä sulamispiste ja eri sulamispisteen omaavia tuotteita on hyvin saatavilla markkinoilla. Niiden lämmönjohtavuus on myös orgaanisia materiaaleja suurempi, mikä takaa lämmönsiirtymisen PCM-materiaalin ja ympäristön välillä. Tilavuudenmuutos suolahydraattien faasimuutoksessa on selkeästi muita PCM-materiaaleja pienempää, joten lämmön varastoinnin suunnittelu on tämän vuoksi helpompaa. (Sharma et al. 2009)

Suolahydraattien käytössä on havaittu myös useita heikkouksia, jotka tulisi eliminoida, jotta niiden toiminta rakennussovellutuksissa käytettävänä PCM-materiaaleina olisi taatua. Yksi suolahydraattien toimintaan liittyvä heikkous on niiden taipumus epäyhdenmukaiseen sulamiseen. Suolahydraattien sulamisessa vapautuvan veden tulisi liuottaa suolojen kiteinen rakenne, mutta näin ei aina tapahdu, vaan vesi ja suolat jäävät erillisiksi faaseiksi. Nestemäisen ja kiinteän aineen erilaisten tiheyksien johdosta suolahydraateissa esiintyy erottumista, eli suolat vajoavat pohjimmaiseksi. Erottuminen aiheuttaa epäyhdenmukaisuutta PCM-materiaalin toimintaan. (Pasupathy et al. 2008; Sharma et al. 2009)

Suolahydraattien jähmettymiseen liittyvänä ongelmana on niiden taipumus alijäähtymiseen, eli materiaalin pysyminen nestemäisessä muodossa jähmettymispisteen alapuolella. Alijäähtyminen liittyy läheisesti edellä mainittuun materiaalien erottumiseen nestemäisessä muodossa. Materiaalin kiteytymistä voidaan nopeuttaa katalyyttina toimivilla lisäaineilla. Yleensä suolahydraatit vaativat lisäaineita pitkäaikaiskestävyyttä varten. Suolahydraattien pitkäaikaiskestävyys voi heiketä merkittävästi, mikäli sen toiminnan kannalta välttämätön vesi pääsee vuotamaan materiaalia suojaavasta säiliöstä. Suola-

hydraatit korrosoivat metalleja, mikä tulee ottaa huomioon niiden käytön suunnittelussa. (Pasupathy et al. 2008; Sharma et al. 2009)

### Metalliset yhdisteet

Tämä kategoria sisältää matalassa lämpötilassa sulavia metalleja sekä metallia sisältäviä eutektisia seoksia. Näiden tuotteiden kehittämiseen ei ole keskitytty PCM-teollisuudessa niiden suuren massan vuoksi. Mikäli käytettävän PCM-materiaalin tilavuus on rajoitettu voivat metalliset materiaalit olla kilpailukykyisiä, koska niiden sulamislämpö tilavuusyksikköä kohden on suuri. Metallisten PCM-materiaalin lämmönjohtavuus on huomattavasti suurempi verrattuna muihin, tavanomaisempiin PCM-materiaaleihin. Tässä työssä ei löydetty rakentamiseen liittyviä sovelluksia, joissa olisi käytetty näitä materiaaleja.

### **4.3.2 Orgaaniset materiaalit**

Epäorgaanisten materiaalien käytössä havaittujen ongelmien vuoksi alettiin tutkia myös orgaanisia PCM-materiaaleja. Orgaaniset materiaalit voidaan jakaa parafiineihin ja ei-parafiineihin.

### Parafiinit

Parafiinivahat koostuvat pääosin suoraketjuisista alkaaneista  $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)-CH}_3$  eli n-alkaaneista. Ne kuuluvat tyydyttyneiden hiilivetyjen perheeseen, joiden ominaisuudet ovat hyvin samanlaisia.  $(\text{CH}_3)$ -ketjun kiteytymisessä vapautuu suuri määrä latenttia lämpöä. Sekä sulamispiste että sulamislämpö kasvavat hiilivetyjen ketjupituuden kasvaessa. Parafiinit välillä  $\text{C}_5\text{--C}_{15}$  ovat nestemäisiä ja loput ovat kiinteitä vahoja. (Sharma & Sagara 2005; Sharma et al. 2009)

Parafiinivahat ovat kaikkein käytetyimpiä kaupallisia faasimuutosmateriaaleja ja niitä on saatavilla sulamispisteeltään laaja valikoima. Kaupallinen parafiinivaha syntyy raakaöljyn tislauksessa. Se ei ole puhdas aine, vaan erilaisten hiilivetyjen kombinaatio. Ne ovat yleensä kalliimpia kuin suolahydraatit, mutta halvempia kuin ei-parafiinit.

Parafiinit omaavat lukuisia hyviä ominaisuuksia, jonka vuoksi ne ovat myös yleisesti käytettyjä lämmönvarastointimateriaaleja. Parafiinien lämmönvarastointikapasiteetti tilavuusyksikköä kohden on kilpailukykyinen, mutta matalampi kuin epäorgaanisilla materiaaleilla. Ne ovat yleisesti ottaen turvallisia, luotettavia, korroosiota aiheuttamattomia ja kemiallisesti stabiileja, vaikkakin osan tuotteista on havaittu hapettuvan hapen läsnä ollessa, joten ne vaativat suljetun säiliön. Lisäksi niiden on havaittu olevan termisiltä ominaisuuksiltaan pitkäikäisiä eikä alijäähdytystä esiinny. (Sharma et al. 2009)



Kuten muidenkin ryhmien PCM-materiaaleilla, myös parafiineilla on heikkouksia liittyen niiden käyttöön rakennussovellutuksissa. Kaikkein suurimpana heikkoutena voidaan pitää niiden valmistuksessa, raakaöljyn tislauksessa, syntyvää sivutuotetta, joka on helposti syttyvä. Parafiinien lämmönjohtavuus, varsinkin kiinteässä olomuodossa, on alhainen. Yleisesti parafiinien lämmönjohtavuudet ovat luokkaa 0,2–0,6 W/(mK). Parafiinien tilavuuden muutos faasimuutoksessa on kohtalaisen suuri. Tämä tulee ottaa huomioon materiaalia suojaavan kapselin suunnittelussa. Toisin kuin suolahydraateilla, parafiineilla ei ole terävää, tarkkaan määritettyä sulamispistettä, vaan niitä käsitellessä voidaan puhua sulamis- ja jähmettymisalueesta. Kaikki edellä mainitut parafiinien heikkoudet voidaan osittain eliminoida muuntelemalla niiden koostumusta lisäaineilla ja oikein suunnitelluilla varastointijärjestelyillä. (Koschenz & Lehmann 2004; Sharma et al. 2009)

### Ei-parafiinit

Orgaanisten ei-parafiinien ryhmään sisältyy suuri määrä faasimuutosmateriaaleja. Jokaisella näistä materiaaleista on hyvin yksilölliset tarkasta koostumuksesta riippuvat ominaisuudet toisin kuin parafiineilla, joiden ominaisuudet ovat keskenään hyvin samanlaiset. Tämä ryhmä sisältää suurimman määrän tutkimuksissa lämmön varastointiin kehitettyjä materiaaleja. (Sharma et al. 2009)

Abhat et al. (1981) sekä Buddhi & Sawhney (1994) ovat suorittaneet kattavan tutkimuksen orgaanisiin materiaaleihin liittyen ja yksilöineet useita lämmön varastointiin soveltuvia estereitä kuten rasvahappoja (fatty acids), alkoholeja (alcohol's) ja glykoleja (glycol's) (ks. Sharma et al. 2009). Rasvahapoista on tullut oma alaryhmä orgaanisissa PCM-materiaaleissa.

Näiden orgaanisten materiaalien hyvänä puolena voidaan pitää suurta sulamislämpöä verrattuna parafiineihin. Lisäksi muun muassa rasvahapot ovat stabiileja toistuvissa jähmettymis-sulamis-sykleissä eikä niillä ole taipumusta alijäähtymiseen. Ei-parafiineilla on useita heikkouksia, jonka vuoksi niiden käyttö lämmönvarastointimateriaaleina ei ole yleistynyt tutkimuksista käytäntöön. Ei-parafiinit omaavat matalan lämmönjohtavuuden, ne ovat helposti syttyviä, omaavat matalan syttymispisteen ja ovat epästabiileja korkeissa lämpötiloissa. Lisäksi tuotteiden myrkyllisyysasteet vaihtelevat tuotekohtaisesti eikä niitä tule altistaa hapettimille. Ei-parafiinien, erityisesti rasvahappojen, merkittävimpänä heikkoutena on niiden korkea hinta. Ne ovat keskimäärin 2–2,5 kertaa kalliimpia kuin parafiinit. (Sharma et al. 2009)

### 4.3.3 Eutektiset materiaalit

Eutektiset materiaalit koostuvat kahdesta tai useammasta aineesta, joilla kaikilla on tarkoin määrätty sulamis- ja jähmettymispiste. Eutektisen seoksen jähmettyessä syntyy yhtenevä kiteinen rakenne, joka toimii sulamispisteeltään yhtenäisesti. Eutektisen materiaalin ainesosien mooliosuudet on valittu sellaiseksi, että lopullisen seoksen sulamispiste olisi mahdollisimman alhainen. (Sharma et al. 2009)

Yleisesti ottaen PCM-materiaalin sulamislämpö on sitä korkeampi mitä korkeampi sen sulamispiste on. Näin ollen jonkun tietyn muilta ominaisuuksiltaan sopivan materiaalin sulamislämpöä voidaan kasvattaa toisella korkeamman sulamislämmön omaavalla materiaalilla.

Eutektisilla materiaaleilla on selkeä sulamispiste, toisin kuin parafiineilla. Lisäksi niillä on hieman orgaanisia materiaaleja suurempi sulamislämpö, joka aikaansaadaan esimerkiksi orgaanisen ja epäorgaanisen materiaalien seoksella. Eutektisten materiaalien ominaisuudet riippuvat hyvin paljon niihin valittujen ainesosien ominaisuuksista ja pitoisuuksista, joten niitä on vaikea yleistää koko ryhmää kuvaavaksi. Tutkimustietoa Eutektisten materiaalien lämpöfysikaalisista ominaisuuksista ja käytöstä lämmönvarastoinnissa on saatavilla rajoitetusti. (Pasupathy et al. 2008; Sharma et al. 2009)

### 4.3.4 Yhteenveto

Taulukkoon 4.1 on koottu keskeisimmät orgaanisten, epäorgaanisten ja eutektisten PCM-materiaalien edut ja haitat. Tuotteiden ominaisuudet voivat vaihdella näiden ryhmien sisälläkin merkittävästi, kuten parafiineilla ja ei-parafiineilla, joten ne ovat suuntaa antavia. Taulukon edut ja haitat ovat puhtaasti orgaanisien ja epäorgaanisien aineiden ominaisuuksia. Sopivia lisäaineita käyttämällä puhtaiden aineiden huonoja ominaisuuksia voidaan ehkäistä. Taulukkoa voidaankin pitää ohjeellisena, tuotteiden valintaa helpottavana. Orgaanista tai epäorgaanista PCM-materiaalia valittaessa tulee materiaali-valmistajalta selvittää, kuinka taulukossa esitetyt haitat on ratkaistu.

**Taulukko 4.1** PCM-materiaalien ominaisuuksien vertailu (Zalba et al. 2003; Pasupathy et al. 2008).

	<b>Edut</b>	<b>Haitat</b>
<b>Orgaaniset</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ sulamispisteeltään runsas saatavuus</li> <li>+ helppo käyttää</li> <li>+ ei aiheuta korroosiota</li> <li>+ ei alijäähtymisongelmaa</li> <li>+ yhdenmukainen sulaminen</li> <li>+ ei kiteytymisaineita</li> <li>+ kemiallisesti ja termisesti stabiileja</li> <li>+ kilpailukyky tavanomaisten materiaalien kanssa</li> <li>+ kierrätettäviä</li> <li>+ turvallisia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– yleisesti kalliimpia</li> <li>– matalampi lämmönvarastointikyky (sulamislämpö)</li> <li>– matala lämmönjohtavuus kiinteässä muodossa (vaaditaan suuri lämmönsiirtyminen jähmettymisessä)</li> <li>– usein melko laaja sulamislämpötila-alue</li> <li>– voivat olla tulenarkoja (voidaan lieventää oikeanlaisella suojauksella/säiliöllä)</li> </ul>
<b>Epäorgaaniset</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ yleensä halpoja ja hyvin saatavilla</li> <li>+ suuri lämmönvarastointikyky (sulamislämpö)</li> <li>+ selkeä ja säädettävissä oleva sulamispiste</li> <li>+ korkea lämmönjohtavuus</li> <li>+ tilavuudenmuutokset pieniä</li> <li>+ palamattomia</li> <li>+ biohajoavia ja kierrätettäviä</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– tarvitsevat lisäaineita pitkäaikaiskestävyyttä varten</li> <li>– taipumus alijäähtymiseen</li> <li>– voivat aiheuttaa korroosiota metalleille</li> <li>– lämpötekniisesti epästabiileja</li> </ul>
<b>Eutektiset</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ selkeä sulamispiste</li> <li>+ hieman orgaanisia yhdisteitä suurempi lämmönvarastointikyky (sulamislämpö)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– tutkimustietoa saatavilla vain rajoitusti näiden tuotteiden lämpöfysikaalisista ominaisuuksista ja toimivuudesta lämmönvarastoinnissa</li> </ul>

## 4.4 Kapselointi

Yksi taloudellisimmista tavoista käyttää PCM-materiaaleja tavanomaisissa rakennusmateriaaleissa on sisällyttää ne sellaisenaan nestemäisessä tai pulverimaisessa muodossa rakennusmateriaaleihin, kuten betoniin tai kipsilevyyn, niiden tuotannon aikana. Toinen taloudellinen menetelmä on kyllästää tavanomainen huokoinen rakennusmateriaali, esimerkiksi tiili tai kevytbetoni, PCM-materiaalilla upottamalla se sulaan PCM-liuokseen.

Edellä mainittujen menetelmien käyttö sellaisenaan ei ole yleensä mahdollista erilaisten ongelmien vuoksi. Tavanomaisten rakennusmateriaalien ja PCM-materiaalien välisten yhteensopivuusongelmien välttämiseksi voidaan PCM-materiaali kapseloida ennen sen sisällyttämistä rakennusmateriaaliin tai rakenteeseen. Kapseli on eräänlainen säiliö, joka muodostaa faasimuutosmateriaalia tukevan rakenteen. Näin ollen kapselointi on perusteltua myös PCM:n sulamisesta aiheutuvan vetelöitymisen ja valumisongelmien vuoksi. Sekä orgaaniset parafiinivahat että epäorgaaniset suolahydraatit joudutaan yleensä kapseloimaan vetelöitymisen ja/tai yhteensopivuusongelmien vuoksi. Kapselointi nostaa lopullisia materiaalikustannuksia verrattuna puhtaaseen PCM-materiaaliin. Kapselointiin käytetyn materiaalin tulisi täyttää useita vaatimuksia, jotta se ei heikennä itse PCM-materiaalin toimintaa. Seuraavassa on lueteltu ominaisuuksia, jotka kapselointimateriaalin tulisi täyttää (Regin et al. 2008):

- Kapselimitriaalin tulee olla riittävän vahvaa sekä joustavaa ja sen tulee olla yhteensopiva itse PCM-materiaalin kanssa.
- Materiaalin tulee estää PCM-materiaalin ja ympäröivien materiaalien mahdolliset komplikaatiot.
- Materiaalin tulee olla diffuusiotiivistä, jolloin PCM-materiaalin sisältämä vesi ei pääse haihtumaan tai vettä ei pääse kertymään lisää tuotteeseen. Jos näin käy, muuttuvat tuotteen materiaalien seossuhteet ja näin ollen sen toiminta.
- Materiaalin lämmönjohtavuuden tulee olla suuri, jotta lämmönsiirtyminen PCM-materiaalin ja ympäröivän ilman tai materiaalien välillä on mahdollista.
- Materiaalin tulee olla muodossa pysyvää sekä pitkäikäistä.
- Materiaalin tulee olla helposti ja turvallisesti käsiteltävää.

PCM-materiaalien kapselointi voidaan jakaa kahteen ryhmään: mikro- ja makrokapselointiin.

#### 4.4.1 Makrokapselointi

Makrokapselointi on tyypillisin kapselointimenetelmä, jossa huomattava määrä PCM-materiaalia sisällytetään erilliseen säiliömäiseen kapseliin. Yhden kapselin sisältämän PCM-materiaalin massa voi vaihdella muutamasta grammasta aina useisiin kiloihin asti. Tyypillisesti makrokapseloina käytettävät säiliöt ovat muodoltaan säkkejä, levyjä, putkia, paneeleja tai pallomaisia, mutta käytännössä niitä voidaan tehdä minkä muotoisia tahansa. Kuvassa 4.2 on esitetty tyypillisiä makrokapseloituja tuotteita. Kustannustehokkaimpia kapselimateriaaleja ovat muovit, tinalla päällystetyt metallikapselit ja niukahiiliset seostamattomasta teräksestä valmistetut kapselit. Viimeksi mainituissa korrosio voi aiheuttaa ongelmia, mikäli kapselointia ei ole pintakäsittely sekä sisä- että ulkopuolelta tarkoituksen mukaisella käsittelyllä. (Regin et al. 2008)

Makrokapseloituja tuotteita voidaan käyttää rakentamisessa hyväksi kahdella tapaa: joko lisäämällä tuotteet rakenteisiin tai käyttämällä massavarastoja. Kokoluokaltaan kuu- tion kokoiset massavarastot ovat säiliöitä, jotka sisältävät makrokapseloituja PCM-materiaaleja lämmön varastointiin ja vettä lämmön siirtymisen varmistamiseksi kapselien välillä. Massavarastot liittyvät lämmön pidempiaikaiseen varastointiin, joten niitä ei tarkastella tässä työssä tarkemmin.

Edellä mainittujen kapseloinnista saatavien hyötyjen lisäksi makrokapseloinnin vahvuutena voidaan pitää kapseloitujen tuotteiden monikäyttöisyyttä rakenteissa sekä helppoa käsiteltävyyttä.

Makrokapseloitujen tuotteiden käytössä on myös heikkouksia. Makrokapseloitujen tuotteiden kapselit on pidettävä ehjinä sekä rakennus- että käyttövaiheessa. Se aiheuttaa rajoituksia rakenteisiin tehtäviin porauksiin ja naulauksiin. Tuotteiden integrointi voi aiheuttaa rakentamisessa lisätyövaiheita ja -rakenteita, jotka nostavat rakennuskustannuksia. Yhtenä keskeisenä makrokapselointiin liittyvänä ongelmana voidaan pitää PCM-materiaalin heikkoa lämmönjohtavuutta, joka rajoittaa lämmönsiirtymistä PCM-materiaalin ja ympäröivän ilman välillä. (Schossig et al. 2005; Zhang et al. 2007) Tämä asettaa rajoituksia käytettävien makrokapselien dimensiolle; kapselin paksuuden kasvattaminen kaksinkertaiseksi ei paranna todellista lämmönvarastointikapasiteettia kaksinkertaiseksi. Tämän vuoksi makrokapselien paksuudet tulisi rajoittaa tapauskohtaisesti ja lämmönvarastointikapasiteettia parantaa kapselipinta-alaa lisäämällä.



**Kuva 4.2** Tyypillisiä makrokapseloituja PCM-tuotteita. Ylärivissä vasemmalta: PCM-pussi (Climator Sweden AB), muovinen ”tankki” ja foliopäällysteinen levy (EPS Ltd). Alarivissä vasemmalta: PCM-muoviputki, rakeita ja palloja (EPS Ltd).

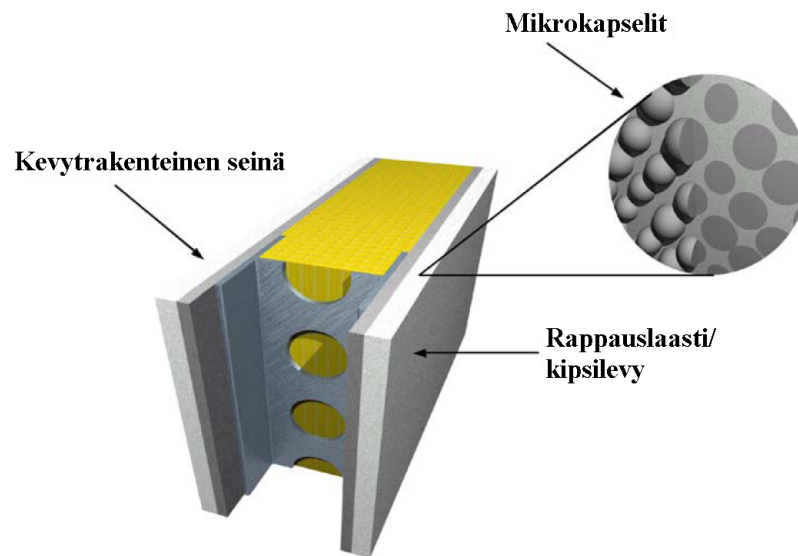
#### 4.4.2 Mikrokapselointi

Mikrokapselointi eroaa makrokapseloinnista kokonsa puolesta, sillä mikrokapseloinnissa kapselien koot vaihtelevat välillä 1–300  $\mu\text{m}$ , ollen tavallisesti luokkaa 8  $\mu\text{m}$ . Mikrokapseloinnissa pienet pallon tai sauvan muotoiset PCM-partikkelit kapseloidaan ohuella polymeerisellä kalvolla, joka on yhteensopiva sekä PCM-materiaalin että rakennusmateriaalien kanssa. (Zhang et al. 2007)

Mikrokapseloidut PCM-partikkelit voidaan sisällyttää kokonsa puolesta tavanomaisiin rakennusmateriaaleihin, kuten kipsilevyyn ja rappauslaastiin. Tällöin tavanomainen rakennusmateriaali toimii lämmönjohtimena lämpövarastona toimivien mikrokapseloitujen partikkelien välillä. Mikrokapseloitujen tuotteiden välisestä heikosta lämmönjohtavuudesta johtuen ne eivät sovellu käytettäväksi suurena massana samalla tavalla, kuin makrokapseloitujen tuotteiden sisältämä puhdas PCM-materiaali. Kuvassa 4.3 on esitetty semaattisesti mikrokapseloitujen PCM-partikkeleiden integrointiperiaate tavanomaiseen rakennusmateriaaliin ja kuvassa 4.4 on esitetty mikroskooppikuva kipsimassasta, joka sisältää PCM-partikkeleita.

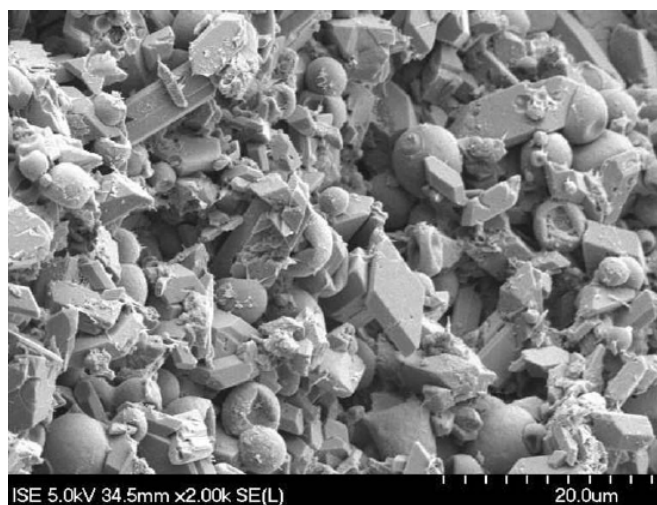
PCM-materiaaleja sisältävien mikrokapseleiden sisällyttämisessä rakennusmateriaaleihin tulee ottaa huomioon niiden vaikutus itse runkomateriaalin lujuuteen. Tämä on erityisen tärkeää, mikäli tuotteita lisätään kantaviin rakenteisiin, esimerkiksi betoniin. Mikrokapseloinnilla voidaan edellä mainittujen hyötyjen lisäksi rajoittaa PCM:n tilavuudenmuutoksia faasimuutoksissa sekä kasvattaa lämmön siirtymisen pinta-alaa. Yhtenä merkittävänä mikrokapseloinnin heikkoutena on sulamislämmön heikkeneminen kapseloinnissa verrattuna puhtaaseen PCM-materiaaliin. Sulamislämmön heikkenemi-

nen johtuu puhtaan PCM-materiaalin tilavuuden vähenemisestä kapselimateriaalin lisäyksen johdosta (noin 20–25 % tilavuudesta) ja mikrokapselien välisien ilmaonteloiden (noin 5 % tilavuudesta) johdosta (Koschütz & Lehmann 2004). Partikkelien väliset, eristeenä toimivat ilmaontelot ovat yksi syy mikrokapseloitujen tuotteiden väliseen heikkoon lämmönjohtavuuteen. Tunnetuin rakentamiseen soveltuvien mikrokapseloitujen PCM-tuotteiden valmistaja on BASF, jonka tuotteita esitellään tarkemmin kohdassa 4.5.5. Vertaamalla yrityksen tuotteita muihin kappaleessa 4.5 esitettyihin puhtaan PCM-materiaalin valmistajien tuotteisiin havaitaan edellä mainittu sulamislämmön heikkeneminen.



**Kuva 4.3**

Semaattinen kuva kevytrakenteisesta seinästä, jonka rappauslaastissa/kipsilevyssä on käytetty mikrokapseloituja PCM-rakeita (Schossig et al. 2005).



**Kuva 4.4**

SEM-kuva (scanning electron microscope) kipsimassaan sekoitetuista pallomaisista PCM-mikrokapseleista. Ne ovat halkaisijaltaan noin 8  $\mu\text{m}$ . (Schossig et al. 2005)

## 4.5 Kaupalliset tuotteet

Tässä kappaleessa esitellään markkinoilla olevia PCM-materiaaleja ja materiaalivalmistajia, joiden tuotevalikoimasta löytyy sulamispisteeltään rakennuksen käyttölämpötila-alueelle sijoituvia tuotteita. Näiden tuotteiden käyttösovelluksia käsitellään tarkemmin kappaleessa 4.6. Seuraavassa esitettävien tuotteiden tiedot on haettu materiaalivalmistajien Internet-sivuilta ja niitä on täydennetty materiaalivalmistajien kanssa käytyjen sähköpostiviestien perusteella. Materiaalivalmistajien ilmoittamat tuoteominaisuudet ovat osittain puutteellisia ja niiden sanotaan olevan tapauskohtaisia. Näin ollen todellisia PCM-materiaalien käyttökohteita suunniteltaessa tulee olla tiiviissä yhteydessä materiaalivalmistajiin. Yhteenveto tähän tutkimukseen valittujen faasimuutosmateriaalien keskeisimmistä ominaisuuksista on esitetty kohdassa 4.5.8.

Kaupallisten tuotteiden lopulliset ominaisuudet eroavat tutkimuksissa käytetyistä puhtaista PCM-materiaaleista. Kuten aikaisemmin mainittiin, PCM-materiaalien ominaisuuksien optimoiminen rakentamiseen soveltuvaksi heikentää niiden sulamislämpöä. Taulukossa 4.2 on esitetty esimerkkinä PCM-parafiinin, nimeltään heptadekaani, sulamislämmön muuttuminen tuotteen sulamispistettä terävöitettäessä, tuotteen muuttamisessa rakentamiseen soveltuvaksi ja mikrokapseloinnissa. Taulukosta nähdään, että lopullisen mikrokapseloidun tuotteen sulamislämpö on laskenut puoleen puhtaan materiaalin sulamislämmöstä. (Koschenez & Lehmann 2004)

**Taulukko 4.2** Puhtaan PCM-parafiinin, heptadekaanin ( $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_{15} - \text{CH}_3$ ), sulamislämmön muuttuminen käsiteltäessä sitä rakentamiseen soveltuvaksi (Koschenez & Lehmann 2004).

Tyyppi	Sulamislämpö (kJ/kg)
Puhdas heptadekaani, sisältää koko sulamisalueen	214
Puhdas heptadekaani, sulamispiste ainoastaan 20 °C	177
Rakentamiseen soveltuva (technical grade) heptadekaani, sulamispiste ainoastaan 20 °C	148,3
Rakentamiseen soveltuva (technical grade) heptadekaani, mikrokapseloinnin jälkeen	110



### 4.5.1 Rubitherm GmbH

Rubitherm on saksalainen yritys, joka on erikoistunut lämmönvarastointiin tarkoitettuihin PCM-materiaaleihin. Yrityksen toimintaan kuuluu suolahydraatti- ja parafiinipohjaisten PCM-tuotteiden sekä kapseloitujen tuotteiden valmistus ja jakelu. Lisäksi yritys kehittää ja sovittaa PCM-materiaaleja asiakkaan haluamiin tuotteisiin ja profiileihin.

#### 4.5.1.1 RT-parafiinit

Rubitherm RT on parafiini- ja vahapohjainen faasimuutosmateriaali, jonka energianvarastointikapasiteetti perustuu kiinteä-neste -faasimuutokseen.

Valmistajan ilmoittamat ominaisuudet:

- suuri lämmönvarastointikyky
- faasimuutoslämpötiloissa vain pientä vaihtelua
- ei alijäähtymistä
- ekologisesti turvallinen ja täysin kierrätettävä
- myrkytön
- pitkäikäinen
- kemiallisesti reagoimaton
- vakaa toiminta toistuvissa sulamis-jähmettymis -sykleissä
- helppo käsitellä
- saatavilla sulamispisteeltään erilaisia tuotteita
- viskositeetti ja tiheys kasvavat lisäaineilla, mikä vähentää tuotteen vetistymistä sulamisessa



**Kuva 4.5** Rubitherm RT parafiini (Rubitherm GmbH).

Sulamispisteeltään Rubithermin RT-parafiinit ovat välillä -4–100 °C. Tavanomaisen toimistorakennuksen käyttölämpötila-alueelle soveltuvat tuotteet ovat RT 21 ja RT 27. Niitä voidaan käyttää muun muassa säkkeihin kapseloituna tuotteina rakenteissa, kuten alaslasketuissa katoissa.

Materiaalivalmistajan Internet-sivuilla on saatavissa tuote-esitteet ja käyttöturvallisuustiedote, jonka mukaan vesisuihku ei sovellu RT-parafiinien sammuttamiseen. Sen tilalla tulee käyttää vesisumutusta tai muita käyttöturvallisuustiedotteessa esitettyjä vaihtoehtoisia menetelmiä. Käytetyt RT-parafiinit voidaan käyttää uudelleen jälleenkäsittelyn jälkeen tai hyödyntää termisesti muissa sovelluksissa. Tuotteiden hävittäminen tulee tehdä paikallisten jätehuoltomääräysten mukaisesti. Seuraavassa on esitetty RT-parafiinien ominaisuuksia:

### Rubitherm RT 21

Sulamispiste:	18–23 °C (tyypillisesti 21 °C)
Jähmettymispiste:	22–19 °C (tyypillisesti 22 °C)
Lämmönvarastointikapasiteetti:	134 kJ/kg (lämpötilaväli: 15–30 °C)
Tiheys:	880 kg/m <sup>3</sup> (kiinteänä, 15 °C) 770 kg/m <sup>3</sup> (sulana, 25 °C)
Tilavuudenmuutos:	14 %
Lämmönjohtavuus:	0,20 W/(mK)
Syttymispiste:	154 °C
Hinta (ei sis. ALV:a ja pakkausta):	6,50 €/kg (1–640 kg)
Korroosio:	Kemiallisesti reagoimaton useimpien materiaalien kanssa.

### Rubitherm RT 27

Sulamispiste:	25–28 °C (tyypillisesti 27 °C)
Jähmettymispiste:	28–25 °C (tyypillisesti 27 °C)
Lämmönvarastointikapasiteetti:	179–184 kJ/kg (lämpötilaväli ≤ 15 °C)
Tiheys:	880 kg/m <sup>3</sup> (kiinteänä, 15 °C) 760 kg/m <sup>3</sup> (sulana, 40 °C)
Tilavuudenmuutos:	16 %
Lämmönjohtavuus:	0,20 W/(mK)
Syttymispiste:	164 °C
Hinta (ei sis. ALV:a ja pakkausta):	6,20 €/kg (1–640 kg)
Korroosio:	Kemiallisesti reagoimaton useimpien materiaalien kanssa.

#### 4.5.1.2 SP (suolahydraattiparafiini)

Rubitherm SP on suolahydraatin ja orgaanisen parafiinin yhdiste, jolla on sekä puhtaan suolahydraatin että parafiinin ominaisuuksia.

Valmistajan ilmoittamat ominaisuudet:

- suuri lämmönvarastointikyky
- vakaa toiminta toistuvissa sulamis-jähmettymis-sykleissä
- alijäähtyminen on rajoitettua
- ei herkästi syttyvä
- myrkytön



**Kuva 4.6** Rubitherm SP (suolahydraatti-parafiiniseos) (Rubitherm GmbH).

Sulamispisteeltään Rubithermin SP-tuotteet ovat välillä 18–29 °C. Tavanomaisen toimistorakennuksen käyttölämpötila-alueelle soveltuvat tuotteet ovat SP 22 A17 ja SP 25 A8. Niitä on sovellettu massiivisessa energian varastointimoduulissa, joka sisältää suuren määrän 15 mm paksuja SP-tuotteilla täytettyjä levyjä. Lisätietoa moduulin toimintaperiaatteesta on saatavilla materiaalivalmistajalta.

Materiaalivalmistajan Internet-sivuilla olevan käyttöturvallisuustiedotteen mukaan vesisuihku ei sovellu myöskään SP-tuotteiden sammuttamiseen. Sen tilalla tulee käyttää vesisumutusta tai muita käyttöturvallisuustiedotteessa esitettyjä vaihtoehtoisia menetelmiä. Valmistajan mukaan tuotteissa ei ole havaittu ominaisuuksien heikkenemistä toistuvissa jäätymis-sulamis-sykleissä. Käytöstä poistettavien tuotteiden hävittäminen tulee tehdä paikallisten jätehuoltomääräysten mukaisesti. Seuraavassa on esitetty SP-tuotteiden ominaisuuksia:

### **Rubitherm SP 22 A17**

Sulamispiste:	22–24 °C (tyypillisesti 23 °C)
Jähmettymispiste:	21–19 °C (tyypillisesti 20 °C)
Lämmönvarastointikapasiteetti:	150 kJ/kg (lämpötilaväli: 13–28 °C)
Tiheys:	1490 kg/m <sup>3</sup> (kiinteänä, 15 °C) 1430 kg/m <sup>3</sup> (sulana, 35 °C)
Tilavuudenmuutos:	4,03 % (faasimuutos ja $\Delta T = 20$ °C)
Lämmönjohtavuus:	0,60 W/(mK)
Hinta (ei sis. ALV:a ja pakkausta):	5,50 €/kg (1–1000 kg)
Korroosio:	Korrosoiva/syövyttävä metallin suhteen.

### **Rubitherm SP 25 A8**

Sulamispiste:	26 °C
Jähmettymispiste:	25 °C
Lämmönvarastointikapasiteetti:	180 kJ/kg (lämpötilaväli: 15–30 °C)
Ominaislämpökapasiteetti:	2,5 kJ/(kgK)
Tiheys:	1380 kg/m <sup>3</sup> (kiinteänä, -15 °C)
Tilavuudenmuutos $\gamma$ :	0,001 1/°C ( $\Rightarrow$ 0,1 %, kun $\Delta T = 1$ °C)
Lämmönjohtavuus:	0,60 W/(mK)
Hinta (ei sis. ALV:a ja pakkausta):	5,50 €/kg (1–1000 kg)
Korroosio:	Korrosoiva/syövyttävä metallin suhteen

### 4.5.2 Climator Sweden AB

Climator on ruotsalainen yritys, joka on kehittänyt, valmistanut ja myynyt PCM-tuotteita nimeltä ClimSel vuodesta 1980 lähtien. ClimSel-tuotteet ovat tarkoitettu hallittuun lämmönvarastointiin ja -luovutukseen.

Climatorin ClimSel-tuotteet koostuvat natriumsulfaatista, vedestä ja lisäaineista. Ne luokitellaan edellä mainitun faasimuutosmateriaalien luokituksen mukaan epäorgaanisten suolahydraattien ryhmään. Niiden käyttökohteeksi materiaalivalmistaja ilmoittaa muun muassa toimistojen passiivisen viilentämisen. Sulamislämmöltään oikean tuotteen valinta riippuu sekä halutusta lämpötilasta rakennuksessa että PCM-materiaalin mahdollisesta jäähdystystavasta. Suurimmassa osassa toimistorakennuksiin tehdyissä asennuksissa on käytetty ClimSel C21-22 tai C24 -tuotteita. ClimSel-tuotteiden käytön suunnittelussa tulee ottaa huomioon niiden alijäähtyminen, jonka suuruudeksi materiaalivalmistaja ilmoittaa noin 4 °C.

Tuotteita on saatavilla makrokapseloituina säkkeinä ja levyinä, jotka on pakattu diffuusiotiiviiseen kuoreen. Diffuusiotiivis kuori suojaa PCM-materiaalin seossuhteita muuttumasta. Kuorimateriaali koostuu alumiinista tai ruostumattomasta teräksestä, ja itse PCM-materiaalin sanotaan kestävän yhtä pitkään kuin kuorimateriaali. Mikäli kuorimateriaaliin tulee reikä, menettää PCM-materiaali toimintakykynsä muutamassa viikossa. Materiaalien hävittämisessä tulee metallinen kuorimateriaali erotella itse PCM-materiaalista ja hävittää tai kierrättää tuotteet paikallisten jätehuoltomääräysten mukaisesti. Tuotteet eivät sisällä myrkyllisiä aineita ja ne ovat palamattomia.

Lisäksi Climator on kehittänyt suuremman kokoluokan PCM-tankkia yhteistyönä Ecostorage-nimisen yrityksen kanssa. Aikaisemmin Climatorin tuotteita on valmistettu myös mikrokapseloituista PCM-materiaaleista, mutta niiden toiminta on havaittu liian tehottomaksi, joten käytöstä on luovuttu.

Seuraavassa on esitetty toimistorakennukseen soveltuvien ClimSel-tuotteiden tärkeimmät ominaisuudet. On huomattava, että ominaisuudet kuvaavat PCM-raaka-ainetta, joten PCM-materiaalin koostumuksesta johtuvaa korroosio-ongelmaa ei ole kapseloidun tuotteen ja ympäröivien rakenteiden välillä.

**ClimSel C21-22**

Sulamis- ja jähmettymispiste:	21–22 °C
Alijäähtyminen:	n. 4 °C
Maksimilämpötila:	60 °C
Lämmönvarastointikapasiteetti:	216 kJ/kg (lämpötilaväli: 14–34 °C)
Latenttilämpö (sulamislämpö):	144 kJ/kg
Ominaislämpökapasiteetti:	3,6 kJ/(kgK)
Tiheys:	1450 kg/m <sup>3</sup>
Lämmönjohtavuus:	0,50–0,70 W/(mK)
Korroosio:	Syövyttävä metallin suhteen.

**ClimSel C24**

Sulamis- ja jähmettymispiste:	24 °C
Maksimilämpötila:	60 °C
Lämmönvarastointikapasiteetti:	216 kJ/kg (lämpötilaväli: 15 – 35 °C)
Latenttilämpö (sulamislämpö):	144 kJ/kg
Ominaislämpökapasiteetti:	3,6 kJ/(kgK)
Tiheys:	1480 kg/m <sup>3</sup>
Lämmönjohtavuus:	0,50–0,70 W/(mK)
Korroosio:	Syövyttävä metallin suhteen.

### 4.5.3 EPS Ltd

EPS (Environmental Process Systems) Ltd. on englantilainen yritys, joka valmistaa ja kehittää ympäristöystävällisiä sekä vaihtoehtoisesti energiaa säästäviä jäähdytys- ja lämmitysjärjestelmiä. Yritys on tutkinut PCM-materiaaleja ja niiden soveltamista edellä mainituissa järjestelmissä yli kymmenen vuoden ajan.

Taulukkoon 4.3 on koottu sulamislämmöltään rakennuksen käyttölämpötila-alueelle sijoittuvat EPS Ltd:n Plus ICE -PCM-tuotteet ja niiden keskeisimmät ominaisuudet. Tunnuksella A merkityt tuotteet ovat orgaanisia ja tunnuksella S merkityt tuotteet ovat epäorgaanisia suolahydraatteja.

Käyttöturvallisuustiedotteen mukaan orgaaniset Plus ICE-tuotteet (A22...A26) ovat palavia materiaaleja, mutta ne eivät ole helposti syttyviä. Niiden sammuttamiselle ei ole asetettu erityisvaatimuksia, joten se tulee tehdä palon syyn mukaan. Vioittuneet ja käytöstä poistettavat materiaalit tulee mahdollisuuksien mukaan kierrättää tai hävittää paikallisten jätehuoltomääräysten mukaisesti.

EPS Ltd.:llä on valikoimassaan useita rakentamiseen soveltuvia kapseloituja tuotteita (ks. kuva 4.2), joita voidaan soveltaa kohdassa 4.6 esitetyissä rakennussovelluksissa, kuten alaslasketuissa katoissa.

**Taulukko 4.3** EPS Ltd:n Plus ICE PCM-tuotteiden ominaisuudet. (EPS Ltd)

Nimi	Tuotteen tyyppi	Sulamispiste (°C)	Sulamislämpö (kJ/kg)	Ominaislämpökapasiteetti (kJ/(kgK))	Lämmönjohtavuus (W/(mK))	Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )
A22	Orgaaninen	22	172	2,22	0,180	785
A23	Orgaaninen	23	170	2,22	0,180	785
A24	Orgaaninen	24	225	2,22	0,180	790
A25	Orgaaninen	25	172	2,26	0,180	785
A26	Orgaaninen	26	225	2,22	0,210	790
S19	Suolahydraatti	19	146	1,90	0,430	1520
S21	Suolahydraatti	21	190	2,20	0,540	1530
S23	Suolahydraatti	23	190	2,20	0,540	1530
S25	Suolahydraatti	25	190	2,20	0,540	1530
S27	Suolahydraatti	27	192	2,20	0,540	1530

#### 4.5.4 TEAP Energy Ltd

TEAP Energy Ltd. on australialainen yritys, joka on yksi maailman johtavimmista faasimuutosmateriaalien kehittäjistä ja valmistajista.

Heidän valmistamansa T-series-PCM-tuotteet ovat useiden ainesosien sekoituksia, joiden perusmateriaalina ovat epäorgaaniset suolat. Ne ovat faasimuutoslämpötilan läheisyydessä viskoosissa, puolijähmeässä olomuodossa. Faasimuutoslämpötilaltaan tuotteet ovat välillä 18–29 °C. Tässä on esitetty vain tuotteet, jotka soveltuvat sulamispisteeltään toimistorakennuksen käyttölämpötila-alueelle.

##### Latest™18T

Sulamis- ja jähmettymispiste:	17–19 °C
Sulamislämpö (latentti lämpö):	175 kJ/kg (kokeellisesti) 188 kJ/kg (teoreettisesti)
Ominaislämpökapasiteetti:	2,0 kJ/(kgK)
Alijäähtyminen:	≤ 2 °C (1000:ssa syklissä)
Tiheys:	1480–1500 kg/m <sup>3</sup>
Lämmönjohtavuus:	1,0 W/(mK)
Lämpötekniinen pysyvyys:	> 10000 sykliä
Suurin käyttölämpötila:	100 °C

Valmistaja lupaa tuotteille yhdenmukaisen sulamispisteen toistuvissa jähmettymis-sulamis-sykleissä. Tuotteiden sanotaan olevan vaarattomia, myrkyttömiä ja ei-syöttymisherkkiä. Kemiallinen ja terminen tasapaino on aikaansaatu TEAP:in lisäaineilla.

Muiden T-sarjan tuotteiden (Latest™20T, Latest™25T) ominaisuudet ovat sulamispistettä lukuun ottamatta vastaavat kuin edellä esitellyllä 18T-tuotteella. Latest 20T:n sulamispiste on lämpötilavälillä 19–20 °C ja 25T:n sulamispiste on välillä 24–26 °C.

Samalla materiaalivalmistajalla on tuotevalikoimassaan valmiiksi kapseloituja tuotteita, joiden kuorena on käytetty polymeeripohjaisia materiaaleja. Materiaalien käyttösovel-luksia tarkastellaan myöhemmin kohdassa 4.6.



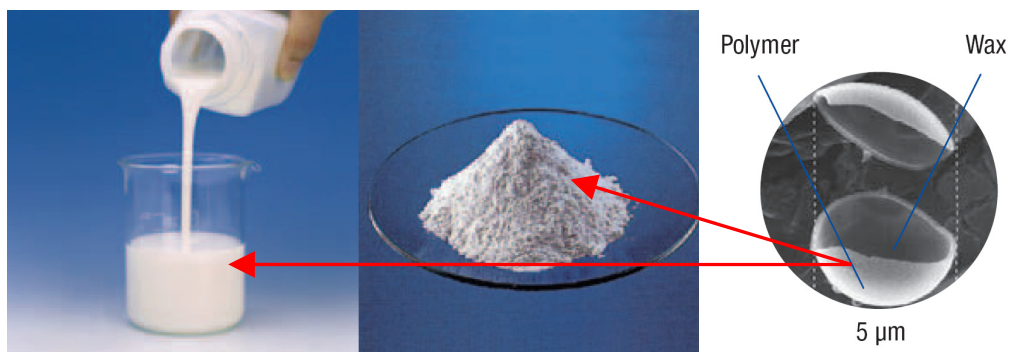
#### 4.5.5 BASF

BASF on yksi maailman johtavista kemikaaliyhtiöistä. Yrityksen tuotevalikoimasta löytyy rakentamiseen soveltuvia PCM-tuotteita. Yrityksen tuotteet eroavat edellä esitellyistä tuotteista, sillä ne ovat mikrokapseloituja.

BASF:n valmistama Micronal PCM on mikrokapseloitu tuote, joka koostuu 5 µm:n kokoisista polymeerillä eli muovilla kapseloituista parafiinivahapartikkeleista (kuva 4.7). Tuotteissa ei ole formaldehydiä. Kapseloinnin ansiosta tuotteiden tilavuudenmuutos faasimuutoksessa rajoittuu kapseliin. Micronal tuotteiden sulamispisteet ovat rakennuksen normaalilla käyttölämpötila-alueella (21 °C, 23 °C ja 26 °C). Tuote, jonka sulamispiste on 21 °C, on tarkoitettu pintajähdytysjärjestelmään. Haluttaessa tasata rakennuksen lämpötilaa passiivisella tai aktiivisella järjestelmällä, valitaan tuote, jonka sulamispiste on 23 °C. Korkeimman sulamispisteen (26 °C) omaava tuote on tarkoitettu rakennuksen liiallisen lämpenemisen rajoittamiseen kesällä.

Micronal tuotteissa käytetty parafiini sekä kapselimateriaali eivät ole myrkyllisiä. Niiden syttymisherkkyys rakennusmateriaaliin lisätynä riippuu itse rakennusmateriaalin palo-ominaisuuksista sekä sen sisältämästä PCM-pitoisuudesta. PCM-parafiinin palo-ominaisuuksien selventämisen vuoksi materiaalivalmistaja vertaa tuotteen palavuutta kynttilän sytyttämiseen väärästä päästä. Se ei onnistu ilman palavaa sydänlankaa, joka kuvaa tässä tavanomaista rakennusmateriaalia. Materiaalivalmistaja ilmoittaa kipsipohjaisen rappauksen, joka sisältää 20 prosenttia PCM-materiaalia, paloluokaksi eurooppalaisen standardin (EN 13501-1 2007) mukaan D:n ja saksalaisen standardin (DIN 4102-1 1998) mukaan B2:n eli ”normaali syttymisherkkyys”. Vähentämällä PCM-materiaalin määrää 15 prosenttiin on paloluokka eurooppalaisen standardin mukaan B tai C ja saksalaisen standardin mukaan B1 eli ”alhainen syttymisherkkyys”.

Itse PCM-raaka-aineelle, kuten muillekin orgaanisille hienoaineksille, pölyräjähdys on mahdollista. Se ei kuitenkaan rajoita parafiinin käyttöä rakennusmateriaalissa, jolloin vastaavaa vaaraa ei ole.



**Kuva 4.7** Vasemman puoleisessa kuvassa on esitetty BASF:n Micronal dispersiona sekä pulverina. Oikeanpuoleisessa kuvassa on esitetty Micronal tuotteiden mikrokapseli. (BASF)

Micronal PCM-materiaalille on tehty 10 000 jähmettymis-sulamis-syklin pitkäaikaiskokeita, jonka aikana tuotteessa ei ole havaittu merkittävää ominaisuuksien heikkenemistä. Näin ollen tuotteen käyttöikä voidaan olettaa kokeen mukaan noin 30 vuotta. Todellinen käyttöikä voi olla tätäkin pidempi, sillä pitkäaikaiskestävyyden takaamiseksi riittää edellä mainittu 10 000 syklin koe.

Valmistettaessa 1 kg Micronal PCM-materiaalia aiheutuu siitä 1,8 kg CO<sub>2</sub>-päästöjä. Vastaavan, kilogramman kokoisena, PCM-materiaalin käyttö vähentää rakennuksen CO<sub>2</sub>-päästöjä energiankulutuksen kautta 40 kg 30 vuodessa. Tuotteiden käyttöiän päätyttyä ne voidaan kierrättää tai uudelleen käyttää kolmella tapaa:

1. murskata ja uudelleen käyttää muissa rakennusmateriaaleissa
2. viedä kaatopaikalle (niillä ei ole haitallista vaikutusta ympäristöön)
3. hyödyntää parafiinin termisiä ominaisuuksia muissa sovellutuksissa

Micronal PCM-tuotteita voidaan sisällyttää rakennusmateriaaleihin kahdessa muodossa: dispersiona ja pulverina (kuva 4.7). Parafiinidispersiossa mikrokapseloitunut PCM-partikkelit muodostavat veden kanssa seoksen. Dispersion ja pulverimaisen tuotteen sulamispisteitä vertaamalla nähdään, että dispersion sulamislämpö on huomattavasti pulveria pienempi. Tämä johtuu dispersion sisältämästä vesimäärästä. Kiinteän Micronal PCM-materiaalin hinta on noin 10 €/kg. BASF:n mikrokapseloitunut parafiini on huomattavasti pienempiä kuin muiden materiaalivalmistajien puhtaat parafiinit. Tämä johtuu kohdassa 4.4.2 esitetyistä seikoista. Pulverimaista tuotetta voidaan lisätä tavanomaisiin rakennusmateriaaleihin, kuten laasteihin ja kipsilevyyn. Näitä sovelluksia tarkastellaan kohdassa 4.6. Taulukkoon 4.4 on koottu Micronal tuotteiden keskeisimmät ominaisuudet. Taulukossa on esitetty sulamislämmön lisäksi tuotteiden lämmönvarastointikyky, joka sisältää sulamisen osuuden ja tietyn lämpötilavälin mukaisen tuntevan lämmön osuuden.

**Taulukko 4.4** BASF:n Micronal tuotteiden ominaisuudet (BASF).

Nimi	Tuotteen tyyppi	Sulamis- piste (°C)	Lämmön- varastointikyky (kJ/kg)	Sulamis- lämpö (kJ/kg)	Kiinteä osuus (%)	Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	Viskosi- teetti (Pas)
DS 5000	Parafiinidispersio	26	59	45	42	980	0,2...0,6
DS 5007	Parafiinidispersio	23	55	41	42	980	0,2...0,6
DS 5030	Parafiinidispersio	21	51	37	42	980	0,2...0,6
DS 5001	Parafiinipulveri	26	145	110	—	250...350	—
DS 5008	Parafiinipulveri	23	135	100	—	250...350	—
DS 5029	Parafiinipulveri	21	125	90	—	250...350	—

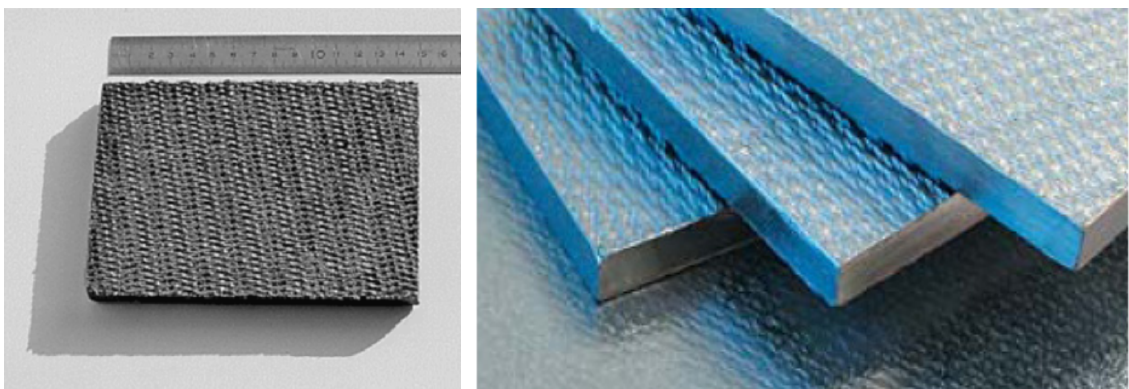
#### 4.5.6 SGL Group – The Carbon Company

SGL Group on yksi maailman johtavista hiilipohjaisten tuotteiden valmistajista. Yrityksen tuotevalikoimaan kuuluu hiilipohjaisten tuotteiden lisäksi grafiittipohjaisia tuotteita. SGL Group ei valmista itse PCM-materiaaleja, vaan käyttää pääasiassa Rubithermin ja Dörkenin tuotteita integroimalla niitä omiin grafiittituotteisiinsa. Yrityksen valmistamat PCM-materiaalia sisältävät levyt tunnetaan nimellä ECOPHIT.

Tyypillisten faasimuutosmateriaalien heikkoutena voidaan pitää niiden alhaista lämmönjohtavuutta, jonka vuoksi lämmön varastointiin ja luovutukseen kuluva aika kasvaa. Lisäämällä grafiittia PCM-materiaaliin voidaan parantaa sen heikkoa lämmönjohtavuutta.

ECOPHIT LC20-levyissä käytetään komposiittimateriaalia, joka koostuu paisutetusta grafiitista ja PCM-materiaalista. Tuotetta valmistetaan kyllästämällä paisutetusta grafiitista tehty noin 10 millimetrin paksuinen kennorakenne PCM-materiaalilla. Kuvassa 4.8 on esitetty kennorakenne ennen kyllästämistä ja lopullinen tuote PCM:n lisäyksen jälkeen. Yleensä PCM-materiaalina käytetään parafiinia, jonka osuus komposiittimateriaalin kokonaistilavuudesta on noin 80–85 prosenttia. Grafiitikennon osuus lopullisen tuotteen kokonaistilavuudesta on noin 10 prosenttia ja loppu osuus tilavuudesta (noin 5–10 %) on ilmaa. Grafiitin käyttäminen kennomaisena, PCM-materiaalia tukevana rakenteena voi kasvattaa komposiittimateriaalin lämmönjohtavuutta jopa 50–100-kertaiseksi verrattuna puhtaaseen PCM-materiaaliin.

Paisutettu grafiitti on kemiallisesti ja termisesti kestävä ja ei-syttymisherkkä materiaali. Lisäksi materiaalilla on hyvä pitkäaikaiskestävyys. Grafiitikennon valmistus on koko ja muoto rajoittunutta, joten SGL on kehittänyt toisen tavan käyttää grafiittia PCM-materiaalin lisäaineena seostamalla sitä PCM-materiaalin kanssa.



**Kuva 4.8** ECOPHIT LC20 PCM-grafiitikomposiittilevyn rakenne. Vasemmassa kuvassa on esitetty paisutetusta grafiitista valmistettu kennorakenne ennen PCM:lla kyllästämistä. Oikean puoleisessa kuvassa on lopullinen tuote kyllästämisen jälkeen. (SGL Group)

ECOPHIT GC20 on PCM-grafiittiseos, joka valmistetaan seostamalla PCM-materiaalia ja paisutettua grafiittia. Seostamisen lopputuote on kuvan 4.9 mukainen rakeinen tuote. Seos voidaan valmistaa mistä tahansa PCM-materiaalista ja voidaan muovata mihin tahansa muotoon injektoimalla. Sen materiaalien tilavuussuhteet ovat vastaavat kuin edellä esitellyllä komposiittimateriaalilla. Tällä menetelmällä valmistetun tuotteen lämmönjohtavuus ei kasva niin suureksi kuin komposiittimateriaalilla johtuen grafiittipartikkelien epätäydellisestä kosketuksesta toisiinsa. Kuitenkin tuotteen lämmönjohtavuus on parantunut 5–20-kertaiseksi verrattuna puhtaaseen PCM-materiaaliin. ECOPHIT LC20 ja ECOPHIT GC20 -tuotteiden tärkeimmät ominaisuudet on esitetty taulukossa 4.5.

Tuotteet soveltuvat rakennuksen lämpötilan tasaamiseen sekä pintajähdytys- ja lämmitysjärjestelmään. Tuotteita voidaan käyttää alaslasketuissa katoissa, seinissä ja lisäksi tuotteita on sovellettu käytettäväksi eräänlaisissa hajautetuissa ilmanvaihto- ja ilmastointijärjestelmissä.



**Kuva 4.9** ECOPHIT GC20 -PCM-grafiittiseos, joka on valmistettu sekoittamalla paisutettu grafiitti ja PCM-materiaalia (SGL Group).

**Taulukko 4.5** SGL Groupin ECOPHIT tuotteiden ominaisuudet. PCM-materiaalin osuus noin 85 tilavuusprosenttia ja grafiitin osuus noin 10 tilavuusprosenttia. (SGL Group)

Nimi	Tuotteen tyyppi	Sulamis-piste <sup>(a)</sup> (°C)	Jähmettymis-piste <sup>(a)</sup> (°C)	Lämmön-varastointi-kyky <sup>(a)</sup> (kJ/kg)	Lämmön-johtavuus (W/(mK))	Tilavuuden-muutos (%)	Tiheys (kiinteä) (kg/m <sup>3</sup> )
GC20	Sekoitus	22	18...20	110	2...5	5...10	500...1000
LC20	levy	22	18...20	140	20 <sup>(b)</sup> 5 <sup>(c)</sup>	5...10	800

(a) PCM-materiaalivalmistajan ilmoittamat arvot lämpötilavälillä +11 °C...+26 °C

(b) Levyn pinnan suuntaan

(c) Levyn pintaa vastaan kohtisuoraan

### 4.5.7 Dörken GmbH

Dörken on saksalainen yhtiö, joka valmistaa muun muassa rakennusmateriaaleja. Heidän tuotevalikoimastaan löytyy faasimuutosmateriaaleja, joiden tuotenimenä on DELTA-PCM.

DELTA-PCM-tuotteet ovat suolahydraattipohjaisia epäorgaanisia materiaaleja. Ne ovat täysin kierrätettäviä, myrkyttömiä ja ne eivät ole syttymisherkkiä. DELTA-PCM-tuotteiden sammuttamiseen voidaan käyttää vesisuihkua, hiilidioksidia tai sammutusvaahtoa.

DELTA-PCM tuotteille on tehty 10000 jähmettymis-sulamis-syklin pitkäaikaiskokeita Saksan rakennustekniikan instituutin toimesta. Kokeiden perusteella tuotteissa ei ole havaittu ominaisuuksien heikkenemistä, joten niiden käyttöikä voidaan pitää yli 25 vuotta.

#### DELTA<sup>®</sup>-COOL 24

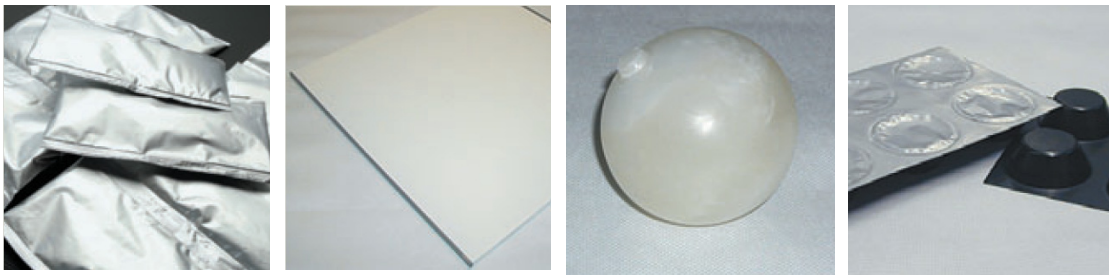
Sulamisalue:	22–28 °C
Jähmettymispiste:	22 °C
Latenttilämpö (sulamislämpö):	158 kJ/kg
Ominaislämpökapasiteetti:	2,7 kJ/(kgK) (kiinteänä) 2,2 kJ/(kgK) (sulana)
Lämmönjohtavuus:	1,12 W/(mK) (kiinteänä) 0,56 W/(mK) (sulana)
Tiheys:	1600 kg/m <sup>3</sup> (kiinteänä) 1500 kg/m <sup>3</sup> (sulana)
Suurin käyttölämpötila:	60 °C
Hinta (raaka-aine):	2,0–2,60 €/kg

#### DELTA<sup>®</sup>-COOL 28

Sulamisalue:	26–30 °C
Jähmettymispiste:	26 °C
Latenttilämpö (sulamislämpö):	188 kJ/kg
Ominaislämpökapasiteetti:	2,7 kJ/(kgK) (kiinteänä) 2,2 kJ/(kgK) (sulana)
Lämmönjohtavuus:	1,12 W/(mK) (kiinteänä) 0,56 W/(mK) (sulana)
Tiheys:	1600 kg/m <sup>3</sup> (kiinteänä) 1500 kg/m <sup>3</sup> (sulana)
Suurin käyttölämpötila:	60 °C

DELTA<sup>®</sup>-COOL-tuotteet ovat makrokapseloituja, joten suolahydraattien korrosoivasta vaikutuksesta ei ole haittaa. Kuvassa 4.10 on esitetty kuvia Dörkenin makrokapseloituista tuotteista. Tuotteet soveltuvat rakennuksen sisäilman lämpötilan hallintaan. Kappaleessa 4.6.5 käsitellään kuvan 4.10 mukaisten PCM-pussien soveltamista rakennuksen välipohjassa.

PCM-raaka-aine ja kapseloinnissa käytettävä kuorimateriaali voidaan kierrättää materiaalivalmistajan toimesta. PCM-materiaalia voidaan käyttää muissa sovelluksissa ja muovisia kapselimateriaaleja voidaan hyödyntää muiden Dörkenin valmistamien tuotteiden raaka-aineena.



**Kuva 4.10** DELTA<sup>®</sup>-COOL-tuotteita on saatavilla kuvan mukaisina tuotteina: pusseina, levyinä, pallomaisina ja kapselimaisina (Dörken GmbH).

#### 4.5.8 Yhteenveto

Taulukkoon 4.6 on koottu yhteenveto tutkimuksessa esitellyistä faasimuutosmateriaaleista, jotka soveltuvat sulamispisteeltään rakennuksen käyttölämpötila-alueelle. Kaikki taulukossa esitetyt materiaalit, BASF:n valmistamia mikrokapseloituja tuotteita lukuun ottamatta, ovat kapseloimattomia. BASF:n tuotteet DS 5000, DS 5007 ja DS 5030 ovat mikrokapseloidun parafiinin ja veden dispersioita ja loput DS 5001, DS 5007 ja DS 5030 ovat mikrokapseloituja parafiinipulvereita. Tutkimukseen valittujen faasimuutosmateriaalien tiheydet vaihtelevat paljon (250–1600 kg/m<sup>3</sup>). Alhaisin tiheys on mikrokapseloituilla parafiinipulvereilla ja suurimmat tiheydet suolahydraattipohjaisilla materiaaleilla. Materiaalien sulamislämpöjen vertailun helpottamiseksi taulukossa on esitetty sulamislämmöt kilogrammaa kohden (kJ/kg) sekä niistä tiheyksien avulla lasketut sulamislämmöt litraa kohden (kJ/l). Se, kumpaa sulamislämpöjen arvoista käytetään tuotteiden vertailuun, riippuu sovelluksesta. Mikäli sovellukseen lisättävän faasimuutosmateriaalin tilavuus on rajoitettu, tulisi vertailu tehdä tilavuuden suhteen esitetyillä arvoilla. Jos tilavuutta ei ole rajoitettu, voidaan vertailu tehdä massan suhteen esitetyillä arvoilla.

Taulukossa on esitetty myös tuotteiden lämmönvarastointikyky, joka sisältää sulamisen osuuden ja tietyn lämpötilavälin mukaisen tuntuvan lämmön osuuden. Osa materiaali-valmistajista ilmoittaa pelkästään tällaisen lämmönvarastointiarvon tietyllä lämpötilavälillä. Näin ollen materiaalien vertailun mahdollistamiseksi muille materiaaleille laskettiin vastaava arvo lisäämällä sulamislämpöön 15 °C lämpenemisen osuus ominaislämpökapasiteetin avulla.

Materiaalien hinnat on selvitetty materiaalivalmistajilta sähköpostilla. Hintatiedot saatiin selville vain muutamasta tuotteesta, sillä niiden sanottiin riippuvan muun muassa tilausmäärästä. Hinnat ovat kuitenkin suuntaa antavia ja niistä nähdään millä tasolla PCM-materiaalien hinnat ovat.

**Taulukko 4.6** Sulamispisteeltään rakennuksen käyttölämpötila-alueelle sijoittuvat PCM-materiaalit ja niiden tärkeimmät ominaisuudet.

Nimi	Sulamis- piste/-alue (°C)	Lämmön- varastointi- kyky (kJ/kg)	Sulamis- lämpö (kJ/kg)	Sulamis- lämpö (kJ/l)	Lämmön- johtavuus (W/(mK))	Hinta (€/kg)	Valmistaja
Latest™18T	17...19	205 <sup>(d)</sup>	175	263	1,0	–	TEAP Energy Ltd
S19	19	175 <sup>(d)</sup>	146	222	0,430	–	EPS Ltd
Latest™20T	19...20	205 <sup>(d)</sup>	175	263	1,0	–	TEAP Energy Ltd
RT 21	21 (18...23)	134 <sup>(a)</sup>	–	–	0,2	6,5	Rubitherm GmbH
DS 5029	21	125	90	27	–	10,0	BASF
DS 5030	21	51	37	36	–	4,2	BASF
S21	21	223 <sup>(d)</sup>	190	291	0,540	–	EPS Ltd
ClimSel C21-22	21...22	216 <sup>(b)</sup>	144	209	0,5...0,7	–	Climator
A22	22	205 <sup>(d)</sup>	172	135	0,180	–	EPS Ltd
Delta-Cool 24	22...28 <sup>(e)</sup>	194 <sup>(d)</sup>	158	253	0,56...1,12	2,0...2,6	Dörken GmbH
DS 5007	23	55	41	40	–	4,2	BASF
DS 5008	23	135	100	30	–	10,0	BASF
A23	23	203 <sup>(d)</sup>	170	133	0,180	–	EPS Ltd
S23	23	223 <sup>(d)</sup>	190	291	0,540	–	EPS Ltd
SP 22 A17	23 (22...24)	150 <sup>(a)</sup>	–	–	0,6	5,5	Rubitherm GmbH
A24	24	258 <sup>(d)</sup>	225	178	0,180	–	EPS Ltd
ClimSel C24	24	216 <sup>(c)</sup>	144	213	0,5...0,7	–	Climator
Latest™25T	24...26	205 <sup>(d)</sup>	175	263	1,0	–	TEAP Energy Ltd
A25	25	206 <sup>(d)</sup>	172	135	0,180	–	EPS Ltd
S25	25	223 <sup>(d)</sup>	190	291	0,540	–	EPS Ltd
SP 25 A8	25...26	180 <sup>(a)</sup>	–	–	0,6	5,5	Rubitherm GmbH
DS 5000	26	59	45	44	–	4,2	BASF
DS 5001	26	145	110	33	–	10,0	BASF
A26	26	258 <sup>(d)</sup>	225	178	0,210	–	EPS Ltd.
Delta-Cool 24	26...30 <sup>(f)</sup>	224 <sup>(d)</sup>	188	301	0,56...1,12	–	Dörken GmbH
S27	27	225 <sup>(d)</sup>	192	294	0,540	–	EPS Ltd
RT 27	27 (25...28)	179...184 <sup>(a)</sup>	–	–	0,2	6,2	Rubitherm GmbH

(a) Lämpötilaväli  $\leq 15$  °C

(b) Lämpötilavälillä +14...+34 °C

(c) Lämpötilavälillä +15...+35 °C

(d) Lämpötilaväli  $\Delta T = 15$  °C (laskettu lämpenemisen osuus)

(e) Jähmettymispiste 22 °C

(f) Jähmettymispiste 26 °C



## 4.6 PCM-materiaalien soveltaminen rakentamisessa

Tässä kappaleessa käydään läpi PCM-materiaalien sovellusperiaatteita, käytössä olevia sovelluksia ja tutkimustuloksia. Sovelluksissa käsitellään muun muassa: Trombe wall, PCM-materiaalia sisältäviä puukuitu- ja kipsilevyjä, PCM-materiaalin sisällyttämistä betoniin ja betoniharkkoihin sekä toimistorakennuksien jäähdytystä silmällä pitäen merkittävintä sovellusta eli PCM-materiaalin käyttämistä välipohjassa.

PCM-materiaalien soveltamista latentin lämmön varastoimiseen rakennussovellutuksissa on tutkittu useissa tutkimuksissa jo 1970-luvulta lähtien (Schossig et al. 2005). 1980-luvulla PCM-materiaalien soveltamista rakennuksiin tutkittiin lähinnä kapseloitujen passiivisesti toimivien massiivivarastojen muodossa. Ongelmana näissä sovelluksissa oli heikko lämmön siirtyminen varaston ja ympäristön välillä. Näin ollen tutkimuksissa keskityttiin tutkimaan PCM-materiaalien soveltamista seinissä ja välipohjissa, jotka tarjoavat suuremman pinta-alan lämmön siirtymistä varten (Tyagi & Buddhi 2007). PCM-materiaalien käytön tutkiminen on keskittynyt pääosin kevytrakenteisten rakennusten lämpötekniikan toiminnan parantamiseen, mutta niiden soveltamista massiivisissa rakenteissa, kuten betonissa, on myös tarkasteltu.

### 4.6.1 Käyttösovellusten jaottelu

Faasimuutosmateriaalien soveltaminen rakentamisessa voidaan jaotella usealla eri tavalla. Ensimmäinen jaotteluperiaate on jakaa rakennuksissa käytettävien PCM-materiaalien toiminta aktiiviseen ja passiiviseen järjestelmään.

Passiivisessa järjestelmässä lämpötilan noustessa päivällä rakennuksen sisällä PCM-materiaalin sulamispisteeseen; se sulaa ja varastoi lämpöä. Yöllä lämpötilan laskiessa jäähmettymispisteen alapuolelle PCM-materiaali jäähmettyy ja luovuttaa varastoimaansa lämpöenergiaa takaisin ympäristöönsä. Passiivinen järjestelmä toimii siis automaattisesti rakennuksen lämpötilanvaihteluiden mukaan. Passiivisesti toimivien PCM-materiaaleja sisältävien rakennusmateriaalien ja rakenteiden oikeanlainen toiminta on riippuvainen lämpötilan laskusta yöllä. Jos lämpötila ei laske riittävän alhaiseksi alle jäähmettymispisteen yöllä, PCM-materiaali ei luovuta varastoimaansa lämpöenergiaa, joten seuraavana päivänä materiaalin lämpöenergian varastointikapasiteetti on pienempi ja rakennus ylikuumentuu nopeammin. Tämä lämpökapasiteetin vaje voi olla ongelmallinen passiivisesti toimivissa materiaaleissa ja sen vuoksi on kehitetty aktiivinen järjestelmä.

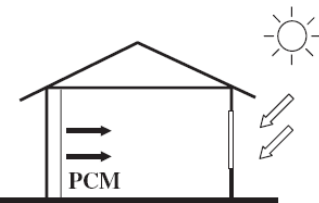
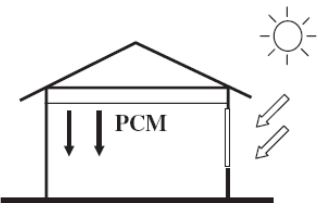
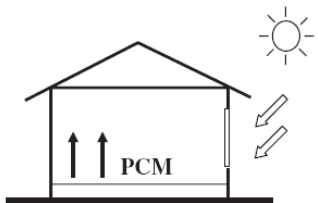
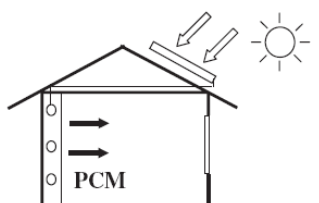
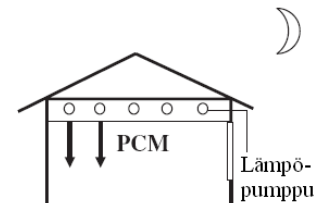
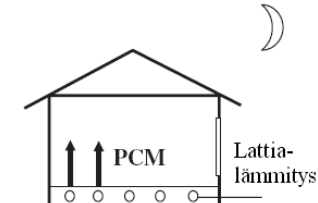
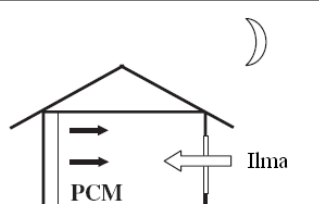
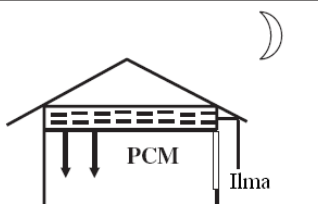
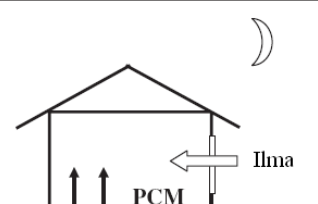
Aktiivisessa järjestelmässä PCM-materiaalin lämpöylijäämä poistetaan yöllä keinotekoisella tai luonnollisella viileällä ilmalla tai vedellä. Tavoitteena aktiivisen järjestelmän suunnittelussa tulee olla luonnollisen viilennyksen käyttö keinotekoisien sijaan. Vesivii-

lennystä voidaan käyttää asentamalla PCM-materiaalin sisään putkiverkosto ja kierrättämällä siellä viileää vettä. Aktiiviseksi järjestelmäksi voidaan laskea myös menetelmä, jossa lämpöylijäämän poistaminen toteutetaan yöllisellä ilmanvaihdolla. Aktiiviseen järjestelmään liittyy yleensä lämpöylijäämän talteenotto ja uudelleenkäyttö rakennuksen lämmityksessä. Tätä lämmön pitkäaikaista talteenottoa ei käsitellä tässä työssä.

Toinen tapa on jakaa PCM-materiaalien soveltaminen rakentamisessa kahteen menetelmään, jotka eroavat toisistaan varastoitavan lämmönlähteen tai jäädytykseen käytettävän viileän ilman lähteen perusteella. Ensimmäisenä menetelmänä on kerätä luonnollista energiaa, eli aurinkoenergiaa, rakennuksen lämmitystä tai yöllistä viileää ilmaa rakennuksen jäädytystä varten. Toinen tapa on käyttää apuna keinotekoisia lämmön- tai viileänlähdettä (Sharma et al. 2009). Keinotekoisena lämmönlähteenä voidaan pitää esimerkiksi sähkölämmityksen käyttämistä lämpöenergian varastoinnissa PCM-materiaaliin. Rakennuksen sisäisiä kuormia, kuten ihmisten ja laitteiden tuottamaa lämpöä, voidaan pitää osittain luonnollisena ja osittain keinotekoisena.

Kuvassa 4.11 on esitetty PCM-materiaalien käyttösovellusten pääperiaatteet. Kuten aikaisemmin on mainittu, faasimuutosmateriaaleja voidaan lisätä sekä rakenteisiin että rakennusmateriaaleihin. PCM-materiaaleja voidaan sijoittaa rakennuksen seiniin, välipohjaan ja yläpohjaan sekä lattiaan. Lisäksi niitä voidaan lisätä erillisiin lämmitys- ja jäädytysjärjestelmiin, kuten PCM massavarastoihin. Niitä käytetään yleensä pidempiaikaiseen energian varastointiin, josta lämpöenergiaa otetaan käyttöön tarpeen vaatiessa. Kuvassa 4.11 rakennussovellukset on jaettu kolmeen eri kategoriaan (Zhang et al. 2007):

1. passiiviseen lämmitykseen
2. aktiiviseen lämmitykseen
3. yöaikaiseen jäädytykseen

	Seinässä	Katossa/välipohjassa	Lattiassa
Passiivinen lämmitys	 Päivän auringonsäteilyllä	 Päivän auringonsäteilyllä	 Päivän auringonsäteilyllä
Aktiivinen lämmitys	 Aurinkokennojärjestelmä	 Yöllä halvalla sähköllä	 Yöllä halvalla sähköllä
Yöaikainen jäähdytys	 Yöaikaisella tuuletuksella	 Yöaikaisella tuuletuksella	 Yöaikaisella tuuletuksella

**Kuva 4.11** PCM-materiaalien soveltamismahdollisuudet rakennuksen vaipassa (muokattu kuvasta: Zhang et al. 2007).

Passiivinen lämmitys perustuu rakennukseen tulevan lämpökuorman, kuten auringon säteilyn ja sisäisten kuormien, lyhytaikaiseen varastointiin rakennuksen sisäisiin tai ulkoisiin rakenteisiin. Jotta kevytrakenteisissa rakennuksissa ylimääräinen lämpökuorma saataisiin talteen, tulee rakennuksen lämmönvarastointikykyä parantaa käyttämällä PCM-materiaaleja rakenteissa ja/tai rakennusmateriaaleissa. Passiiviseen lämmitykseen liittyy myös passiivinen jäähdytys, joka toimii vastaavasti kesällä, eli varastoi ylimääräisen lämpökuorman pitäen rakennuksen sisäisen lämpötilan miellyttävänä. (Zhang et al. 2007)

Perinteiset massiiviset ulkoseinät varastoivat passiivisesti tuntuvaa lämpöä talvisin perustuen niiden suureen massaan ja ominaislämpökapasiteettiin. Talvella auringon lämmittäessä massiivista seinää se lämpiää ympäröivää ulkoilmaa lämpimämmäksi ja varastoi lämpöenergiaa. Normaalisti rakennuksesta johtumalla tapahtuvan lämpöhäviön lämpöenergia on peräisin rakennuksen sisältä. Kuitenkin tässä tapauksessa, massiivisen seinän ollessa ulkoilmaa lämpimämpi, lämpöhäviö tapahtuu osittain pelkästään seinän ja ulkoilman välillä. Toisin sanoen massiivinen seinä luovuttaa varastoimansa lämpöenergian takaisin ulkoilmaan, kunnes seinän lämpötilagradientti tasoittuu ja johtuva lämpö on taas peräisin rakennuksen sisältä. Toisaalta massiiviseinän rakennuksen sisäilmaa

lämmittävä vaikutus on seurausta seinän lämpötilan noususta huoneilmaa lämpimämmäksi. Silloin lämpöenergia siirtyy seinän sisäpinnasta säteilemällä huoneilmaan. Tähän perustuu massiivisten seinien toimintaperiaate. Massiivisen seinän, kuten betoniseinän, lämmönvarastointikykyä voidaan parantaa entisestään PCM-materiaalin käytöllä. Myös kevytrakenteinen seinärakenne saadaan toimimaan massiivisen seinän tavalla käyttämällä PCM-materiaalia lämpövarastona. Kyseistä kevytrakenteista seinää, jossa PCM-materiaali toimii rakennuksen ulkopuolelta tulevien lämpökuormien mukaan, on kehitetty ja siitä on kaksi eri variaatiota: trombe wall ja solar wall. Näiden seinien toimintaperiaatteet esitellään kohdassa 4.6.4.

Aktiivinen lämmitys perustuu erillisen lämmönvarastointijärjestelmän tai lämmönlähteen käyttöön. Yhdessä aurinkokennojärjestelmän kanssa PCM-rakenneosa voi varastoida enemmän lämpöenergiaa päivällä ja luovuttaa varastoimaansa energiaa yöllä ylläpitäen miellyttäviä lämpötilaoloja rakennuksessa ja vähentäen tavanomaisen lämmitysjärjestelmän kuormitusta. Aktiivista lämmitystä voidaan hyödyntää myös käyttämällä PCM-materiaalia varastoimaan lämpöpumpulla tai sähköisellä lattialämmityksellä tuotettua lämpöä. Tällä tapaa lämpöenergiaa voidaan varastoida halvemmalla yöaikaisella sähköllä PCM-materiaaliin, joka luovuttaa varastoidun lämmön päivällä vähentäen päiväsaikaista lämmitystarvetta. (Zhang et al. 2007)

Yöaikainen jäähdytys perustuu PCM-rakenneosan viilentämiseen yöllä. Ulkoilman lämpötilan ollessa rakennuksen sisäilmaa kylmempää, käynnistyy ilmanvaihtojärjestelmä, joka jäähdyttää rakennuksen sisäpuolisessa vaipassa, kuten seinässä tai välipohjassa sijaitsevan PCM-materiaalin. Päivällä rakennuksen lämpötilan kasvaessa ylimääräinen lämpö varastoituu PCM-materiaaliin viilentäen sisäilmaa ja vähentäen jäähdytysjärjestelmän kuormitusta. Ilman kiertoa voidaan nopeuttaa koneellisella tuuletuksella. Rakennuksen jäähdytys yöaikaan on tehokkaampaa kuin päivällä, sillä jäähdytysjärjestelmät toimivat tehokkaammin yöllä johtuen matalammasta ilman lämpötilasta. (Zhang et al. 2007)

#### **4.6.2 PCM-materiaali betonissa tai laastissa**

PCM-materiaalin sisällyttäminen betoniin tai rappauslaasteihin mahdollistaa lämmönvarastointikapasiteetin kasvattamisen useissa eri sovelluksissa niin kevytrakenteisissa kuin massiivisissa rakenteissa. PCM-materiaalia sisältävää betonia voidaan käyttää lähes vastaavalla tavalla kuin tavanomaista betoniakin, ottaen huomioon sen vaikutus betonin lujuuteen kantavissa rakenteissa. Tällaista betonia voidaan käyttää muun muassa välipohjissa ja seinissä rakennuksen viilennystarkoituksessa tai vastaavasti lattialämmityksen yhteydessä varastoimassa lämmityksen tuottamaa lämpöenergiaa. PCM-materiaalia sisältävän rappauslaastin käyttö keskittyy lähinnä rakennuksen sisäisten pintojen rappaamiseen ja sitä voidaan käyttää passiivisesti tai aktiivisesti jäähdytettynä. Maxit valmistaa rappauslaasteja sekä tasoitteita, jotka sisältävät BASF:n valmistamaa mikrokap-seloitua PCM-materiaalia (Micronal). Ne ovat kipsipohjaisia laasteja, jotka tunnetaan

tuotenimellä Maxit Clima. Tätä tuotetta ei ole tällä hetkellä Suomen markkinoilla, mutta Saksasta tuotetta on saatavilla (Maxit).

Yleisin tapa sisällyttää PCM-materiaalia betoniin tai laastiin on sen lisääminen kosteaan massaan tai vastaavasti sekoittaa PCM-materiaali kuiva-aineiden sekaan betonin ja laastin valmistuksessa. PCM-materiaali voi olla myös materiaalivalmistajan toimesta valmiiksi sekoitettuna sideaineen sekaan. Tällä tavalla valmistetussa betonissa tai laastissa PCM-materiaali heikentää sen lujuutta verrattuna tavanomaiseen materiaaleihin. Rakennuksen sisäpintoihin käytettävissä laasteissa lujuuden heikkenemisestä ei aiheudu ongelmia, mutta se voi rajoittaa betonin käyttöä kantavissa rakenteissa. Kevytbetonista valmistettuihin tai muihin huokosiin harkkoihin PCM-materiaali voidaan lisätä kastamalla valmis harkko nestemäiseen PCM-liuokseen. Tällä tavalla lisätynä PCM-materiaali ei vaikuta betonirakenteen lujuuteen.

Markkinoilla on yksi harkkotuote, joka sisältää PCM-materiaalia (kuva 4.12). Se on H + H Deutschlandin valmistama kevytbetoniharkko nimeltään CelBloc Plus. Harkkoja on saatavilla sekä ulkoseiniin että väliseiniin soveltuvilla paksuuksilla. CelBloc Plus sisältää BASF:n valmistamaa mikrokapseloitua PCM-materiaalia (Micronal), jonka sulamispiste on 23 °C. PCM-materiaali kasvattaa harkon termistä massaa U-arvon pysyessä tavanomaista harkkoa vastaavana. Lisätietoa harkosta on saatavilla materiaalivalmistajan Internet-sivuilta.



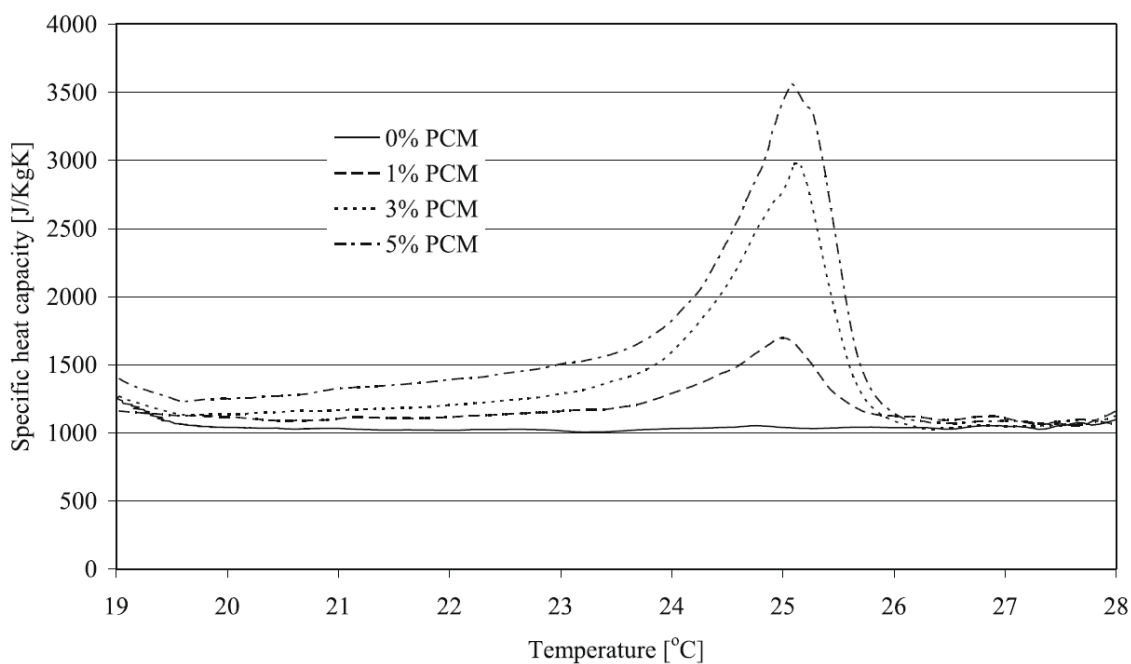
**Kuva 4.12** H + H Deutschlandin valmistama, PCM-materiaalia sisältävä kevytbetoniharkko CelBloc Plus (H + H Deutschland).

Puhtaan PCM-materiaalin sisällyttämisessä betoniin ja laasteihin on kohdattu selkeitä betonin toimintaan vaikuttavia ongelmia, kuten PCM-materiaalin tilavuudenmuutos sen faasimuutoksissa. Tämän vuoksi nämä tuotteet eivät ole yleistyneet kaupallisille markkinoille. Ratkaisuna ongelmiin on pidetty PCM-materiaalin sisällyttämisestä betoniin ja laasteihin mikrokapseloidussa muodossa. Tällöin faasimuutokset tapahtuvat mikrooppisen pienissä kapseleissa sekoittumatta betoniin edes nestemäisessä muodossa.

Hunger et al. (2009) selvittivät tutkimuksissaan mikrokapseloidun PCM-materiaalin vaikutusta betonimassan ja kovettuneen betonin ominaisuuksiin. PCM-materiaalina tutkimuksissa oli käytetty kaupallista mikrokapseloitua tuotetta nimeltä Micronal DS 5008 (BASF), jonka sulamispiste on 23 °C ja sulamislämpö 100 kJ/kg.. Tutkittaviin betonimassoihin lisättiin, joko 1, 3 tai 5 % PCM-materiaalia suhteessa betonin massaan. Referenssinä käytetty betonimassa ei sisältänyt PCM-materiaalia.

Tutkimukset osoittivat, että PCM-materiaalin lisääminen betoniin pienentää betonin lämmönjohtavuutta ja vastaavasti kasvattaa huomattavasti ominaislämpökapasiteettia. Kuvassa 4.13 on esitetty betonin ominaislämpökapasiteetit eri PCM-materiaalipitoisuuksilla. Kuvasta havaitaan, että betonin sisältämän PCM-materiaalin sulaminen tapahtuu vähitellen lämpötilanmuutoksen ollessa hitaampaa koekappaleen sisällä pintaan verrattuna. Ominaislämpökapasiteetin maksimiarvo saavutetaan 25 °C kohdalla eli kaksi astetta PCM-materiaalin sulamispistettä korkeammassa lämpötilassa. Tällöin 5 % PCM-pitoisuudella ominaislämpökapasiteetti on noin 3,5-kertainen referenssibetoniin verrattuna.

Hunger et al. (2009) tekemät tutkimukset osoittivat myös, että betonin puristuslujuus aleni noin 13 % PCM-pitoisuuden kasvaessa yhdellä prosentilla. Lujuuskadon syynä pidettiin mikrokapseloidun betonin rikkoutumista betonimassan sekoituksen aikana. Tällöin niiden sisältämä parafiini sekoittui betonimassaan rajoittaen betonin hydratoitumiseen vaadittavan veden kulkeutumista sementtipartikkelien läheisyyteen. Ratkaisuna betonin lujuskatoon pidettiin lujempien kapselimateriaalien kehittämistä ja käyttämistä PCM-parafiinin suojana.



**Kuva 4.13** Koekappaleista (200 mm x 200 mm x 30 mm) mitatut betonin ominaislämpökapasiteetit lämpötilan funktiona eri PCM-materiaalipitoisuuksilla. (Hunger et al. 2009)

Castellón et al. (2007) tutkivat mikrokapseloidun PCM-materiaalin vaikutusta, massiivisten, betonista valmistettujen koerakennuksien lämpötilaoloihin välimeren ilmastossa Espanjassa. PCM-materiaalina tutkimuksissa oli käytetty kaupallista mikrokapseloitua tuotetta nimeltä Micronal<sup>®</sup>PCM (BASF), jonka sulamispiste oli 26 °C ja sulamislämpö 110 kJ/kg. Betonin koostumuksena käytettiin aikaisemmissa tutkimuksissa määritettyä seosta, jolle on tehty myös lujuustarkasteluja. Niissä havaittiin, että PCM-betoni saavuttaa 25 MPa puristuslujuuden ja 6 MPa vetolujuuden 28 vuorokauden iässä. Nämä arvot mahdollistavat betonin käytön myös kantavissa rakenteissa. Mittauksia varten he rakensivat kaksi kuution muotoista koerakennusta, joista toisen rakennuksen etelä- ja länsiseinä sekä katto valmistettiin viisi painoprosenttia PCM-materiaalia sisältävästä betonista. Toisen rakennuksen he valmistivat tavanomaisesta betonista, käyttäen sitä referenssinä. Molempien eristämättömien rakennusten ulkovaipan paksuus oli 120 mm ja molemmissa oli ikkunoita. Lämpötila-anturit sijaitsivat seinien sisäpinnoissa.

Castellón et al. (2007) suorittamien mittausten tulokset vahvistivat, että PCM-materiaalilla voidaan kasvattaa myös massiivisen betonirakenteen lämmönvarastointikapasiteettia. Mittaukset osoittivat, että PCM-betonilla varustetun rakennuksen länsiseinän maksimilämpötila päivällä jäi 4 °C referenssirakennuksen länsiseinää alhaisemmaksi. Referenssirakennus saavutti PCM-betonilla varustetun rakennuksen länsiseinän maksimilämpötilan kaksi tuntia aikaisemmin. Yöllä puolestaan PCM-materiaalilla varustetun huoneen alhaisin lämpötila oli 2 °C referenssihuonetta korkeampi.

Seuraavassa esitellään kahden tutkimuksen tuloksia, joista toisessa PCM-materiaalia sisältävä laasti sijaitsee rakennuksen seinän sisäpinnassa ja toisessa välipohjan alapinnassa. Muut välipohjan sovellukset esitellään myöhemmin kohdassa 4.6.5.

Schossig et al. (2005) artikkelissa esitellään Fraunhofer ISE:n (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems) suorittama tutkimus, jossa tutkitaan PCM-materiaalia sisältävän rappauksen tai tasoitteen toimintaa rakennuksen seinien sisäpinnassa. Tutkimuksen tavoitteena oli estää rakennuksen ylikuumenemista ja vähentää jäähtyyskuormia kesällä sekä säästää lämmitysenergiaa talvella.

Tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa he määrittivät kelvolliset sovellukset ja materiaaliarvot tietokoneella mallintaen. Siinä havaittiin, että mikäli PCM-materiaalia käytetään lämmitysenergian säästämiseen, se vaati erilaisen sulamispisteen kuin sen käyttäminen jäähtytystarkoitukseen. PCM-materiaalin havaittiin toimivan rakennuksen lämmityksessä lähinnä syksyn ja kevään ilmasto-oloissa, jolloin rakennuksen sisällä on riittävä lämpöylijäämä lämmitystä silmällä pitäen. Näin ollen rakennuksen lämmityksen kannalta vuosittaiset energiansäästöt lämmityskustannuksissa jäävät pieniksi.

Toisessa vaiheessa Schossig et al. (2005) suorittivat kokeellisia mittauksia kahdesta täysikokoisesta huoneesta, joiden rakenteet vastasivat kevytrakenteista toimistorakennusta. Toisen huoneen seinät rapattiin PCM-materiaalia sisältävällä rappauslaastilla ja toista huonetta käytettiin mittauksissa referenssinä rappaamalla sen seinät tavanomaisella laastilla.

Kuvassa 4.14 on esitetty koehuoneiden eteläjulkisivu. Huoneiden seinät olivat puurunkoisia, joissa lämmöneristeenä käytettiin 140 mm paksua polyuretaanikerrosta. Seinän sisäpinnan rappaus tehtiin kipsilevyn päälle. Mittauksien aikana molemmissa huoneissa ylläpidettiin samoja olosuhteita.

Projektissa testattiin kahta eri PCM-materiaalia sisältävää laastia vuoden mittaisen jakson ajan. Vuonna 2002 testattiin 6 mm paksua polymeeripohjaista laastikerrosta, joka sisälsi 40 painoprosenttia mikrokapseloitua PCM-materiaalia. Vuonna 2003 testeihin käytettiin 15 mm paksuista kipsipohjaista laastikerrosta, jonka PCM-materiaalisisältö oli 20 painoprosenttia.

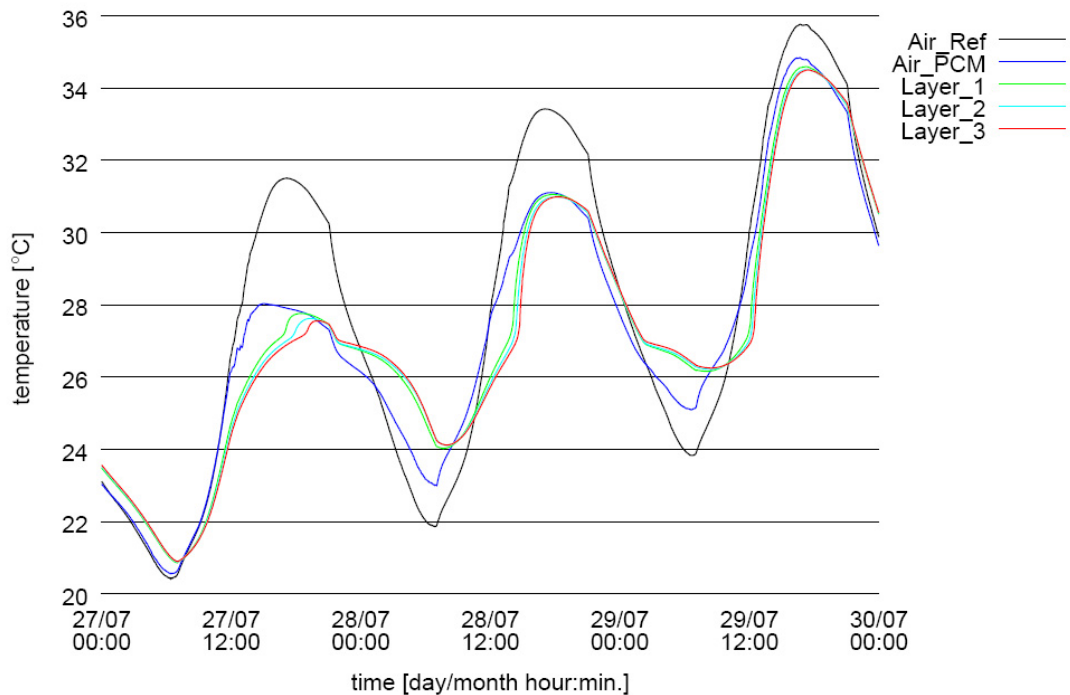


**Kuva 4.14** Fraunhofer ISE:n julkisivun testusrakennus. Kuvan julkisivu on suunnattu etelään. (Schossig et al. 2005)

Kuvassa 4.15 on esitetty huoneessa suoritettujen kolmen päivän mittaisten seinän ja ilman lämpötilan mittaustulokset PCM-materiaalia sisältävälle polymeeripohjaiselle laastille ja referenssihuoneelle. Huoneissa käytettiin yöaikaista ilmanvaihtoa ja ilmanvaihtokerroin oli 4 1/h. PCM-materiaalin sulamisalueen (24–27 °C) lämpötiloissa PCM-materiaalilla varustetun huoneen lämpötila nousi päivällä hitaammin kuin referenssihuoneessa. Tämän jälkeen lämpötilan kasvu oli molemmissa huoneissa yhtä nopeaa. Referenssihuoneen lämpötilan maksimiarvo oli lähes 4 °C suurempi kuin vastaava PCM koehuoneessa. Yöllä tilanne oli päinvastainen, eli PCM-koehuoneessa lämpötila pysyi

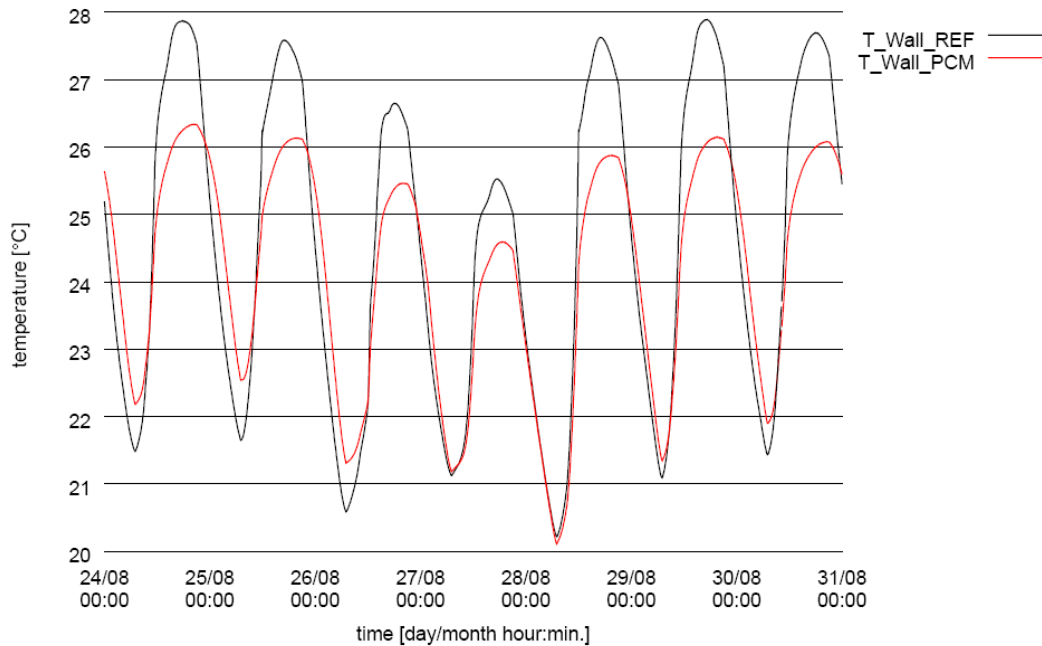


referenssihuonetta suurempana. PCM-materiaalista huolimatta kokeissa suoritettut mitaukset osoittivat, että lämmönvarastointikapasiteetti ylikuormittui päivän aikana johtuen suurista peittämättömistä etelään suunnatuista ikkunoista. Tästä johtuen molemmat huoneet varustettiin ikkunan ulkopuolisilla sälekaihtimilla, joita käytettiin mittauksien aikana ikkunoiden varjostukseen. Kaihtimet aktivoituvat automaattisesti kuumina päivinä. Kuvassa 4.16 on esitetty lämpötilat testihuoneiden seinissä kaihtimien asennuksen jälkeen. Siitä havaitaan, että lämpötilaero huoneiden välillä on keskimäärin 2 °C ja lämmönvarastointikapasiteetin ylikuormittumista ei enää havaittu.



**Kuva 4.15**

Mitatut ilman ja seinän lämpötilat kahdessa testihuoneessa. Seinän lämpötilat on mitattu PCM-laastista. Layer 1 kuvaa rappauksen pintaa, 2 keskiosaa ja 3 rappauksen taustaa. Ensimmäisen mittauspäivän aamuna PCM-materiaali oli täysin kiinteässä olomuodossa. Ilman lämpötiloissa testihuoneiden välillä havaittiin yli 3 °C lämpötilaero. Kahtena seuraavana päivänä PCM-materiaali oli vain osittain sulaneena aamulla, joten lämpötilaerot huoneiden välillä tasoittuivat. (Schossig et al. 2005)



**Kuva 4.16** Mitatut lämpötilat testihuoneiden seinien pinnoissa käytettäessä yöaikaista ilmanvaihtoa (4 l/h) ja sälekaihtimia. PCM-materiaalin ylikuormittuminen on selkeästi vähentynyt varjostuksen myötä. (Schossig et al. 2005)

Mittausdatasta oli tutkittu myös kolmen viikon mittausjakson ajalta kumulatiivisia tuntimääriä huonelämpötiloista. Tuloksista havaittiin, että referenssihuoneen lämpötila oli 50 tuntia yli 28 °C ja PCM-materiaalilla varustetussa huoneessa vastaava arvo oli 5 h. PCM-materiaalilla varustetussa huoneessa 22–24 °C ylittävä tuntimäärä oli hieman referenssihuonetta suurempi, johtuen PCM-materiaalilla varustetun huoneen korkeammista lämpötiloista yöllä.

Kipsipohjaisella laastilla varustetun seinän mittauksissa vuonna 2003 havaittiin yli 4 °C ero testihuoneiden välillä. 28 °C lämpötilan ylittävissä tuntimäärissä havaittiin myös selkeää vähentymistä referenssihuoneeseen verrattuna, mutta ylittävät tuntimäärät olivat lähempänä toisiaan kuin PCM-materiaalia sisältävälle polymeeripohjaiselle laastille tehdyissä mittauksissa.

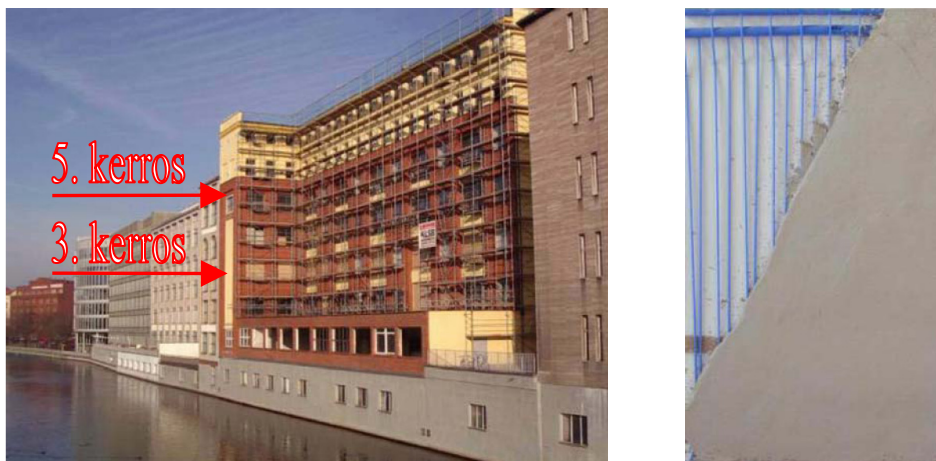
Schossig et al. (2005) suorittamat mittaukset osoittivat PCM-materiaalin potentiaalin vähentää jäähdystarvetta ja lisätä kevytrakenteisen rakennuksen käyttömukavuutta. He havaitsivat myös, että PCM-materiaalin määrä tulee mitoittaa tapauskohtaisesti vastaamaan odotettuja lämpökuormia ja varjostustoimenpiteitä. Lisäksi PCM-materiaaliin päivällä varastoidun lämmön purkautuminen yöllä on tärkeää, jotta koko lämmönvarastointikapasiteetti on seuraavana päivänä käytössä. Ilmanvaihto ja PCM-materiaalin jäähdytys yöllä voidaan toteuttaa koneellisella ilmanvaihdolla, joka vaatii kuitenkin suuren ilmanvaihtokertoimen. Se voi olla esteenä ratkaisujen yleistymiselle ja oikeanlaiselle toiminnalle, jonka vuoksi on kehitetty aktiivisesti jäähdytettyjä järjestelmiä, joissa

laastin sisällä kierrätetään vettä kapillaariputkissa (kuva 4.17). Molempia sovelluksia on käytetty todellisiin rakennuksiin, joista seuraavassa esitetään yksi esimerkki.

PCM-materiaalia sisältävän laastin toimintaa välipohjan alapinnassa on tutkittu Berliinissä sijaitsevassa toimistorakennuksessa (Fisch & Kühl 2004). Testattaviksi huoneiksi he valitsivat rakennuksen kolmannessa ja viidennessä kerroksessa sijaitsevat päällekkäiset huoneet, joiden välipohjan alapinnat rapattiin rakennuksen saneerauksen yhteydessä. Viidennen kerroksen huoneen välipohja rapattiin mikrokapseloitua PCM-materiaalia sisältävällä laastilla ja kolmannen kerroksen referenssihuone rapattiin tavanomaisella laastilla. Tutkittavien huoneiden välipohjien alapintojen rappausten kokonaispaksuus oli noin 4 cm, ja se painoi 40 kg/m<sup>2</sup>. Rappauslaastiin lisätty mikrokapseloitu PCM-materiaali oli BASF:in Micronal-tuote (ks. kohta 4.5.5). Tutkittavat huoneet sijaitsivat rakennuksen länsisivulla ja olivat dimensioiltaan samanlaiset: pinta-ala 45 m<sup>2</sup>, korkeus 3,2 m ja tilavuus 144 m<sup>3</sup>.

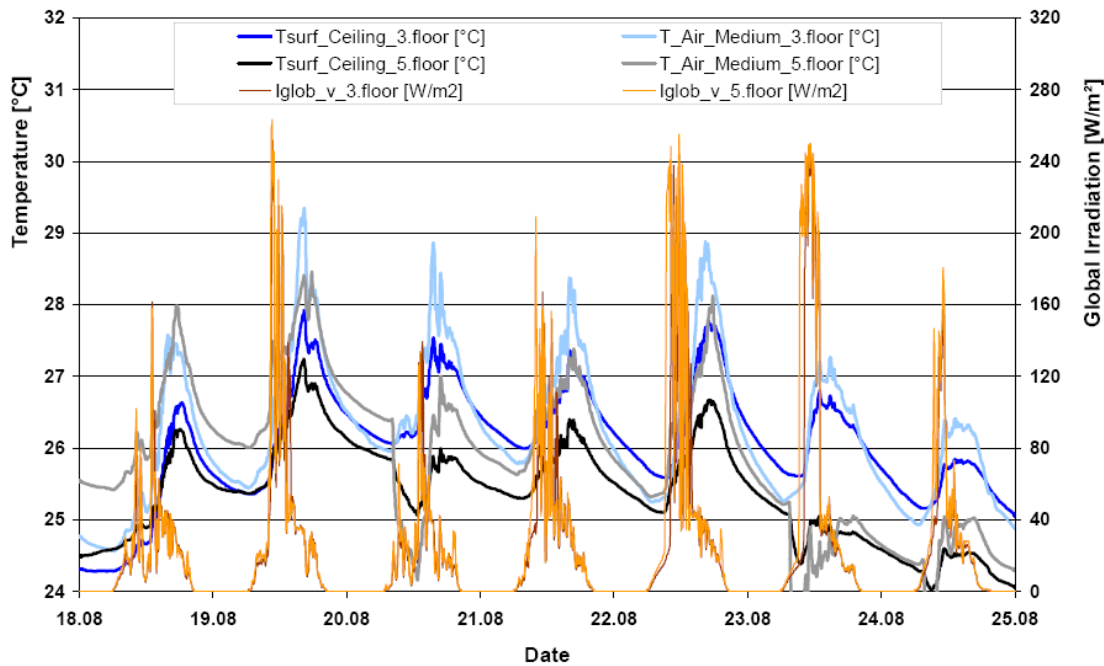
Laastin aktiivinen jäähditys toteutettiin kuvan 4.17 mukaisesti asentamalla kapillaari-putkiverkosto laastin sisään. Kapillaariputkiverkosto asennettiin molempiin huoneisiin.

Huoneista mitattiin sisäilman keskimääräistä lämpötilaa, rappauksen pinnan lämpötilaa sekä etelän suunnasta tulevaa auringonsäteilyä. Kuvassa 4.18 on mittaustulokset viikon mittaiselta jaksolta elokuun loppupuolelta, jolloin aktiivista jäähdytystä ei käytetty. Tällöin PCM-materiaalilla varustetussa viidennen kerroksen huoneessa ilman keskimääräinen lämpötila jäi parhaimmillaan 2 °C kolmannen kerroksen referenssihuonetta alhaisemmaksi. Myös välipohjan pintalämpötiloissa oli selkeää laskua referenssihuoneeseen verrattuna. Näin ollen PCM-materiaalia sisältävän laastin käytöllä välipohjassa oli positiivinen vaikutus huoneen termisiin oloihin, vaikka aktiivista jäähdytystä ei käytettykään.



**Kuva 4.17**

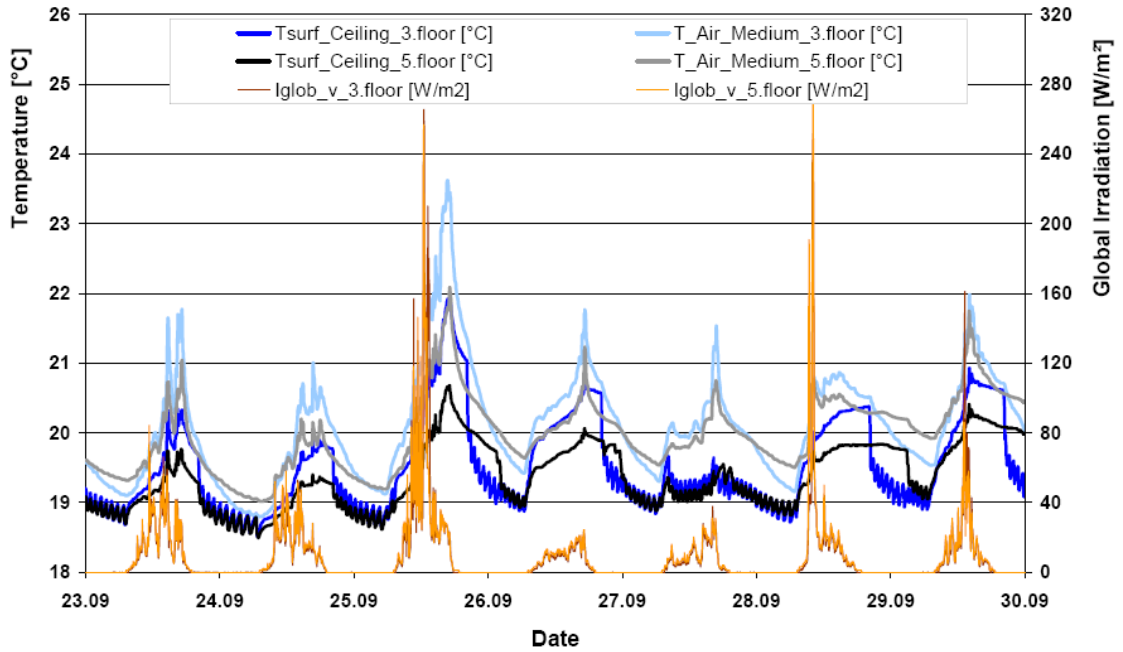
Mittauksissa käytetyn toimistorakennuksen länsisivu (vasemmalla). Välipohjan alapintaan tehty 4 cm paksu rappaus, joka sisältää kapillaariputkiverkoston (oikella). (Fisch & Kühl 2004)



**Kuva 4.18** Auringonsäteily ja lämpötilat (huoneilman keskilämpötila ja rappauspinnan lämpötila) 3. ja 5. kerroksissa sijaitsevilla testihuoneilla aikavälillä 18.08.–25.08.04. Mittauksen aikana ei käytetty aktiivista jäähdytystä. (Fisch & Kühl 2004)

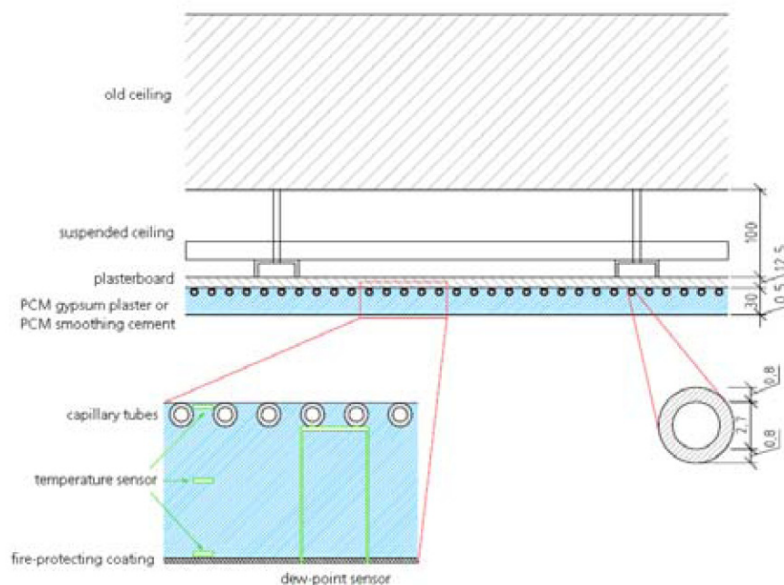
Kuvassa 4.19 on vastaavasti mittaustulokset viikon mittaiselta tarkastelujaksolta syyskuun loppupuolelta. Tällöin rappaus jäähdytettiin aktiivisesti kierrättämällä kapillaari-putkiverkostossa viileää vettä yöaikaan. Jäähdytyksestä johtuen molempien huoneiden välipohjat saavuttivat saman lämpötilatason aamuun mennessä. Päivän edetessä referenssihuone lämpeni PCM-materiaalilla varustettua huonetta nopeammin.

Vertaamalla kuvia 4.18 ja 4.19 havaitaan, että aktiivisella jäähdytyksellä on suuri vaikutus huoneen ja välipohjan lämpötiloihin. Ne laskevat huomattavasti, koska yöllisen jäähdytyksen myötä seuraavana päivänä saadaan paremmin hyödynnettyä rakenteen termistä massaa. Suurten jäähdytyskuormien aikaan kesällä aktiivista jäähdytystä voitaisiin käyttää tarvittaessa myös päivällä, jolla vältettäisiin rakennuksen ylikuumeneminen. Toimistorakennuksessa suoritettujen mittausten perusteella voidaan sanoa, että PCM-materiaalin käyttö välipohjassa leikkaa rakennuksen lämpötilahuippuja. Aktiivisesti jäähdytetyn sovelluksen käyttö on suositeltavaa, mikäli halutaan tehdä merkittävä parannus rakennuksen lämpötilaoloihin.



**Kuva 4.19** Auringonsäteily ja lämpötilat (huoneilman keskilämpötila ja rappauspinnan lämpötila) 3. ja 5. kerroksissa sijaitsevilla testihuoneissa aikavälillä 23.09.–30.09.04. Mittauksessa käytettiin aktiivista jäähdystä. (Fisch & Kühl 2004)

Mikäli edellä esitettyä tutkimusta vastaava rappaus ja kapillaariputkiverkosto halutaan asentaa välipohjan sijasta alaslaskettuun kattoon, voidaan se toteuttaa kuvan 4.20 mukaisesti. Tällöin alaslasketun katon yläpuolelle jää tilaa mahdollisille talotekniikan varusteille. Kuvan mukainen alaslaskettuun kattoon tehtävä, kapillaariputkiverkoston avulla jäähdytettävä ja PCM-materiaalia sisältävä rappaus soveltuu sekä uudis- että korjauskentämiseen.



**Kuva 4.20** Alaslaskettuun kattoon asennettu aktiivisesti toimiva PCM-materiaalia sisältävä rappaus. Aktiivinen toiminta on toteutettu kapillaariputkiverkoston avulla. (Hausmann et al. 2008)

Edellä esitetyt tutkimukset ovat osoittaneet, että PCM-materiaalin lisäämisellä betonituotteisiin saadaan kasvatettua betonituotteiden termistä massaa entisestään. PCM-materiaalien käyttöön betonituotteissa liittyy myös tekijöitä, jotka kyseenalaistavat niiden käytön.

Massiivisten betonirakenteiden lämmönvarastointikyky on jo ilman PCM-materiaalia suuri, joten PCM-materiaalin lisäämisestä saatava suhteellinen hyöty on pienempi kuin kevytrakenteisiin rakenteisiin lisättäessä. Lisäksi betonituotteisiin voidaan lisätä vain rajallinen määrä PCM-materiaalia betonin lujuusominaisuuksien liikaa kärsimättä. Tämä voi jo osaltaan pois sulkea niiden käytön korkeaa betonin lujuutta vaativissa kantavissa rakenteissa. Näin ollen PCM-materiaalien lisääminen rakenteiden sisäpintoihin tehtäviin rappauksiin on potentiaalisempi vaihtoehto kuin niiden lisääminen massiivisiin betonirakenteisiin. Rappauksessa PCM-materiaali sijaitsee lähellä huoneilmaa, jolloin lämpötilanmuutokset ulottuvat helpommin PCM-materiaalin ympäristöön. Lisäksi rappauksille ei aseteta kovinkaan suuria lujuusvaatimuksia kantavissa rakenteissa käytettävään betoniin verrattuna.

PCM-materiaalia sisältävälle betonille on tehty lähinnä yksittäisiä kokeita tietyillä PCM-materiaalipitoisuuksilla. Sen vuoksi lopullisen betonituotteen ominaisuuksien, kuten lujuuden ja lämmönvarastointikyvyn arvioiminen on vaikeaa, sillä laskennallisia malleja ominaisuuksien muuttumiselle ei ole kehitetty. Suunnittelun kannalta olisi erityisen tärkeää, että lopullisen betonituotteen ominaisuuksia voitaisiin arvioida käytettävän PCM-materiaalimäärän ja betonin ainesosien perusteella.

### 4.6.3 PCM-materiaali rakennuslevyssä

PCM-materiaalin sijoittaminen rakennuslevyyn on ollut tutkimuksen kohteena siitä lähtien, kun massiivisten lämpövarastojen havaittiin olevan tehottomia siirtämään lämpöä huoneilman ja PCM-materiaalin välillä. Tutkimuksissa on kehitetty kaksi tapaa sisällyttää PCM-materiaali rakennuslevyyn. Ensimmäisessä menetelmässä huokoinen levy, esimerkiksi kipsilevy tai grafiittilevy, kastetaan nestemäisen PCM-liuokseen, joka täyttää levyn huokostilan. Toisessa menetelmässä PCM-materiaali lisätään rakennuslevyn valmistusvaiheessa sen raaka-ainemassaan. Puhtaan PCM-materiaalin sisällyttämisessä rakennuslevyyn on kohdattu selkeitä ongelmia, jonka vuoksi nämä tuotteet eivät ole yleistyneet kaupallisille markkinoille. Ratkaisuna näihin ongelmiin on pidetty PCM-materiaalin sisällyttämistä rakennuslevyyn mikrokapseloidussa muodossa. (Pasupathy et al. 2008)

Chen et al. (2008) tutkivat laskennallisesti ja tietokoneella simuloiden PCM-materiaalia sisältävän rakennuslevyn toimintaa rakennuksen seinän ja välipohjan sisäpinnassa. Tutkimuksen pääasiallisena tarkoituksena oli tutkia päivällä varastoidusta auringonsäteilystä saatavan lämpöenergian hyödyntämistä rakennuksen lämmitykseen yöllä.

Tutkiakseen PCM-materiaalin vaikutusta lämmitysenergiankulutukseen lämmityskaudella Chen et al. (2008) määrittivät suureen nimeltä ”energiansäästöaste lämmityskaudella” ( $\eta$ ). Sitä varten he laskivat energiankulutuksen PCM-materiaalia sisältävälle huoneelle ja tavanomaiselle referenssihuoneelle. PCM-materiaalit sijoitettiin välipohjan alapintaan sekä pohjoisseinän sisäpintaan. PCM-materiaalin sijoitus voi vaihdella rakennuksen sijainnin mukaan. Tämän tutkimuksen laskelmat suoritettiin Pekingin ilmastoloosuhteilla, jossa eteläseinälle matalalta paistavan auringonsäteilyn intensiteetti talvella on suuri. Näin ollen PCM-materiaali sijoitettiin pohjoispuolen väliseiniin varastoimaan eteläisivulla sijaitsevia ikkunoita läpäisevää auringonsäteilyä. Energiansäästöaste lämmityskaudella määritettiin seuraavasti:

$$\eta = \frac{Q_c - Q_{\text{pcm}}}{Q_c} \quad (4.1)$$

missä

$Q_c$  on kokonaislämmityskuorma referenssihuoneessa lämmityskaudella (kW)  
 $Q_{\text{pcm}}$  on kokonaislämmityskuorma PCM-huoneessa lämmityskaudella (kW)

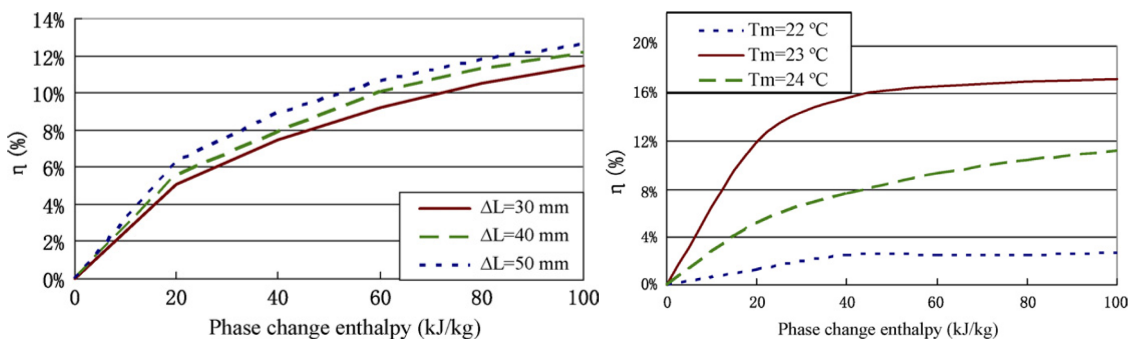
Laskelmissa tarkasteltiin PCM-materiaalin sulamispisteen, sulamisentalpian, ominaislämpökapasiteetin, tiheyden ja lämmönjohtavuuden vaikutusta lämmityskauden energi-

ansäästöasteeseen. Laskelmissa rakennuksen lämmityslämpötilaksi asetettiin 20 °C, jolloin rakennuksen lämmitys toimi automaattisesti rakennuksen lämpötilan mukaan. Kuvassa 4.21 (vasemmalla) on esitetty sulamisentalpian ja PCM-kerroksen paksuuden vaikutus energiansäästöasteeseen sulamispisteen ollessa 24 °C. Siitä havaitaan, että sulamisentalpialla on huomattavasti suurempi vaikutus energiansäästöön kuin kerrospaksuudella.

Oikeanpuoleisessa kuvassa (4.21) on esitetty puolestaan sulamisentalpian ja sulamispisteen vaikutus energiansäästöön. Siinä PCM-materiaalin kerrospaksuutena käytettiin optimaalista kerrospaksuutta, 30 mm. Tuloksista havaitaan, että suurin energiansäästöaste 17 % saavutetaan PCM-materiaalin sulamispisteellä 23 °C. Sulamispisteen ollessa 22 °C energiansäästöaste on vain 4 %. Tämä johtuu siitä, että sulamispiste on liian alhainen ja lähellä rakennuksen lämmityslämpötilaa. PCM-materiaalin sulamispisteen ollessa 24 °C energiansäästöasteeksi saatiin 12 %. Näin ollen sulamispiste alkaa olla liian suuri suhteessa lämmityslämpötilaan, joten aika jona rakennuksen lämpötila ylittää PCM-materiaalin sulamispisteen, on lyhyempi kuin sulamispisteellä 23 °C. Sovelluskohtaisesti oikean sulamispisteen valintaan vaikuttaa rakennuksen lämmityslämpötilan suuruus, joka oli tässä 20 °C.

Oikeanpuoleisesta kuvasta (4.21) havaitaan, että energiansäästöaste kasvaa selkeästi sulamisentalpian kasvaessa arvoon 40 kJ/kg, jonka jälkeen sen kasvattamisella ei saada merkittävää hyötyä lämmitysenergiesäästöä silmällä pitäen.

Chen et al. (2008) tekemät tutkimukset osoittivat, että asentamalla tarkoituksenmukainen PCM-materiaalia sisältävä rakennuslevy rakennuksen pohjoisseinän ja välipohjan sisäpintaan tehostetaan auringonsäteilyn hyötykäyttöä lämmitystarkoituksessa. Edellä esitetty tutkimus perustuu pelkästään laskennallisiin tarkasteluihin, joissa joudutaan tekemään useita olettamuksia. Laskelmien paikkansa pitävyyden tarkistamiseksi tulisi suorittaa kokeellisia mittauksia todellisista rakennuksista ja energiankulutuksista.



**Kuva 4.21** Vasemmanpuoleisessa kuvassa sulamisentalpian ja PCM-materiaalikerroksen paksuuden vaikutus energiansäästöasteeseen lämmityskaudella sulamispisteen ollessa 24 °C. Oikealla sulamisentalpian ja sulamispisteen vaikutus energiansäästöasteeseen lämmityskaudella PCM-kerroksen ollessa 30 mm. (Chen et al. 2008)



Tällä hetkellä markkinoilla on yhden materiaalivalmistajan tuotteita, joissa PCM-materiaali on lisätty mikrokapseloidussa muodossa rakennuslevyyn. Nämä levyt ovat kohdassa 4.5.6 esiteltyjä SGL Groupin valmistamia tuotteita nimeltä ECOPHIT LC20 ja ECOPHIT GC20, jotka sisältävät PCM-materiaalin lisäksi grafiittia. Tutkimustyön alkuvaiheessa markkinoilla oli myös Knaufin valmistama SmartBoard. Se oli vastaava kuin tavanomainen kipsilevy, mutta siihen oli lisätty valmistusvaiheessa mikrokapseloitua PCM-parafiinia (BASF). Knaufille tekemiäni tiedustelujen mukaan tuotteella oli edelleen kysyntää, mutta todellista syytä sen valmistuksen lopettamiseen ei kerrottu. Yhtenä ongelmana ja erona tavanomaiseen kipsilevyyn oli sen heikot palo-ominaisuudet, jotka ovat myös muiden PCM-parafiinia sisältävien rakenteiden heikkouksia. Käytännön toteutuksessa SmartBoard vaati päälleen palolta suojaavan kerroksen, jona voitiin käyttää esimerkiksi tavanomaista kipsilevyä.

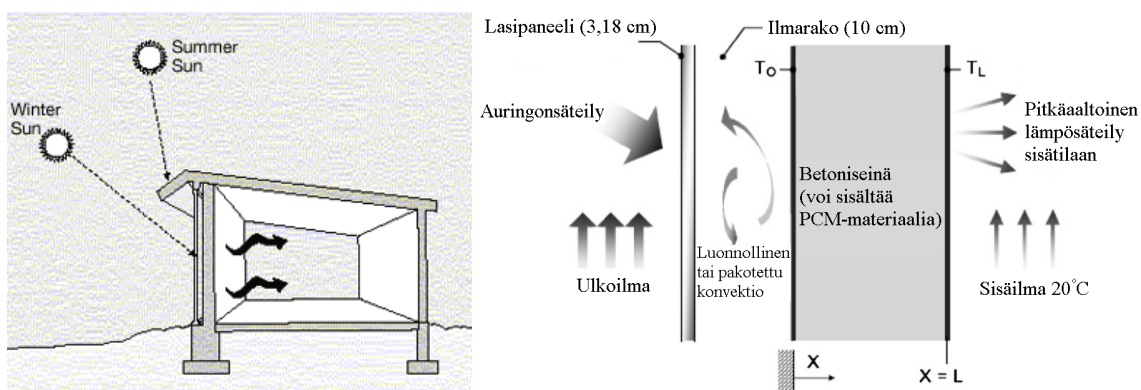
PCM-materiaalia sisältäviä rakennuslevyjä voidaan käyttää vastaavasti kuin tavanomaisia levyjä, eli seinien sisäpinnoissa ja välipohjan alapinnassa. Näissä sovelluksissa ne toimivat passiivisesti rakennuksen lämpötilavaihtelujen mukaan. Lisäksi levyjä on käytetty aktiivisesti jäähdytetyissä välipohjapaneeleissa, joista kaksi käyttösovellusta esitellään kappaleessa 4.6.5. Suurimpana ongelmana ovat parafiinipohjaisia PCM-materiaaleja sisältävien levyjen palo-ominaisuudet, jotka ovat ohuisiin levyihin sisällytettynä huomattavasti heikompia kuin esimerkiksi betoniin sisällytettynä.

#### 4.6.4 PCM-materiaali seinän ulko-osassa

Kuten aikaisemmin mainittiin, PCM-sovellus, joka tunnetaan nimellä trombe wall, on toinen kirjallisuudesta löytyvistä sovelluksista, jossa PCM-materiaalia käytetään seinän ulko-osassa. Toinen toimintaperiaatteeltaan lähes vastaava sovellus on solar wall. Näiden sovellusten toimintaperiaate on osittain vastaava kuin massiivisella seinällä ja siitä on kehitetty useita eri variaatioita. Trombe wall ja solar wall kuuluvat edellä esitellyn PCM-sovellusten luokituksen perusteella passiivisen lämmityksen kategoriaan.

##### 4.6.4.1 Trombe wall

Kuvassa 4.22 on esitetty alkuperäisen trombe wallin periaatteellinen kuva. Se koostuu paksusta massiivisesta betoni- tai muuratusta seinästä, joka sijaitsee rakennuksen eteläisivulla. Massiivisen seinän ulkopuolella sijaitsee lasitus tai muovinen pleksi. Massiiviseinän ja lasituksen välissä on noin 10 cm ilmarako. Massiiviseinän ulkopinta on musta maksimoidakseen lämmön absorboituminen rakenteeseen. Auringonsäteilyä saatava lämpöenergia varastoidaan massiiviseinään ja lasitus estää lämpöenergiaa siirtymästä takaisin ulkoilmaan konvektiolla, joka voi olla luonnollista tai tuulesta aiheutuvaa pakotettua konvektiota. Rakennuksen sisäilman lämpötilan laskiessa ilmatilaa ja seinää alemmaksi, alkaa lämpö siirtyä johtumalla seinän sisäosiin. Seinän sisäpinnasta lämpöenergia siirtyy säteilemällä huoneilmaan. Lämmön siirtymistä sisäilmaan voidaan nopeuttaa kierrättämällä ilmaraossa ilmaa koneellisesti, jolloin se saadaan johdettua hallitusti huoneilmaan haluttuna ajankohtana. Rakennuksen ylikuumentumista kesällä voidaan rajoittaa tarkoituksenmukaisin räystäsratkaisu, jotka rajoittavat korkealta paistavan kesäisen auringonsäteilyn lankeamisen seinään. Massiivisen seinärakenteen lisäksi lämmönvarastointiin on tutkimuksissa käytetty seinän sisään sijoitettavia vesitankkeja. (Tyagi & Buddhi 2007)



**Kuva 4.22**

Periaatteellinen kuva sovelluksesta nimeltä trombe wall. Seinän ala- ja yläosa voivat olla umpinaisia tai avonaisia huoneilmaan lämmitysjakson aikana. Lämmön siirtymisen tehostamiseksi ilmaa voidaan kierrättää ilmaraossa luonnollisen konvektion lisäksi koneellisesti.

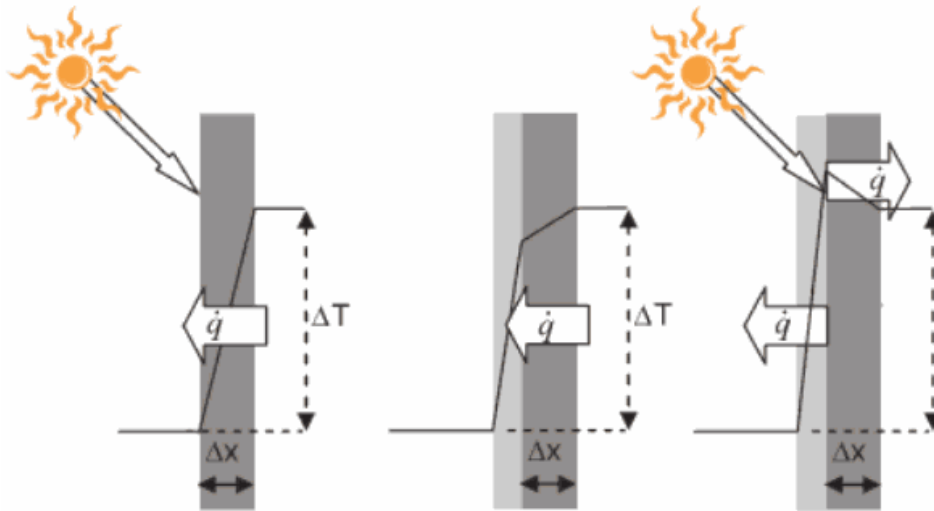
Perinteisen trombe wallin lämmönvarastointikyky perustuu tuntuvaan lämmön varastointiin massiivisiin seinärakenteisiin. Lämpövarastona voidaan käyttää myös PCM-materiaalia, joka omaa massiivista rakennetta huomattavasti suuremman lämmönvarastointikapasiteetin tilavuusyksikköä kohden. Massiivisen seinän lämmönvarastointikykyä voidaan parantaa myös sisällyttämällä PCM-materiaalia betoniin. Näistä kevytrakenteista PCM-materiaalilla varustettua seinää voidaan pitää kilpailukykyisempänä sen keveyden ja vähäisen tilantarpeen vuoksi. Näin ollen se voidaan asentaa myös jälkikäteen. (Tyagi & Buddhi 2007)

Kokeellisia mittauksia tavanomaiselle trombe wallille on tehty lähinnä Suomen ilmastoa lämpimämmissä ilmastoissa. Castellón et al. (2007) tutkivat seinän toimintaa välimeren ilmastossa samassa tutkimuksessa, jossa tutkittiin PCM-materiaalilla varustettua betoni-seinää.

Tavanomainen, kuvan 4.22 mukainen trombe wall ei sovellu Suomen kylmään ilmastoon, eikä se täyty lämmöneristämättömänä Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaista ulkoseinän U-arvovaatimusta. (RakMk C3 2010) Seinä vaatisi Suomen ilmastossa sisäpuolisen lämmöneristyksen tai vastaavan sovelluksen kuin seuraavaksi esitettävä solar wall. Käytettäessä sisäpuolista lämmöneristystä lämmön siirtyminen johtumalla huoneilmaan estyisi, joten se tulisi siirtää koneellisesti tuuletusraosta huoneilmaan tai lämmitysjärjestelmään. Sisäpuolista lämmöneristettä käytettäessä tulisi tarkastella seinän kosteusteknistä toimintaa Suomen ilmastossa. Seinää voidaan pitää kosteusteknisesti riskialttiina, mikäli lämmöneristeen ulkopuolelle sijoitetaan tiiviitä materiaalikerroksia. Joista aiheutuu kosteuden kondensoitumista seinärakenteeseen. Tiiviinä kerroksena voidaan pitää suurinta osaa makrokapseloituista PCM-tuotteista. Näistä seikoista johtuen tavanomaista trombe wallia ei voida pitää kovinkaan potentiaalisena PCM-materiaalilla varustettuna seinäratkaisuna Suomen ilmastossa. Sen sijaan seuraavassa kappaleessa esitettävä solar wall soveltuu myös Suomen ilmasto-oloihin.

#### **4.6.4.2 Solar wall**

Solar wallissa seinän ulkopinnassa käytetään valoa läpäisevää lämmöneristettä (transparent insulation), joka rajoittaa lämpöhäviötä ulkoilmaan pelkkää lasitusta tehokkaammin. Kaksikerroksinen lasitus lasketaan valoa läpäiseväksi eristeeksi. Valoa läpäisevä lämmöneriste läpäisee auringonsäteilyä, joka absorboituu massiiviseen tai kevyeen PCM-materiaalia sisältävään seinään. Valoa läpäisevän lämmöneristeen eristysominaisuuksien johdosta lämpöhäviö ulkoilmaan vähenee. Auringonsäteilytehon ollessa riittävän suuri voi lämpövirran suunta kääntyä seinän sisäosassa vastakkaiseen suuntaan eli seinästä sisälle päin. Kuvassa 4.23 on esitetty lämpötilagradientin muuttuminen lisättäessä seinään valoa läpäisevä lämmöneriste ja lämpövirran suunnan kääntyminen seinän lämmitessä. (Mehling & Cabeza 2008)



**Kuva 4.23** Lämpötilagradientti seinän läpi. Vasemmalla tavanomainen massiiviseinä. Keskellä valoa läpäisevällä eristeellä varustettu tavanomainen seinä ja oikealla vastaava seinä auringonpaisteella. (Mehling & Cabeza 2008)

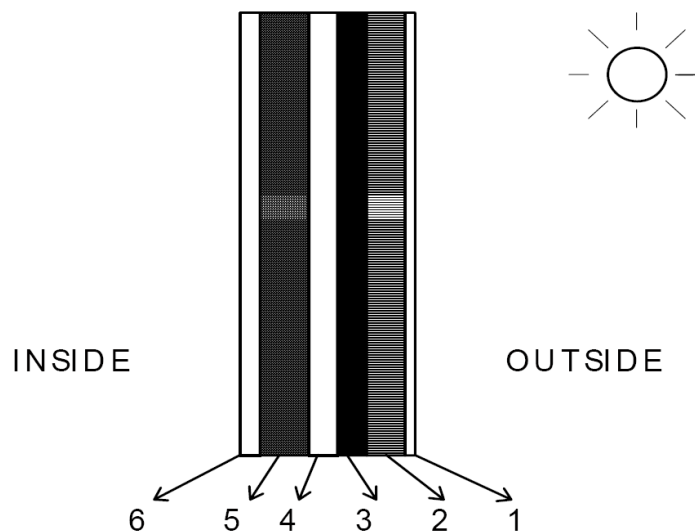
Stritih & Novak (2002) ovat kehittäneet ja testanneet solar wall -seinää, jota voidaan käyttää rakennuksen passiiviseen lämmitykseen. Seinän toimintaperiaate on vastaavanlainen kuin edellä esitellyllä trombe wallilla, mutta PCM-materiaali sijaitsee valoa läpäisevän eristeen sisäpuolella. Tummaan PCM-materiaaliin varastoitunut lämpö siirtyy rakennuksen sisälle johtamalla tai konvektiolla. Tutkimusten tulokset ovat osoittautuneet lupaaviksi.

Seinä koostuu kuudesta rakennekerroksesta, jotka on esitetty kuvassa 4.24. Rakennekerrokset ja niiden merkitykset ovat seuraavat. Uloimpana seinässä on lasi tai pleksi (1), joka suojaa seinää suoralta säärasiutukselta ja päästää lyhytaaltoisen auringonsäteilyn lävitseen. Seuraavana kerroksena on läpinäkyvä eriste (2), joka päästää myös lyhytaaltoisen auringonsäteilyn lävitseen, mutta rajoittaa lämpösäteilyä ja lämmön johtumista seinästä ulkoilmaan. Kolmantena kerroksena on itse PCM-parafiini, joka on kapseloitu läpinäkyvällä polykarbonaattikerroksella. Sen tehtävänä on varastoida latenttia lämpöä faasimuutoksissa. PCM-materiaalin sisäpuolella sijaitsee ilmarako (4), jossa kierrätetään ja lämmitetään rakennuksen ilmanvaihtoon käytettävää ilmaa, joka johdetaan huoneilmaan. Seuraavina kerroksina ovat seinän varsinainen lämmöneriste (5) ja vaihtoehtoinen sisäverhous (6).

Seinän PCM-materiaaliksi Stritih & Novak valitsivat Rubithermin PCM-parafiinin RT30, jonka sulamislämpö oli 150 kJ/kg. Kyseistä tuotetta ei ole enää markkinoilla, mutta lähinnä oleva tuote on RT31. Simulaatioissa PCM-materiaalin optimaaliseksi sulamisalueeksi saatiin 25–30 °C ja PCM-paneelin paksuudeksi 50 mm.

Kokeelliset mittaukset oli suoritettu koeseinälle, josta Stritih & Novak tutkivat seinän lämmönvarastointi- ja -luovutusominaisuuksia. Auringon säteilytehona  $G$  he käyttivät arvoa  $500 \pm 50 \text{ W/m}^2$  ja ilmaraon ilman tilavuusvirtana  $\dot{V}$ , lämmönluovutusta tarkasteltaessa, arvoa  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ . Mitatuista arvoista oli määritetty laskemalla hyötysuhteet sekä varastoinnille että luovutukselle. Lämmön varastoinnin hyötysuhde oli määritetty jakamalla PCM-materiaaliin talteen otettu lämpö käytetyllä säteilyteholla. Näin ollen hyötysuhde oli  $\mu = 0,79 \pm 0,08$ . Vastaavasti lämmön luovutuksen hyötysuhde oli laskettu jakamalla ilmaraossa kulkevaan ilmaan siirtynyt lämpö PCM-materiaaliin varastoidulla kokonaislämmöllä. Jolloin hyötysuhteeksi oli saatu  $\mu = 0,93 \pm 0,03$ . Seuraavassa on esitetty kyseiseen seinärakenteeseen liittyviä näkökohtia:

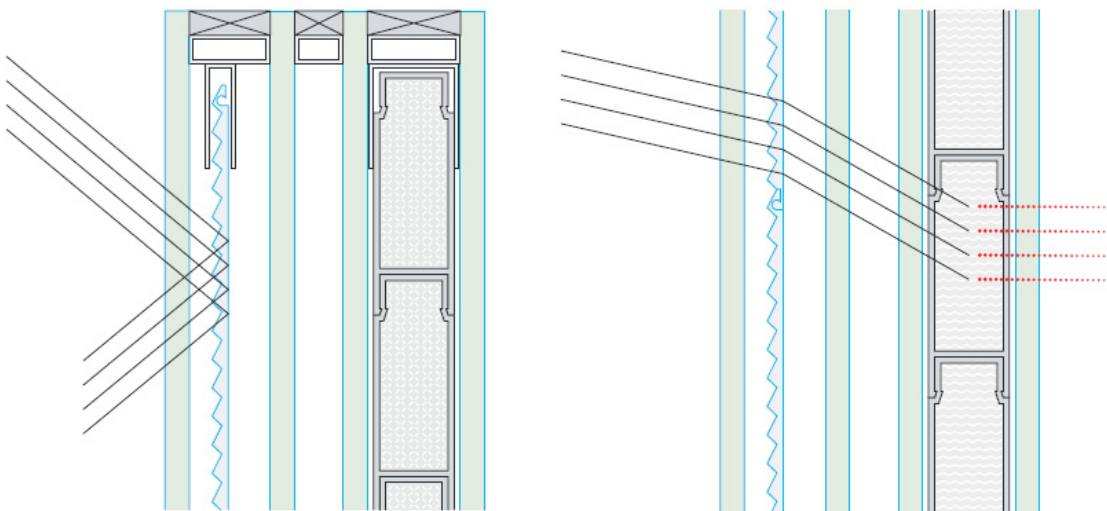
- PCM-materiaaliin varastoidun lämmön karkaaminen ulkoilmaan on rajoitettu läpinäkyvällä eristeellä, joka tekee seinästä kilpailukykyisen (vrt. trombe wall).
- PCM-materiaali toimii sekä lämmön absorboijana että sen varastojana (vrt. trombe wall).
- Seinä vähentää myös johtumalla tapahtuvaa lämpöhäviötä rakennuksen sisäilmasta ulkoilmaan.
- Seinän sijoituksessa rakennukseen on otettava huomioon sijoitus talviauringon suuntaan.



**Kuva 4.24** Seinärakenteen rakennekerrokset (Stritih & Novak 2002).

Solar wallin toimintaperiaatetta voidaan kehittää edelleen. Mikäli PCM-materiaali on edes osittain valoa läpäisevä, koko seinästä tulee valoa läpäisevä ja se lisää passiivisen lämmityksen lisäksi myös rakennuksen valaistusta päivällä. Kyseiselle seinälle käytetään englanninkielistä nimitystä ”daylighting element”. Kuvan 4.24 mukaisessa seinärakenteessa koko seinän läpinäkyvyys asettaa läpinäkyvyysvaatimuksen myös seinän sisimmille rakennekerroksille.

Saksalainen yritys GLASSX AG on kehittänyt lasisen elementin, jossa sovelletaan valoa läpäisevän PCM-materiaalin käyttöä ulkoseinässä. Elementissä, joka tunnetaan nimellä GLASSX<sup>®</sup> crystal, yhdistyy neljä toiminnallista kokonaisuutta: se toimii valoa läpäisevänä lämmöneristeenä, suojaa rakennusta ylikuumentumiselta, toimii auringonsäteilyenergian absorboijana ja lämpöenergian varastona. Se koostuu kolmesta lasielementistä ja kokonaispaksuudeltaan 79 mm olevan elementin U-arvo on 0,48 W/m<sup>2</sup>K. Uloimmassa ilmaraossa sijaitseva sahalaitainen lasi heijastaa auringonsäteilyä kesällä lasiin saapuvan säteilyn korkeuskulman ollessa yli 40° (kuva 4.25). Säteilyn takaisinheijastus estää rakennusta ylikuumentumasta kesällä. Vastaavasti talvella, auringon paistaessa matalammalta ja korkeuskulman ollessa pienempi kuin 35°, elementti läpäisee auringonsäteilyä (kuva 4.25). Tällöin säteilyenergia varastoituu ohueen, sisimmässä lasielementissä sijaitsevaan, lämpövarastona toimivaan PCM-moduuliin, joka vastaa lämmönvarastointikapasiteetiltaan 20 cm paksua betoniseinää. Elementin sisältämä PCM-materiaali on Dörkenin valmistamaa suolahydraattia DELTA<sup>®</sup>-COOL 28, joka on kapseloitu polykarbonaattikapseleihin. Sen sulamisalue on 26–30 °C ja sulamislämpö 188 kJ/kg. Kyseisen elementin lämmönvarastointikapasiteetti on 1185 Wh/m<sup>2</sup>. Kuvassa 4.26 on esitetty näkymät ulkoa ja rakennuksen sisältä kohteesta, johon on asennettu kyseiset elementit. Lisätietoa tuotteesta löytyy valmistajan Internet-sivuilta.



**Kuva 4.25** GLASSX AG:n GLASSX<sup>®</sup> crystal -lasielementti. Vasemmassa kuvassa korkealta paistavan kesäaurion (korkeuskulma > 40°) heijastuminen takasin ympäristöön ja oikealla auringonsäteilyn absorboituminen PCM-materiaaliin talvella auringon korkeuskulman ollessa pienempi kuin 35°. (GLASSX AG)



**Kuva 4.26** GLASSX® crystal -lasielementit asennettuna saksalaiseen toimistorakennukseen. Vasemmalla näkymä ulkoa ja oikealla sisältä. (GLASSX AG)

Kuvan 4.24 mukainen lämpöeristetty solar wall soveltuu lämmöneristysominaisuuksien puolesta Suomen ilmasto-oloihin. Sen sisäosan lämmöneristyksellä voidaan täyttää vuoden 2010 alussa voimaan tulleet lämmöneristysmääräykset (RakMK C3 2010).

Edellä esitelty GLASSX AG:n valoa läpäisevä seinäelementti on periaatteessa hyvin vartenotettava PCM-sovellus, sillä se vähentää rakennuksen valaistuskustannuksia. Sellaisenaan se ei kuitenkaan käy ulkovaipan rakenteeksi Suomessa, koska sen U-arvo ( $0,48 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) ei täytä tämän hetkisiä ulkoseinän lämmöneristysmääräyksiä ( $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ). Siitä huolimatta valoa läpäisevää seinäelementtiä voidaan käyttää ikkunoiden korvikkeena rakennuksissa, joissa ikkunoiden pääasiallinen tarkoitus on rakennuksen valaisu. Valoa läpäisevän seinäelementin periaatetta voitaisiin kehittää edelleen kuvan 4.24 mukaisen seinän suuntaan, jossa voitaisiin käyttää seinän sisäosassakin valoa läpäisevää lämmöneristettä. Tällaisella ratkaisulla voitaisiin päästä tämän hetkisten lämmöneristysmääräyksiä mukaisiin vaatimuksiin, mutta se vaatii paksun eristekerroksen seinän sisäosaan.

Lisälämmöneristetty, valoa läpäisevällä eristeellä ja osittain valoa läpäisevällä PCM-materiaalilla varustettu seinä voisi soveltua esimerkiksi varistorakennuksiin tai halleihin. Tällöin PCM-materiaalilla varustettu seinä sijaitisi rakennuksen eteläsivulla ja muut seinät voitaisiin toteuttaa ilman PCM-materiaalia, koska muilla sivuilla sen käytöstä ei saada merkittävää hyötyä. Näissä seinissä voitaisiin siitä huolimatta käyttää valoa läpäisevää lämmöneristettä, jolloin rakennuksen valaistustarvetta saataisiin vähennettyä.

#### 4.6.5 PCM-materiaali välipohjassa

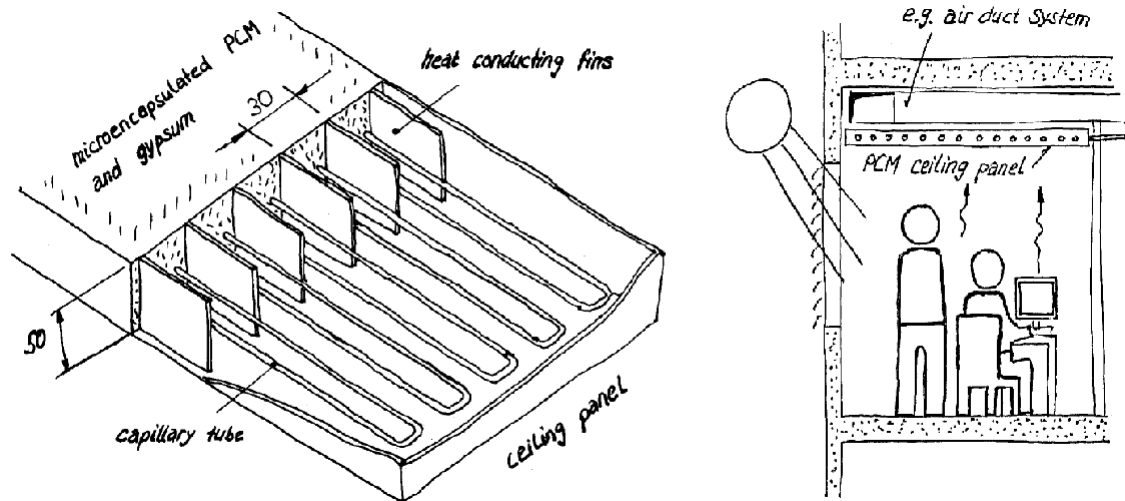
Välipohja tarjoaa rakennuksen lämmitystä ja jäädytystä varten tarkoituksenmukaisen paikan PCM-materiaalille (Koschenz & Lehmann 2004). Jotta välipohjaan lisätty PCM-materiaali toimisi tarkoituksenmukaisesti ja luotettavasti lämmön varastoinnin ja luovutuksen kannalta, tulee välipohjassa käyttää pääsääntöisesti aktiivisesti toimivia järjestelmiä. Näin ollen tässä kappaleessa keskitytään pääasiassa rakennuksen aktiivisen yöaikaisen jäädytyksen hyödyntämiseen välipohjaan sijoitettujen PCM-materiaalien toiminnassa. Aktiivinen lämmitys on periaatteeltaan hyvin samanlainen kuin aktiivinen yöaikainen jäädytys. Näin ollen kesäaikaiseen jäädytykseen sovellettavaa järjestelmää voidaan tarkoituksenmukaisin muutoksin käyttää hyväksi myös aktiivisessa lämmityksessä talvella. Ongelmana saman järjestelmän käyttämisessä sekä lämmityksessä että jäädytyksessä on niiden vaatimien PCM-materiaalien sulamispisteiden eroavaisuudet.

PCM-materiaalia voidaan käyttää välipohjassa kolmella eri tavalla hyväksi:

1. PCM-materiaali alaslasketussa katossa tai välipohjan onteloissa kapseloituna säkkiin tai muuhun vastaavaan esimerkiksi levymäiseen muotoon
2. PCM-materiaali sisällytettynä alaslasketuissa katoissa käytettyjen paneelien runkoaineeseen
3. PCM-materiaali sisällytettynä välipohjan betoniin

Koschenz & Lehmann (2004) ovat kehittäneet tutkimuksessaan aktiivisesti jäädytetyn välipohjapaneelin, joka soveltuu sekä uudis- että korjausrakentamiseen. Paneelin toimintaa tutkittiin sekä laskennallisesti että kokeellisesti tarkasteluin. Lähtökohtana heidän tutkimuksessa oli kehittää aktiivisesti toimiva välipohjapaneeli, jonka avulla voidaan käyttää uusiutuvia energianlähteitä kevytrakenteisen rakennuksen lämmitykseen ja jäädytykseen. Tässä tutkimuksessa kevytrakenteisiksi rakennuksiksi laskettiin suuren ikkunapinta-alan ja sisäisen lämpökuorman omaavat toimisto- sekä kaupalliset rakennukset. Tarkoituksena oli saada välipohjan lämmönvarastointikyky vastaamaan rakennuksen lämpökuormia päivittäisessä syklissä. Kuvassa 4.27 on esitetty periaatteellinen kuva kyseisestä välipohjapaneelistä ja sen sijoituksesta alaslaskettuun kattoon.





**Kuva 4.27** Periaatteellinen kuva aktiivisesti jäädytetystä välipohjapaneelista (vasemmalla) sekä sen sijoittamisesta välipohjaan (oikealla) (Koschenez & Lehmann 2004).

Paneeli koostuu teräksisestä kaukalosta, joka toimii valuastiana PCM-kipsikomposiittimateriaalille ja tarjoaa rakenteelle tarvittavan mekaanisen kestävyuden. Paneelin aktiivinen toiminta on varmistettu sen sisältämällä kapillaarisilla vesiputkilla, joissa kierrätetään viileää vettä yöaikaan. Paneelin lämmönjohtavuutta voidaan tarvittaessa parantaa kuvan 4.27 mukaisilla alumiinilevyillä.

PCM-materiaalina käytettiin mikrokapseloitua parafiinia, jonka sulamislämpö oli 110 kJ/kg (ks. s. 109 taulukko 4.2). Paneelien runkomateriaalina käytettiin kipsiä, jonka sisältämän kideveden ajateltiin suojaavan helposti syttyvää parafiinia tulipalossa. PCM-materiaalin osuus ja ominaisuudet optimoitiin paneelin käyttötarkoituksen mukaan ja 5 cm paksuisen komposiittimateriaalilevyn lopullisiksi ominaisuuksiksi saatiin taulukon 4.7 mukaiset arvot.

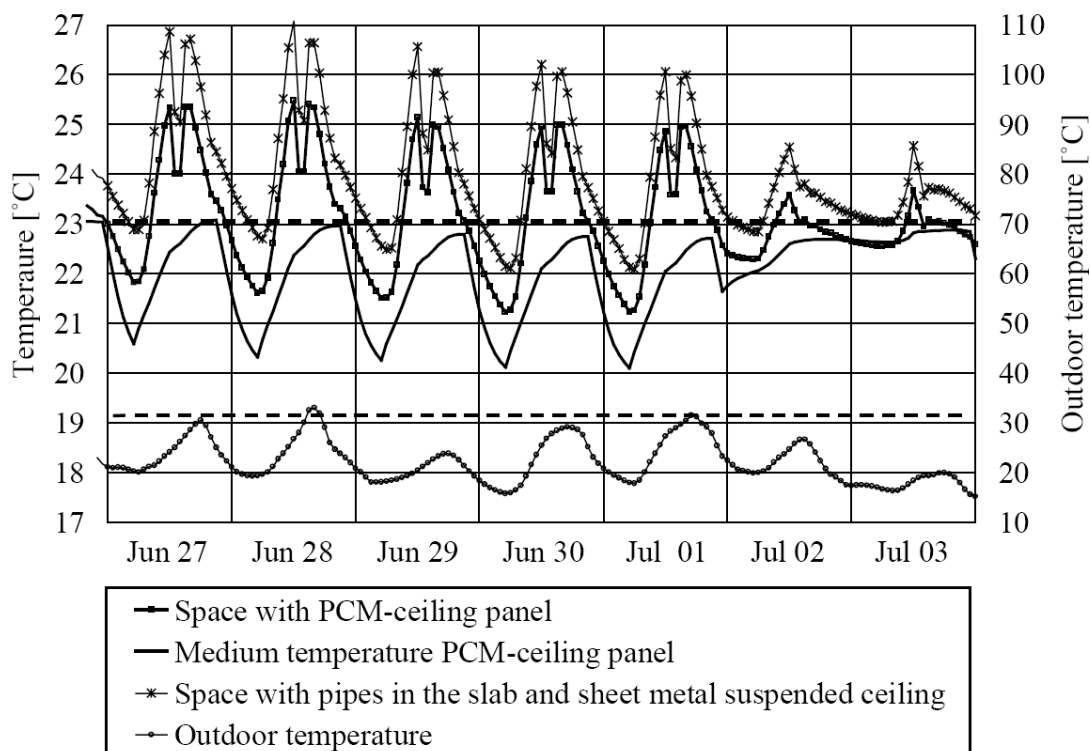
Rakennuksen lämpötila haluttiin rajoittaa välille 21–28 °C. Tavanomaisen, lasijulkisivuisen toimistorakennuksen lämpökuormat arvioitiin seuraaviksi: sisäiset kuormat 130 Wh/m<sup>2</sup>/vrk ja auringonsäteily kesällä 190 Wh/m<sup>2</sup>/vrk eli yhteensä 320 Wh/m<sup>2</sup>/vrk. Laskelmien ja mittauksien yksinkertaistamiseksi rakennuksen oletettiin altistuvan täydelle lämpökuormalle kahdeksan tuntia vuorokaudessa, jolloin jäähdystarpeeksi tänä aikana saatiin 40 W/m<sup>2</sup>/h.

**Taulukko 4.7** PCM-kipsikomposiittilevyn ominaisuudet. (Koschenez & Lehmann 2004)

Ominaisuus	Lukuarvo
Sulamispiste (°C)	22
Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	1030
Lämmönjohtavuus (W/(mK))	1,15
Mikrokapseloidun PCM-materiaalin osuus (kg/m <sup>2</sup> )	13,3 (25 %)

Kuvassa 4.28 on esitetty laskennallisesti määritetyt lämpötilaprofiilit virtuaalisessa rakennuksessa. Vertailun helpottamiseksi kuvassa on esitetty myös tilan lämpötilat ilman PCM-paneelia, jolloin kapillaariputket sijoitettiin välipohjan betonilaattaan. Tuloksista nähdään, että PCM-materiaalilla on selkeä vaikutus tilan lämpötiloihin. Tutkimuksessa tehtiin laskelmien lisäksi laboratoriomittauksia, joiden havaittiin olevan yhtenevät laskentamallin kanssa.

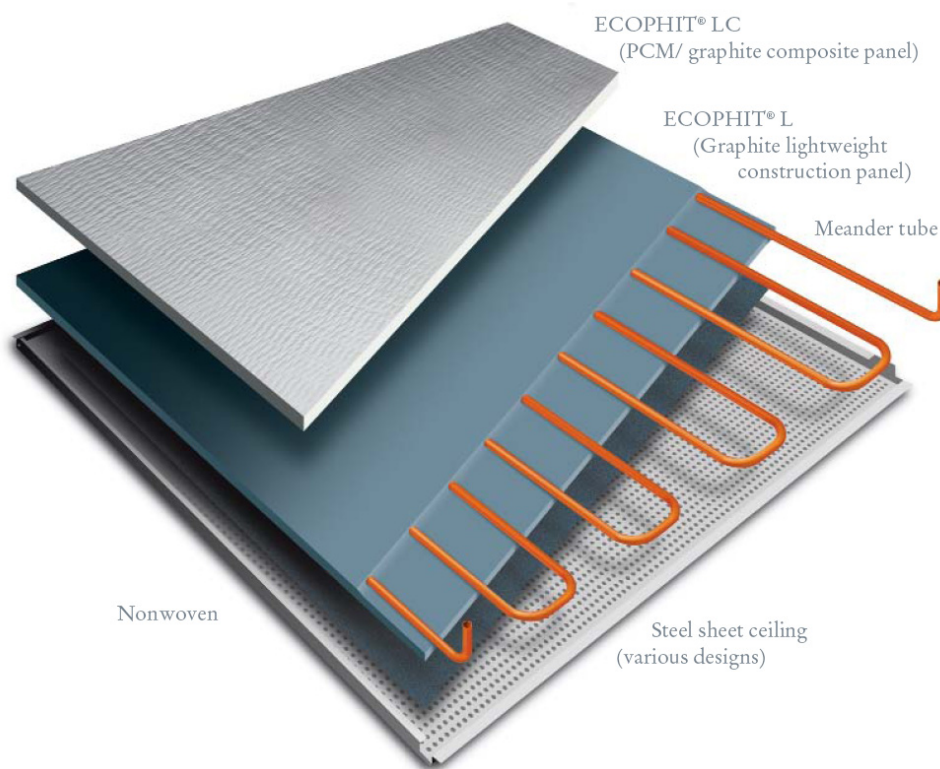
Samaan tutkimukseen liittyen aiottiin toteuttaa myös pilottihanke. Rakentamisen oli kaavailtu alkavan suunnitelmien mukaan kesäkuussa 2003, mutta kyseisen hankkeen toteutuksesta ei löytynyt kirjallisuudesta tietoa. Hankkeessa aiottiin toteuttaa lämpötilamittauksia. PCM-parafiinin tulenarkuuden vaikutus rakennuksen palonkestävyyteen aiottiin ottaa huomioon pilottihankkeessa sprinklerjärjestelmän lisäämisellä, jolloin rakennus täyttää saksalaisten määräysten (DIN 4102-1 1998) mukaisen paloluokan B1 (palonkestävä).



**Kuva 4.28**

Laskennallisesti määritetyt lämpötilaprofiilit huonetilassa PCM-paneelin kanssa ja ilman. Laskennassa on käytetty todellisia olosuhteita kesäviikolla. (Koschenz & Lehmann 2004)

Kuvassa 4.29 on esitetty SGL Groupin kehittämä aktiivisesti toimiva välipohjapaneeli, jossa PCM-materiaalina on käytetty ECOPHIT LC20 PCM-grafiittikomposiittilevyä (ks. kohta 4.5.6). Paneeli soveltuu asennettavaksi kokonsa puolesta sekä uudis- että korjauskohteisiin. Kapillaariputket on sijoitettu suuren lämmönjohtavuuden omaavan kevytrakenteisen grafiittilevyn sisään, jolla taataan lämmön siirtyminen putkissa kiertävän veden ja PCM-materiaalin välillä. Kapillaariputkissa kiertävän veden jäähdytys voidaan toteuttaa muun muassa jäähdytystornilla ja geotermisellä energialla. Tutkimukset ovat osoittaneet, että kyseisellä paneelijärjestelmällä voidaan saavuttaa yli 40 W/m<sup>2</sup>/h jäähdytysteho viilennystä vaativan kahdeksan tunnin aikana. Päivällä, suurimpien lämpökuormien aikaan, PCM-materiaali voidaan nopeasti jäähdyttää viileällä vedellä, mikäli vaaditaan suurempaa jäähdytystehoa.

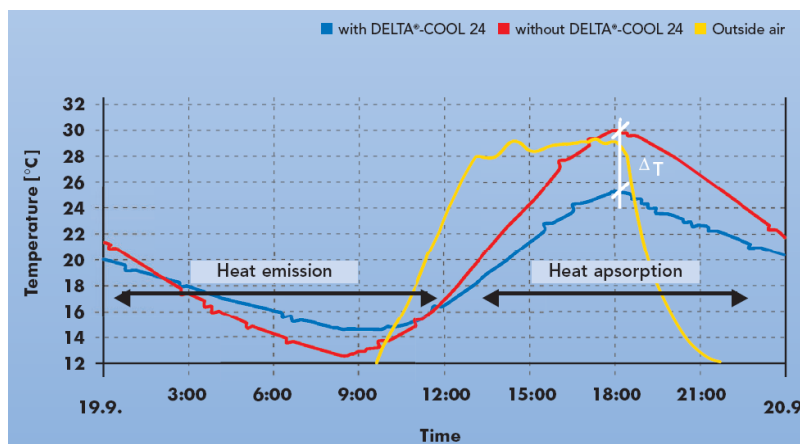


**Kuva 4.29** SGL Groupin aktiivisesti toimiva PCM-välipohjapaneeli (SGL Group).

Kuvassa 4.30 on esitetty Dörkenin DELTA<sup>®</sup>-COOL 24 PCM-pussien sijoittaminen alaslaskettuun kattoon. PCM-pussit voidaan lisätä rakennuksen alaslaskettuun kattoon myös jälkikäteen tarpeen vaatiessa. Kuvan järjestelmä toimii passiivisesti, mutta sen toiminnan maksimoimiseksi, on PCM-materiaali jäähdytettävä yöaikaisella luonnollisella ilmanvaihdolla. Lämmön siirtymisen varmistamiseksi huoneilman ja PCM-materiaalin välillä tulee tuotteet sijoittaa hyvin lämpöä johtavien metallisten kasettien päälle. Tuotteet eivät sovellu suurien, suorasta auringonsäteilystä aiheutuvien lämpökuormien varastointiin, joten niitä tulee ehkäistä muilla rakennuksen suunnitteluun liittyvillä toimenpiteillä. Valmistaja ilmoittaa tuotteiden jäähdytystehoksi 25–40 W/m<sup>2</sup>/h olettaen, että jäähdytyskuorma jakaantuu 10 tunnin jaksolle. Sijoittamalla DELTA<sup>®</sup>-COOL 24 PCM-pusseja alaslaskettuun katoon 8 kg/m<sup>2</sup>, jäähdytystehoksi saadaan noin 30 W/m<sup>2</sup>/h. Materiaalivalmistajan teettämien tutkimusten mukaan kuvan 4.30 mukaisella järjestelmällä kevytrakenteisen rakennuksen sisäilman maksimilämpötila voi laskea jopa 6 °C. Kuvassa 4.31 on esitetty tyypilliset 24-tunnin lämpötilakäyrät huoneessa ilman PCM-materiaalia ja sen kanssa.



**Kuva 4.30** Dörkenin DELTA<sup>®</sup>-COOL 24 pussien asentaminen alaslaskettuun kattoon. (Dörken GmbH)



**Kuva 4.31** Tyypillinen 24-tunnin lämpötilakäyrä huoneessa DELTA<sup>®</sup>-COOL 24 materiaalilla varustettuna (sininen käyrä) ja ilman (punainen käyrä). Keltainen käyrä kuvaa ulkoilmaa. (Dörken GmbH)

Dörkenille tehdyissä tiedusteluissa selvisi, että he eivät valmista enää edellä esiteltyjä PCM-pusseja. Näiden tuotteiden korvaajaksi on tullut kuvan 4.32 mukainen DELTA<sup>®</sup>-COOL 24 levy, jota sovelletaan välipohjassa vastaavasti kuin PCM-pusseja, eli asentamalla ne alaslasketun katon sisään.

Levy koostuu HPDE-muovista valmistetusta kuoresta (610x610x17 mm), joka sisältää 3 kg kohdassa 4.5.7 esitettyä DELTA<sup>®</sup>-COOL 24 -PCM-materiaalia. Kuorimateriaalina käytettävän muovin paloluokka on eurooppalaisen standardin (EN 13501-1 2007) mukaan E eli ”normaali syttymisherkkyyttä”.

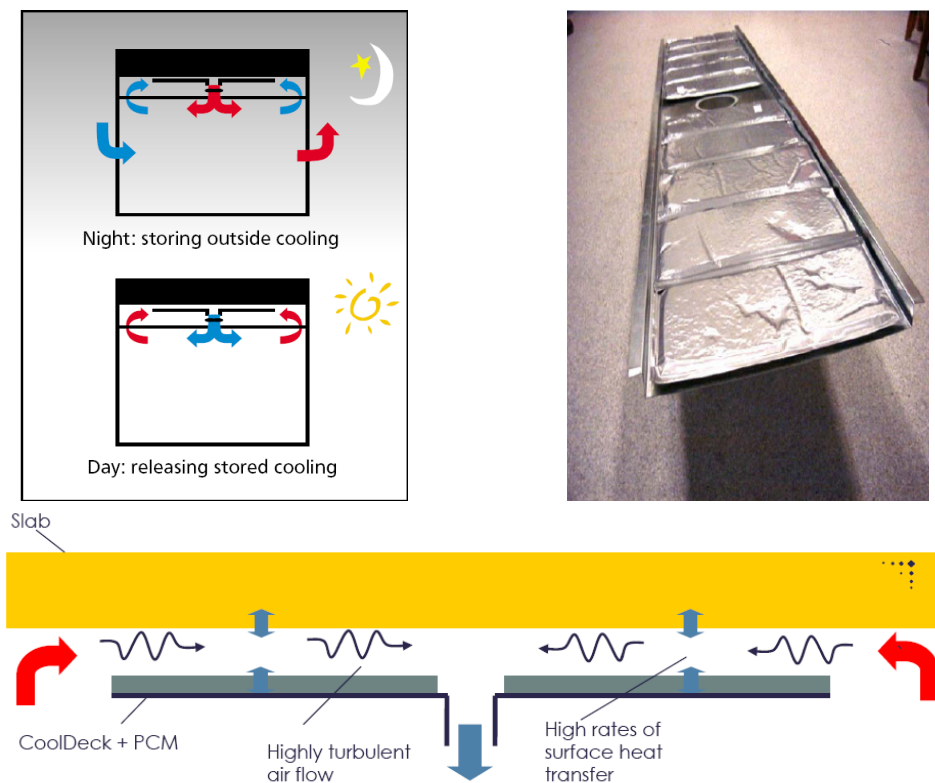
Materiaalivalmistaja ilmoittaa levyn neliöhinnaksi peruskäyttäjälle 70 €/m<sup>2</sup>. Todellinen hinta teollisessa käytössä riippuu tilattavasta määrästä. Valmistajan ilmoittaman PCM-raaka-aineen hinnan (2,00–2,60 €/kg) perusteella saadaan kyseisen levyn raaka-aineen neliöhinnaksi noin 18,50 €/m<sup>2</sup>. Näin ollen levyn sisältämän PCM-raaka-aineen osuus levyn kokonaishinnasta on noin 26 prosenttia.



**Kuva 4.32** Dörkenin DELTA<sup>®</sup>-COOL 24 levy. Vasemmalla levyn yläpuoli ja keskellä alapuoli. Oikeanpuoleisesta kuvasta nähdään levyssä olevat viisi valmista kiinnityspistettä. Tarvittaessa levy voidaan kiinnittää myös ympyröidyistä kohdista poraamalla. (Dörken GmbH)

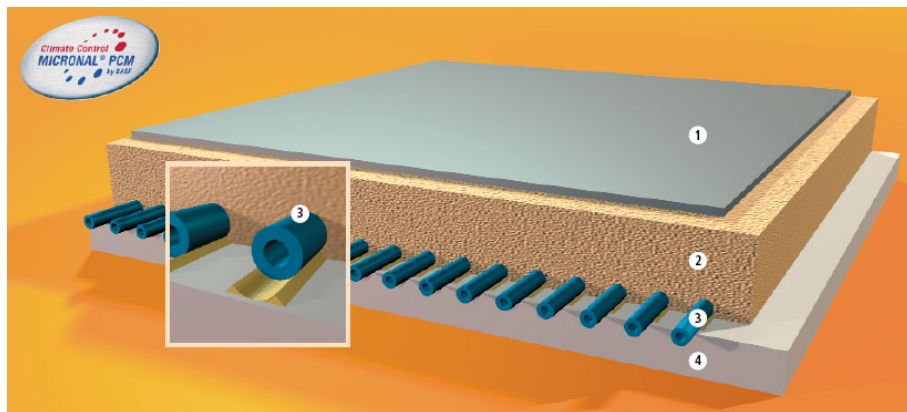
CoolDeck-järjestelmä on Climatorin (ks. kohta 4.5.2) kehittämä aktiivisesti toimiva jäähdytysjärjestelmä, jossa PCM-materiaalilla kasvatetaan välipohjan termistä massaa. Se koostuu kuvan 4.33 mukaisesta metallisesta kasetista, joka sijoitetaan välipohjalaatan alapintaan. Alumiinilla laminoidut, PCM-materiaalilla täytetyt pussit sijoitetaan kasettien sisään. Lämmön siirtyminen PCM-materiaalin, laatan ja sisäilman välillä varmistetaan kierrättämällä turbulentsia ilmaa kasetin ja laatan välisessä tilassa. PCM-materiaali ja laatta jäähdytetään yöaikaisella tuuletuksella. CoolDeck-järjestelmä soveltuu käytettäväksi alaslasketun katon lisäksi lattian onteloissa.

CoolDeck-järjestelmän toimintaa on tutkittu asentamalla se koekohteeseen (Stevenage Borough Council's office) rakennuksen saneerauksen yhteydessä. Asentamisella haettiin ratkaisua rakennuksen ylikuumentumiseen. CoolDeck-järjestelmän vaatima tila oli kyseisessä kohteessa korkeudeltaan noin 220 mm. Järjestelmän on havaittu olevan kustannustehokas tapa toteuttaa rakennuksen jäähdytys, sillä ainoa käyttökustannus aiheutuu tuulettimista. Ennen ja jälkeen asennusta suoritetut lämpötilojen monitoroinnit osoittivat sisäilman lämpötilan laskevan kesäaikaan 3–4 °C. Lisäksi rakennuksen sisäilman on havaittu olevan raittiimpi aamuisin, johtuen yöaikaisesta jäähdytyksestä.



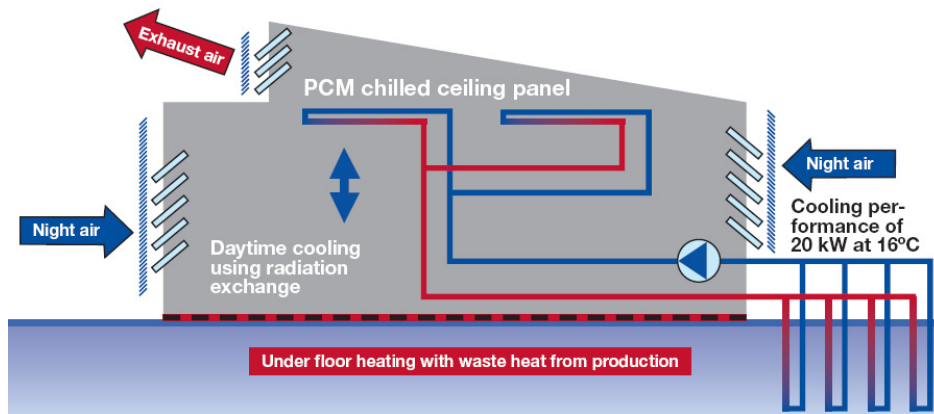
**Kuva 4.33** Ylhäällä vasemmalla ja alhaalla CoolDeck-elementin toimintaperiaate. Ylhäällä oikealla PCM-pusseilla täytetty metallikasetti. (Climator Sweden AB)

Saksalaisella yrityksellä ILKAZELL oli tuotevalikoimassaan aktiivisesti jäähdytettävä sisäkattoon asennettava PCM-paneeli nimeltään ILKATHERM (Cooling Ceiling). Paneelissa lämmönvarastointimateriaalina käytettiin aiemmin Knaufin valmistamaa PCM SmartBoardia, joka sisältää BASF:in valmistamaa Micronal nimistä mikrokapseloitua PCM-materiaalia. Kuten aikaisemmin mainittiin, kyseistä SmartBoardia ei ole enää markkinoilla. Siitä huolimatta järjestelmä esitellään tässä, jotta saadaan periaatteellinen kuva ILKATHERM-PCM-paneelistä. Järjestelmän PCM-materiaalin sulamispisteeksi voidaan valita joko 23 °C tai 26 °C. Kuvassa 4.34 on esitetty ILKATHERM-paneelin rakenne. Ylimpänä paneelissa on ohut metallinen kuori, jonka alapuolinen kerros sisältää polyuretaanivaahdotuksen. Paneelin aktiivisen toiminnan varmistavat kapillaariputket sijaitsevat polyuretaanivaahdotuksen alaosassa. Putket ovat kosketuksessa paneelin alapinnassa sijaitsevaan PCM SmartBoardiin.



**Kuva 4.34** ILKATHERM-paneelin rakenne (Ilkazell GmbH).

Kyseinen järjestelmä on asennettu saneerauksen yhteydessä Saksalaisen yrityksen Engelhardt & Bauer toimistorakennukseen. Asennettu konsepti on Fraunhofer ISE:n kehittämä ja heidän toimesta rakennuksessa suoritettiin lämpötilamittauksia. Projektin tarkoituksena oli jäähdyttää rakennus yöaikaisella viilennyksellä ja lämmittää varastoidulla hukkalämmöllä. Rakenteellisista syistä johtuen jälkikäteen asennettu jäähdytys tuli tehdä kevytrakenteisesti. Kuvassa 4.35 on rakennukseen asennetun järjestelmän toimintaperiaate. Katon alapuolelle asennettujen ILKATHERM-PCM-paneelien aktiivinen jäähdytys toteutettiin geotermisellä viilennyksellä yhdistämällä kapillaariputkiverkosto maahan porattuun lämmönsiirtimeen. Paneeleissa käytetyn PCM-materiaalin sulamispiste oli välillä 23–25 °C. Aktiivisesti jäähdytettyjen paneelien lisäksi rakennuksen yöaikaiseen jäähdytykseen käytettiin automaattisesti avautuvia ikkunoita. Lisäksi rakennuksen hukkalämpöä käytettiin rakennuksen lämmittämiseen lattialämmityksellä. (Hausmann et al. 2008)



**Kuva 4.35** Engelhardt & Bauerin toimistorakennukseen asennetun Fraunhofer ISE:n kehittämän jäähditys-lämmitysjärjestelmän toimintaperiaate (BASF).

Taulukossa 4.8 on esitetty lämmityksen ja jäähdityksen energiankulutukset vuodessa, ennen ja jälkeen järjestelmän asennuksen sekä suunnitelmien mukaiset kulutukset asennuksen jälkeen. Kulutuksista havaitaan, että lämmityskustannukset ovat laskeneet selvästi, mutta jäähdityskustannukset vain vähän. Lisäksi mitatut ja suunnitelmien mukaiset energiankulutukset eroavat selvästi toisistaan. Eron on katsottu johtuvan maan oletettua korkeammasta lämpötilasta ja tehottomasta lämmönsiirtymisestä kapillaariputkiverkostossa. (Hausmann et al. 2008)

Tutkimuksessa havaittiin, että rakennuksen jäähdityksen toteuttaminen kyseisellä järjestelmällä edellyttää kapillaariputkiverkostossa tapahtuvan lämmön siirtymisen tehostamista käyttäen erillistä lämpöpumppua. Lisäksi sen havaittiin olevan häiriöherkkä, joten pienet virheet suunnittelussa ja asennuksessa voivat johtaa selvästi suunniteltua suurempaan energiankulutukseen. (Hausmann et al. 2008)

**Taulukko 4.8** Engelhardt & Bauerin rakennuksen lämmitys- ja jäähditysenergiankulutukset ennen ja jälkeen saneerauksen sekä suunnitelmien mukainen kulutus (muokattu taulukosta: Hausmann et al. 2008).

	Ennen asennusta	Suunniteltu	Mitattu
Lämmitys (kWh/(m <sup>2</sup> a))	160	21	71
Jäähditys (kWh/(m <sup>2</sup> a))	9	1	6



## 4.7 Materiaalien soveltaminen teräsrakentamisessa

Teräsrakenteisten toimistorakennusten julkisivut sisältävät pääsääntöisesti suuria ikkunapintoja, joiden takia rakennukseen kohdistuu auringonsäteilystä huomattava lämpökuorma. Lisäksi toimistorakennuksien ATK-laitteistoista ja käytöstä aiheutuu merkittäviä sisäisiä lämpökuormia. Teräsrakenteiset toimistorakennukset ovat yleensä kevytrakenteisia, eli niiden kantavat rungot koostuvat pilareista ja palkeista, ja välipohja on yleensä valmistettu betonista. Huolimatta betonivälipohjasta teräsrakenteiset rakennukset sisältävät vähemmän termistä massaa verrattuna massiivisiin kantavista betoniseinistä koostuviin rakennuksiin. Alhaisemman rakenteiden lämmönvarastointikapasiteetin vuoksi lämpökuormista aiheutuvat lämpötilanvaihtelut ovat merkittävämpiä teräsrakenteisissa rakennuksissa. Suuremmista lämpötilanvaihteluista johtuen rakennuksen käyttömukavuus ja sen sisäisten toimintojen tehokkuus heikkenee.

Suuren lämpökuorman ja vähäisen termisen massan vuoksi toimistorakennuksissa joudutaan tekemään huomattavia panostuksia rakennuksen jäähdytyslaitteistoihin, jotka kasvattavat rakennus- ja käyttökustannuksia. Toimistorakennuksissa rakenteisiin asetettävien PCM-materiaalien käyttötarkoituksena on lähinnä tavanomaisten jäähdytysjärjestelmien käyttötarpeen vähentäminen tai niiden tarpeen poistaminen kokonaan. Jäähdytysjärjestelmien käyttötarpeen poistaminen faasimuutosmateriaalien käytöllä vaatii rakennuksen huolellista suunnittelua ja lämpökuormien vaikutuksen minimoimista esimerkiksi ikkunoiden varjostuksella lämpiminä vuodenaikoina. On huomattava, että alakaton ja seinärakenteiden sisäpintoihin sijoitettavien PCM-materiaalien tarkoituksena ei ole kumota suoran auringonpaisteen lämmittävää vaikutusta, sillä niiden lämmönvarauskapasiteetti on yleensä siihen riittämätön. Tavanomaisen toimistorakennuksen sisäilman lämpötilahuippu saavutetaan kesällä noin kello 14–15. PCM-materiaalien käytöllä lämpötilahuippua voidaan pienentää ja sen saavuttamisen ajankohtaa siirrettyä myöhäisemmäksi.

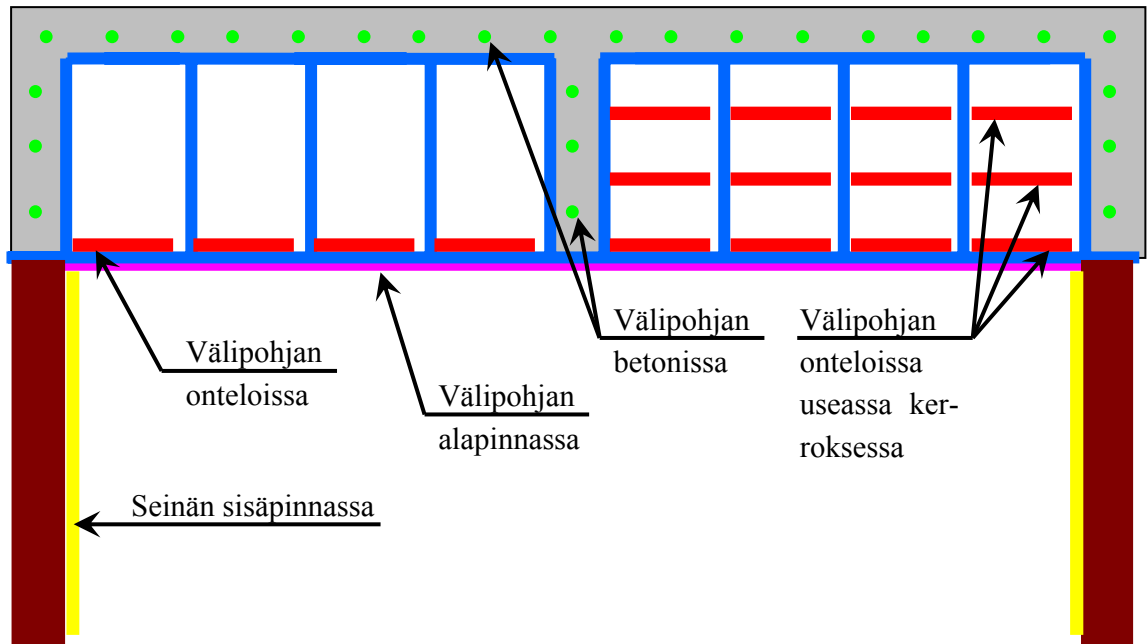
Toimistorakennuksessa PCM-materiaaleja voidaan sijoittaa periaatteessa kaikkiin huoneitilojen sisäpintoihin, alaslakettuihin kattoihin sekä välipohjien onteloihin. Periaatteena PCM-materiaalien sijoittamisessa on, että ne sijoitetaan mahdollisimman lähelle käyttäjiä, eikä niitä rajata huonosti lämpöä johtavilla materiaaleilla huonetilasta. Huoneitilojen sisäpinnoissa materiaaleja voidaan käyttää passiivisesti huoneen lämpötilavaihtelujen mukaan. Mikäli PCM-materiaalit sijoitetaan rakenteiden taakse esimerkiksi välipohjan onteloihin, tulisi ilman kierron ja lämmön siirtymisen varmistamiseksi käyttää aktiivisia järjestelmiä. Tällöin paras lopputulos saadaan käyttämällä automaattisesti lämpötilavaihtelujen mukaan toimivaa aktiivista jäähdytystä.

Rakennussovelluksissa käytettävät PCM-materiaalit ovat pääsääntöisesti kapseloidussa muodossa. Tällöin niiden käytöstä ei aiheudu korroosio-ongelmia teräsrakenteiden kanssa, sillä kapseli erottaa PCM-materiaalin teräsrakenteista. Tämä edellyttää, että kapselit ovat ehjiä ja pysyvät ehjinä rakenteen käyttöiän ajan. Rakennusvaiheessa tulee varoa kapseloitujen PCM-materiaalien kuorien rikkoutumista. Lisäksi rakennuksen käyttäjän tulee olla tietoinen PCM-materiaalien sijainnista ja niiden aiheuttamista rajoituksista jälkikäteen rakenteisiin tehtävien porauksien ja kiinnityksien osalta. Rakennusmateriaaleihin lisätyt kapseloimattomat PCM-materiaalit voivat aiheuttaa teräksen korroosiota käytetystä PCM-materiaalista riippuen, joten materiaalien yhteensopivuus on tarkistettava suunnitteluvaiheessa.

PCM-materiaalien oikeanlaisen toiminnan varmistamiseksi niiden sijoittamiseen suositellaan käytettäväksi laajoja pintoja, joihin niitä sijoitetaan ohuina kerroksina. Näin olen itse PCM-materiaali ei estä lämmön siirtymistä ja materiaalin täydellinen sulaminen ja jähmettyminen ovat mahdollisia.

PCM-materiaalien integroiminen levymäiseen muotoon tai kapseloiminen kasvattaa lopullisen tuotteen kustannuksia huomattavasti verrattuna puhtaaseen PCM-materiaaliin. Kapselointimenetelmistä etenkin mikrokapselointi kasvattaa lopullisen tuotteen hintaa. Makrokapseloituissa PCM-materiaalia sisältävissä pusseissa valmistuskustannukset eivät nouse yhtä suureen rooliin, sillä kapselointi käsittää vain PCM-materiaalin sulkemisen tiiviiseen pussiin. Levymäisissä tuotteissa valmistuskustannukset ovat huomattavan suuret, kuten havaittiin Dörkenin valmistaman, PCM-materiaalia sisältävän levyn yhteydessä (s. 154), jonka PCM-materiaalin raaka-ainekustannukset ovat noin 26 % levyn lopullisesta hinnasta. PCM-materiaalin käytön suunnittelun yhteydessä tulisi pohtia olisiko taloudellisempaa valmistaa lopullinen tuote itse PCM-raaka-aineesta vai käyttää valmiiksi rakenteisiin lisättäväksi jalostettuja tuotteita.

Kuvassa 4.36 on esitetty periaatteellisesti PCM-materiaalien sijoitus teräsrakenteiseen rakennukseen. Kuvassa on esitetty välipohja ja seinärakenne. Välipohja koostuu teräksestä ontelomaisesta rakenteesta (sininen), jonka päällä on betonikerros (harmaa).



**Kuva 4.36** Periaatteellinen kuva PCM-materiaalien sijoitusmahdollisuuksista teräsrakenteiseen ontelomaiseen välipohjaan ja seiniin.

Seinien sisäpintaan (keltainen) PCM-materiaali voidaan sijoittaa joko levymäisenä tuotteena tai rappaukseen sisällytettynä. Seinän sisäpinnassa PCM-materiaali on käytännössä kosketuksissa huoneilmaan, joten se reagoi nopeasti huoneen lämpötilanmuutoksiin. Seinät tarjoavat suuripinta-alaiset alueet PCM-materiaalin sijoittamiselle, jolloin voidaan käyttää ohuempia kerroksia. Tällöin itse PCM-materiaalin alhainen lämmönjohtavuus ei rajoita merkittävästi faasimuutoksia. Se toimii hyvin passiivisesti rakennuksen lämpötilanvaihteluiden mukaan, mutta seinään rapattavaan laastiin on mahdollista sijoittaa kapillaariputkiverkosto, joka jäädyttää PCM-materiaalin tarpeen vaatiessa. Aktiivinen järjestelmä soveltuu paremmin, mikäli rakennuksen sisäinen kuorma on niin suuri, että PCM-materiaalin kapasiteetti ylikuormittuu aikaisin päivällä, jolloin sitä täytyy jäädyttää myös päivällä. Seinään sijoitettavissa PCM-materiaalia sisältävissä levyissä on otettava huomioon niiden palo-ominaisuudet. Mikäli ne joudutaan vuoraamaan esimerkiksi kipsilevyllä, lämmön siirtyminen huoneilman ja PCM-materiaalin välillä heikenee.

Välipohjan alapintaan (magenta) sijoitettavia PCM-materiaaleja koskevat samat periaatteet kuin seinän sisäpintaan sijoitettavia. Välipohjan alapintaan PCM-materiaali voitaisiin sijoittaa myös säkkeinä. Tällöin rakenteeseen jouduttaisiin lisäämään kasettimainen rakenne kannattamaan säkkejä. Ennen kaikkea säkkien käytössä on vältettävä käyttämästä liian paksuja materiaalikerroksia. Seinien sisäpintoihin ja välipohjan alapintaan sijoitettavien PCM-materiaaleja sisältävien levymäisten tuotteiden osalta on otettava huomioon, että ne ovat merkittävästi kalliimpia pelkkään PCM-materiaalin raaka-aineeseen verrattuna. Siksi PCM-materiaaleja sisältävien pussien käyttö tulisi luultavasti edullisemmaksi, vaikka ne jouduttaisiinkin kannattelemaan erillisellä rakenteella.

Välipohjan onteloihin sijoitettava PCM-materiaali (punainen) ei tarvitse olla levymäisessä muodossa, vaan on taloudellisempaa käyttää vähemmän jalostettuja PCM-materiaaleja sisältäviä pusseja. Pussit voidaan sijoittaa kuvan 4.36 mukaisesti joko yhtenä kerroksena tai vastaavasti useina kerroksina. Moneen kerrokseen sijoitettavien PCM-materiaalien yhteydessä ilmaonteloissa tulisi kierrättää yöllä viileää ilmaa, jotta PCM-materiaali saataisiin jähmettymään päivän energian varastointia varten. Viileällä ilmalla saataisiin jäädytettyä osittain myös betonirakenne, jolloin osa lämpöenergiasta kuluisi päivällä betonin lämpötilan nousuun. Myös päivällä onteloissa voitaisiin kierrättää ilmaa puhaltimilla, jolloin ilma saataisiin kiertämään paremmin huonetilan ja PCM-säkkien välillä. Yhteen kerrokseen sijoitettavat säkit toimivat myös ilman jäädytystä, sillä niiden ja huoneilman välillä on vain hyvin lämpöä johtavia rakenteita. Siitä huolimatta yöaikainen onteloiden viilennys on suositeltavaa myös tällöin. Heikkoutena välipohjan onteloihin sijoitettavien PCM-materiaalien osalta on, että ne eivät ole suoranaissessa kosketuksessa huoneilman kanssa. Tämä on kuitenkin hoidettavissa edellä mainituilla tuuletusratkaisuilla. Onteloihin sijoitettavien PCM-materiaalien palosuojaimiseksi riittänevät vastaavat ratkaisut kuin itse teräsrakenteen palosuojaukseen lukuun ottamatta palosuojamaalauksia.

Neljäntenä vaihtoehtona on sijoittaa PCM-materiaali kuvan 4.36 mukaisessa rakenteessa betonimassaan esimerkiksi mikrokapseloituna rakeina tai vastaavasti makrokapseloituina sauvoina. Sovellus voidaan toteuttaa joko passiivisesti tai kapillaariputkiverkostolla aktiivisesti jäädytettynä. Betoniin sijoitettavien PCM-materiaalien toiminta eroaa edellä mainituista sovelluksista, sillä betoni ja PCM-materiaali sijaitsevat lähellä ylemmän kerroksen huonetilaa. Tällöin passiivisesti toimivan sovelluksen ongelmana voi olla riittävien lämpötilanvaihteluiden saavuttaminen PCM-materiaalin läheisyydessä. Ilma liikkuu lämmitessään ylöspäin, jolloin alakerrasta nousevan lämpimän ilman siirtyminen PCM-materiaalin läheisyyteen voi olla liian hidasta sovelluksen toiminnan kannalta. Betoniin sijoitetun PCM-materiaalin huonetilaa viilentävä vaikutus on havaittavissa välipohjan yläpuolisessa kerroksessa. Tästä johtuen aktiivisesti jäädytetystä PCM-materiaalista ja betonista voi aiheutua epämiellyttävää kylmyyttä lattiatasossa yläkerrassa. Betoniin sijoitettavien PCM-materiaalien osalta on otettava huomioon betonin lujuuden heikkeneminen. Kuvan 4.36 mukaisessa sovelluksessa betoni antaa PCM-materiaalille riittävän palosuojan, joten erillistä palosuojauksia ei tarvita.

Rakennussovellukseen käytettävän PCM-materiaalin valinnassa tärkeimpinä valintakriteereinä ovat tarkoituksen mukainen sulamispiste, mahdollisimman suuri sulamislämpö ja soveltuminen paloteknisiltä ominaisuuksiltaan rakennukseen.

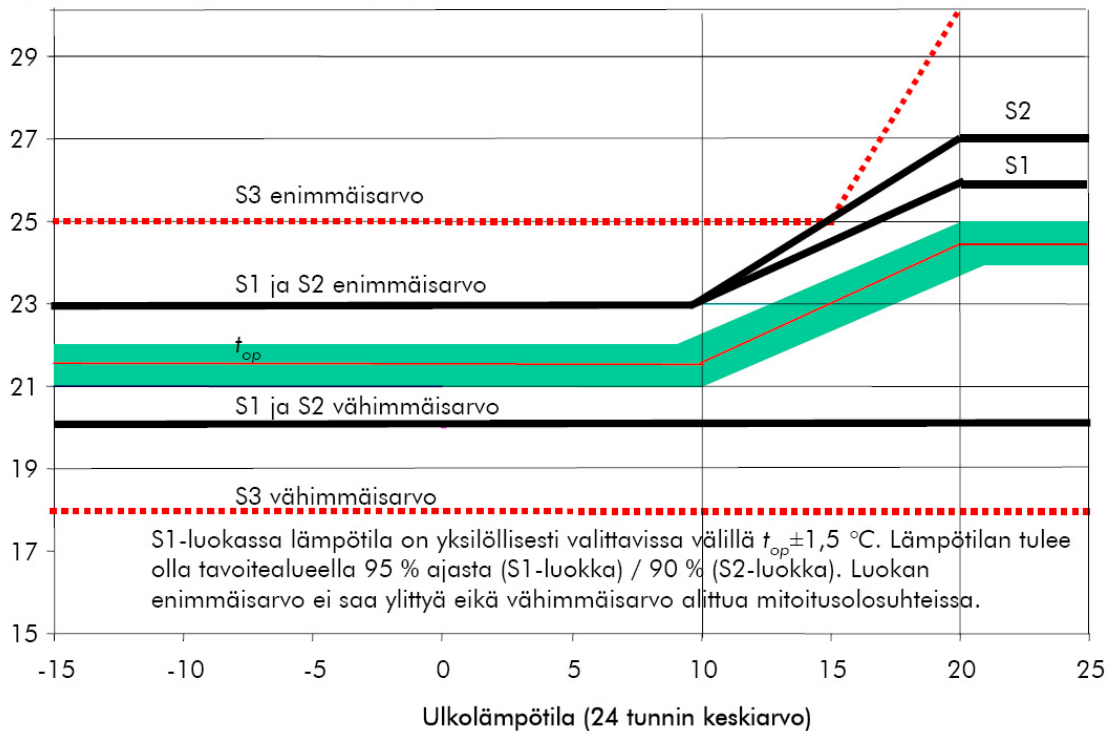
Kaikkein tärkein PCM-materiaalin valintakriteeri on sulamispisteeltään tai alueeltaan oikeanlaisen materiaalin valinta. Oikean sulamispisteen valintaan ei ole mitään absoluuttista ohjetta, sillä optimaalisen arvon valintaan vaikuttaa monet tekijät, kuten raken-

nuksen lämpötila, rakennuksen tavoitelämpötila, käytettävä sovellus, PCM-materiaalin sijainti ja mahdollinen alijäähtyminen sekä mahdolliseen PCM-materiaalin aktiiviseen jäähdytykseen käytettävä jäähdytysmenetelmä.

Sulamispisteen valinnassa on otettava huomioon myös materiaalien sijoituspaikka, sillä lämpötila on korkeampi esim. katossa kuin seinissä. Mikäli PCM-materiaali toimii passiivisesti rakennuksen lämpötilavaihtelujen mukaan, tulee PCM-materiaalin sulamispiste valita hyvin lähelle rakennuksen tavoitekäyttölämpötilaa. Jäähdytettäessä PCM-materiaali aktiivisesti voidaan valita sulamispisteeltään alhaisempia materiaaleja.

Sopivan sulamispisteen valinnassa voidaan käyttää apuna Sisäilmastoluokitus 2008:aa (2008). Se on tarkoitettu käytettäväksi rakennus- ja taloteknisen suunnittelun apuna, kun tavoitteena on rakentaa entistä terveellisempiä ja viihtyisämpiä rakennuksia. Sisäilmastoluokitus asettaa tavoitteellisia arvoja muun muassa rakennuksen sisälämpötilalle. Sisäilmastoluokituksessa sisäilmastotasot jaetaan kolmeen luokkaan S1, S2 ja S3. S2-luokkaa pidetään perustasona, jonka lämpötilaolot tulee olla hyvät. Hieman tiukemmat lämpötilavaatimukset on asetettu luokalle S1, jonka lämpötilaolot tulee olla viihtyisät. Luokkaan S3 kuuluvat rakennukset, jotka täyttävät rakentamismääräysten vähimmäisvaatimukset. Kuvassa 4.37 on esitetty Sisäilmastoluokitus 2008:n (2008) lämpötilojen tavoitearvot eri luokissa. Rakentamisessa tulisi pyrkiä vähintään luokkaan S2, mutta suositeltavaa olisi etenkin toimistorakennuksissa pyrkiä luokkaan S1. Sisäilmastoluokituksen tavoitealueen määrittämisessä on otettu huomioon, että työteho alkaa laskea kesällä lämpötilan ylittäessä 25 °C. Luokissa S1 ja S2 lämpötilan tavoitetasot ovat samat, mutta S1-luokassa lämpötilan tulee olla yksilöllisesti säädettävissä ja pysyä S2-luokkaa paremmin tavoiterajojen sisällä. S2-luokassa on kesällä hieman korkeampi lämpötilan yläraja, jolloin voidaan selvittää ilman koneellista jäähdytystä. (Sisäilmastoluokitus 2008, 2008)

Operatiivinen lämpötila oleskeluvyöhykkeellä



**Kuva 4.37** Lämpötilan tavoitearvot Sisäilmastoluokitus 2008:ssa. Lämpötilan tavoitealue S1-luokassa on esitetty vihreällä tummennettuna. Tavoitealueen keskellä oleva viiva ( $t_{op}$ ) on lämpötilan asetusarvo. (Sisäilmastoluokitus 2008, 2008)

Sisäilmastoluokitus 2008:n (2008) mukaiseen luokkaan S1 pääseminen rakennuksen sisälämpötilan osalta vaatisi yksilöllisesti säädettävissä olevan lämpötilan. Tähän luokkaan päästäkseen PCM-materiaalia tulisi soveltaa aktiivisessa järjestelmässä, jolloin lämpötilaa voitaisiin säätää PCM-materiaalin aktiivista jäähdytystä säätämällä. Käytännössä tämä edellyttäisi kesällä, että PCM-materiaali voitaisiin tarpeen mukaan jäähdyttää myös päivällä (vrt. s.129 yöaikainen jäähdytys). Pelkästään passiivisesti toimivan PCM-materiaalin käytöllä ei voida päästä S1-luokkaan, sillä lämpötila ei ole tällöin säädettävissä. Tällöin passiivisesti toimivan PCM-materiaalin rinnalla jouduttaisiin käyttämään tavanomaista jäähdytysjärjestelmää tarpeen vaatiessa. Hyvällä rakennuksen suunnittelulla passiivisesti toimivalla järjestelmällä voidaan täyttää luokan S2 vaatimukset ilman tavanomaista koneellista jäähdytystä.

Alhaisen sulamispisteen (n. 20–21 °C) omaavia tuotteita voidaan käyttää aktiivisesti toimivissa pintajäähdytysjärjestelmissä, jolloin PCM-materiaali tulee jäähdyttää alle 20 °C materiaalin jäähdytyskapasiteetin varmistamiseksi. Pintajäähdytyksellä saadaan tehokkain jäähdytysvaikutus, mutta alhaisen sulamispisteen vuoksi PCM-materiaali voidaan joutua jäähdyttämään useita kertoja päivässä, varsinkin kesäisin. Tällöin PCM-materiaalin viilentämiseen ei voida käyttää yöaikaista viileää ilmaa, vaan se tulee ottaa esimerkiksi maaperästä. Tällä sulamispistealueella olevat PCM-materiaalit soveltuvat rakennuksiin, joissa tavoitellaan sisäilmastoluokkaa S1.

Rakennuksen passiiviseen tai aktiiviseen lämpötilan tasaamiseen soveltuu PCM-materiaalit, joiden sulamispiste on n. 22–24 °C. Kyseisen sulamispisteen omaavien PCM-materiaalien käyttö aktiivisissa järjestelmissä edellyttää yöaikaista jäädytystä. Passiivisesti toimivassa järjestelmässä on vaarana, että lämpötila ei laske kesäisin edes yöllä PCM-materiaalin sulamispistettä alhaisemmaksi. Onnistuneella rakennuksen suunnittelulla tällä sulamispistealueella olevilla PCM-materiaaleilla voitaisiin päästä luokkaan S1 (aktiivinen järjestelmä) tai luokkaan S2 (passiivinen järjestelmä).

Siirryttäessä sulamispisteeltään yli 25 °C oleviin materiaaleihin voidaan niiden käytöllä rajoittaa lähinnä rakennuksen ylikuumenemista kesällä. Näiden materiaalien jäädyttämiseen ei tarvita aktiivista järjestelmää korkean sulamispisteen johdosta. Lisäksi niitä ei voida käyttää toimistorakennuksissa, mikäli sisäilman lämpötilalla pyritään sisäilmasto- luokituksen mukaiseen luokkaan S1 tai S2.

Riittävän lämmönvarastointikapasiteetin varmistamiseksi ja käytettävän PCM-materiaalimäärän minimoimiseksi tulisi materiaalin sulamislämmön olla mahdollisimman suuri. Sulamislämmöltään oikean materiaalin valinta eroaa riippuen rajoittaako tilavuus käytettävää PCM-materiaalia vai ei. Mikäli tilavuus on rajoittavana tekijänä, tulisi tarkastella materiaalin tilavuuteen suhteutettuja sulamislämpöjä. Ne eroavat huomattavasti massojen suhteen ilmoitetuista sulamislämmöistä, sillä materiaalien tiheydet eroavat paljon toisistaan. Tilavuudeltaan rajoittamattomissa sovelluksissa voidaan valinta tehdä massojen mukaan suhteutettujen sulamislämpöjen perusteella. Sulamislämmön suuruus on sulamispisteen lisäksi merkittävä tekijä, joka vaikuttaa rakennussovelluksiin riittävän PCM-materiaalimäärän valintaan. On kuitenkin huomattava, että suuri sulamislämpö ei takaa riittävää lämmönvarastointikapasiteettia, mikäli lämmön siirtymistä tai PCM-materiaalin toimintaa rajoittaa jokin kohdassa 4.2 esitetyistä tekijöistä, esimerkiksi alhainen lämmönjohtavuus.

Rakennuksen sisäilmalta vaadittujen lämpötilaolojen ylläpitämisen varmistamiseksi tulisi PCM-materiaalin käytön vaikutuksia tarkastella laskennallisesti. Tällöin saataisiin määritettyä sopiva sulamispiste ja riittävä PCM-materiaalin määrä sulamislämmön perusteella. Laskennalliset mallinnukset sisältävät hyvin paljon muuttujia ja huomioon otettavia tekijöitä. Sulamispisteen ja sulamislämmön lisäksi tärkeimmät laskennassa huomioon otettavat tekijät ovat rakennuksen lämpökuormat, PCM-materiaalin sulamiseen kuluvan ajan arvioiminen sen lämmönjohtavuuden ja materiaalipaksuuden perusteella sekä mahdollisen alijäähtymisen huomioon ottaminen. Rakentamiseen suunnattujen PCM-materiaalien ja -sovellusten valmistajilta on mahdollista saada sovelluskohtaista laskenta-apua.

### 4.7.1 Sopiva PCM-materiaali välipohjasovellukseen

Tässä kohdassa valitaan kuvan 4.36 mukaisen välipohjan alapintaan parhaiten soveltuva PCM-materiaali tässä työssä esitellyistä PCM-materiaaleista. Valinta perustuu kuvan 4.36 mukaiselle rakenteelle tehdyille laskennallisille mallinnoille. Niiden perusteella PCM-materiaalin valintakriteereinä ovat: oikea sulamis- ja jähmettymispiste sekä mahdollisimman suuri sulamislämpö. Materiaalikustannuksia ei voitu pitää valintakriteerinä, sillä vain osasta tuotteista saatiin hintatiedot selville.

Mallinnuksen perusteella välipohjan alapintaan sijoitettavan faasimuutosmateriaalin optimaaliseksi sulamispisteeksi saatiin 24 °C, eli PCM-materiaali varastoi lämpöä tämän pisteen yläpuolella. Lämmön luovutuksen tulisi tapahtua hieman alemmassa lämpötilassa, eli jähmettymispisteeksi saatiin 22 °C. Sulamis- ja jähmettymispisteiden perusteella kyseiseen esimerkkirakenteeseen soveltuisi parhaiten PCM-materiaali, jonka sulamispiste olisi 24 °C ja alijäähtyminen 2 °C, jolloin materiaali alkaisi varsinaisesti jähmettyä vasta 22 °C lämpötilassa.

Tutkimukseen valittujen kapseloimattomien PCM-materiaalien tiheydet vaihtelevat hyvin paljon (785–1600 kg/m<sup>3</sup>). Näin ollen sulamislämmöt kilogrammaa kohden (ks. taulukko 4.6) eivät sovellu tuotteiden lämmönvarastointikapasiteettien suuruuden vertailuun, mikäli materiaalmäärän tilavuus on rajoitettu. Tässä PCM-materiaalikerroksen paksuus on rajattu 10 mm:iin, joten lämmönvarastointikapasiteettien vertailu tulee tehdä käyttäen edellä mainitun materiaalipaksuuden perusteella neliömetrin alalle laskettua tilavuutta. Tilavuudeksi saadaan 0,01 m<sup>3</sup>.

Taulukkoon 4.9 on koottu tutkimuksessa aikaisemmin esitellyistä tuotteista valitut kuvan 4.36 mukaiseen sovellukseen faasimuutoslämpötilojen perusteella soveltuvat PCM-materiaalit. Vertailuun valittujen materiaalien valinnassa on sallittu 1 °C heitto sulamispisteen suhteen. Osalle materiaaleista ilmoitetaan sekä sulamis- että jähmettymispiste. Muiden materiaalien osalta niiden oletetaan olevan samoja. Vertailuun on valittu pelkästään kapseloimattomia PCM-materiaaleja. Todellisuudessa näiden tuotteiden tulisi olla kapseloituja tai levymäisiä, jotta ne voitaisiin asentaa välipohjan alapintaan.



**Taulukko 4.9** Sulamispisteeltään välipohjan alapintaan soveltuvat faasimuutosmateriaalit.

Nimi	Sulamis- piste/-alue (°C)	Lämmön- johtavuus (W/(mK))	Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	Sulamis- lämpö (kJ/kg)	Sulamis- lämpö (kJ/m <sup>2</sup> )	Hinta (€/kg)	Hinta (€/m <sup>2</sup> )	Valmistaja
Delta-Cool 24	22...28 <sup>(a)</sup>	0,56...1,12	1500...1600	158	2528	2,0...2,6	38,4	Dörken GmbH
A23	23	0,18	785	170	1335	–	–	EPS Ltd
S23	23	0,54	1530	190	2907	–	–	EPS Ltd
SP 22 A17	23 (22...24) <sup>(b)</sup>	0,6	1430...1490	150	2235	5,5	88	Rubitherm GmbH
A24	24	0,18	790	225	1778	–	–	EPS Ltd
ClimSel C24	24 <sup>(c)</sup>	0,5...0,7	1480	144	2131	–	–	Climator
Latest <sup>TM</sup> 25T	24...26 <sup>(d)</sup>	1,0	1480...1500	175	2625	–	–	TEAP Energy Ltd
A25	25	0,18	785	172	1350	–	–	EPS Ltd
S25	25	0,54	1530	190	2907	–	–	EPS Ltd
SP 25 A8	25...26	0,6	1380	180	2484	5,5	88	Rubitherm GmbH

(a) Jähmettymispiste 22 °C

(b) Jähmettymispiste 20 °C

(c) Jähmettymispiste 20 °C

(d) Alijäähtyminen ≤ 2 °C

Taulukon 4.9 arvoista sulamispisteen ja neliölle lasketun sulamislämmön lisäksi tulee kiinnittää huomioita lämmönjohtavuuteen. Dörkenin valmistaman Delta-Cool 24 -tuotteen sulamisalue vastaa vaadittua sulamispisteen arvoa 24 °C, tosin sulamisalue on melko laaja. Sen jähmettymispiste vastaa vaadittua arvoa 22 °C. Välipohjasovelluksessa neliometriä kohden laskettu sulamislämpö ja lämmönjohtavuus ovat suurimmasta päästä, joten sitä voidaan pitää hyvänä vaihtoehtona kuvan 4.36 mukaiseen välipohjasovellukseen.

Toinen potentiaalinen tuote on EPS Ltd:n Plus ICE (S23). Sen sulamis- ja jähmettymispiste on 23 °C, eli yhden asteen päässä vaadituista arvoista. Lisäksi sillä on suurin sulamislämpö neliometriä kohden (2907 kJ/m<sup>2</sup>) tutkituista materiaaleista.

Rubitherm GmbH:n SP 22 A17 soveltuu myös sulamisalueeltaan tarkasteltuun sovellukseen. Sen tyypillinen sulamispiste on 23 °C ja jähmettymispiste 20 °C. Jähmettymispiste on turhan alhainen vaadittuun 22 °C:een verrattuna, joten jäähdytystä olisi tehostettava mallinnuksessa käytettyyn jäähdytykseen verrattuna. Sulamislämpö neliometriä kohden on keskiluokkaa (2235 kJ/m<sup>2</sup>) tutkituista materiaaleista.

Vaadittu sulamis- ja jähmettymispiste sijoittuu TEAP Energy Ltd:n Latest<sup>TM</sup>25T:n sulamis- (24–26 °C) ja jähmettymisalueelle (noin 22–24 °C). Sillä on myös suuri sulamislämpö (2625 kJ/m<sup>2</sup>) ja lämmönjohtavuus (1,0 W/(mK)), joten se on potentiaalinen vaihtoehto välipohjasovellukseen.

Välipohjan alapintaan parhaiten soveltuvan tuotteen lopullisessa valinnassa tulee ottaa huomioon myös materiaalikustannukset. Materiaalivalmistajilta voidaan tilata myös

tuotteita, joiden sulamis- ja jähmettymispiste on asetettu halutulle tasolle. Näiden tuotteiden hinnat ovat luultavasti kuitenkin valmistajien vakiotuotteita korkeampia. Väli-pohjassa voidaan soveltaa myös valmiiksi levymäiseen muotoon kapseloitua aiemmin esiteltyä tuotetta nimeltä DELTA<sup>®</sup>-COOL 24 levyä (ks. kuva 4.32).

## 4.8 Yhteenveto ja johtopäätökset

Faasimuutosmateriaalien käyttöä lyhyt- ja pitkäaikaiseen lämmönvarastointiin rakennussovelluksissa on tutkittu jo usean vuosikymmenen ajan lukuisissa tutkimuksissa. Niissä on tutkittu mahdollisia materiaaleja sekä niiden soveltamista rakentamisessa. Suurin osa tutkimuksissa kehitetyistä faasimuutosmateriaaleista ei sovellu sulamispisteen ja sulamislämmön lisäksi muilta ominaisuuksiltaan rakentamiseen. Siitä huolimatta nykyään rakentamiseen soveltuvia PCM-materiaaleja valmistavat useat materiaalivalmistajat, joilta on saatavissa sulamispisteeltään erilaisia tuotteita jopa asteen välein. Osa PCM-materiaalien valmistajista on lähinnä kemianalan yrityksiä, jotka eivät suoranaisesti valmista rakentamiseen soveltuvia tuotteita, vaan pelkästään PCM-raaka-ainetta. PCM-materiaaleja valmistavat yritykset ovat ulkomaalaisia, joka voi olla osaltaan syynä siihen, että materiaaleja ei ole käytetty rakennussovelluksissa Suomessa.

Faasimuutosmateriaalit ovat orgaanisia tai epäorgaanisia materiaaleja. Näiden lisäksi on saatavissa kyseisten materiaalien seoksia. Nämä tuotteet eroavat ominaisuuksiltaan toisistaan. Merkittävimpiä orgaanisten (parafiinit) ja epäorgaanisten (suolahydraatit) faasimuutosmateriaalien eroja ovat: orgaaniset materiaalit ovat kalliimpia, lämmönjohtavuudeltaan heikompia ja sulamislämmöltään alhaisempia. Vaikka epäorgaanisillakin materiaaleilla on omat heikkoutensa, voidaan niitä pitää tämän tutkimuksen perusteella potentiaalisempina materiaaleina lämmön varastointiin rakennuksissa. Tällä hetkellä orgaaniset materiaalit ovat potentiaalisia lähinnä rakennusmateriaaleihin sisällytettävänä tuotteina, sillä niitä on saatavissa muutaman mikrometrin kokoisina kapseloituina tuotteina. Orgaanisten parafiinien merkittävä heikkous on niiden käyttäytyminen tulipalossa. Ne ovat paloon osallistuvia materiaaleja, joten ne tulee palosuojata tarvittavin menetelmin. Orgaaniset suolahydraatit eivät ole materiaalivalmistajien mukaan herkästi syttyviä, mutta näille tuotteille ei ole annettu selkeää paloluokitusta. Siksi PCM-materiaalin soveltuminen rakentamiseen myös palo-ominaisuuksiltaan tulee tarkistaa suunnitteluvaiheessa.

Yhteensopivuusongelmia tavanomaisten rakennusmateriaalien välillä ei esiinny, sillä rakennusmateriaaleihin ja etenkin rakenteisiin lisättävät PCM-materiaalit ovat kapseloituja. Sen vuoksi kapselimateriaali suojaa PCM-materiaalia ympäristöltään. Makrokapseloitujen tuotteiden toiminnan edellytyksenä on, että kuorena toimiva materiaali on ehjä ja vesihöyrytiivis. Tämän vuoksi kuorimateriaali tulee pitää ehjänä koko materiaalin käyttöajan ajan. Rakennusmateriaaleihin lisättävät mikrokapseloidut tuotteet eivät puolestaan rajoita materiaalien työstämistä tavanomaisin menetelmin. Kuorimateriaalien

pitkäaikaiskestävyydestä ei löytynyt tietoa kirjallisuudesta, mutta itse PCM-materiaaleille on tehty pitkäaikaiskestävyysskojeita, joiden perusteella tuotteiden käyttöä pidetään riittävänä rakennussovelluksiin.

Faasimuutosmateriaalien käyttö avaa uuden mahdollisuuden rakennuksen energiankulutuksen vähentämiseen käyttämällä jäähdytyksessä ja/tai lämmityksessä apuna luonnollista viileää ilmaa tai hukkalämpöä. PCM-materiaalien käytöllä voidaan vähentää rakennuksen jäähdytystarvetta kuumina vuodenaikoina, mikä on tärkeää rakennusten jäähdytystarpeen suurentuessa lämmöneristyspaksuuksien kasvun ja ilmaston lämpenemisen seurauksena. Rakennuksen lämmitystarpeen vähentämistä silmälläpitäen faasimuutosmateriaalien käytöstä saatavaa hyötyä voidaan pitää kyseenalaisena Suomen ilmasto-oloissa. Siitä huolimatta ne tasoittavat rakennuksen sisäisessä lämpötilassa tapahtuvia muutoksia myös talvisin. Todellista arviota faasimuutosmateriaalien käytöstä saatavasta hyödystä eli jäähdytys- tai lämmitysenergiankulutuksen vähenemisestä on vaikeaa antaa. Näiden arviointi vaatisi laskentamallien luomista, jotka ottavat huomioon useat rakennuksen lämmitys- ja jäähdytystarpeeseen vaikuttavat muuttujat.

Kuhunkin kohteeseen parhaiten soveltuvan faasimuutosmateriaalisovelluksen valinnassa on suositeltavaa olla yhteydessä rakentamiseen soveltuvien PCM-materiaalien valmistajiin. Heiltä on saatavissa tietoa todellisissa sovelluksissa käytetyistä materiaalmääristä ja niistä saaduista hyödyistä. Lisäksi osa materiaalivalmistajista suorittaa tarpeen vaatiessa laskennallisia tarkasteluja. Niiden perusteella voidaan selvittää tapauskohtaisesti parhaiten soveltuva PCM-materiaalin sulamispiste ja vaadittava materiaalmäärä, jotta niiden käytöllä saadaan ekologiselta ja taloudelliselta kannalta riittävää hyötyä.

Faasimuutosmateriaalien soveltamisen suunnittelussa on otettava huomioon Suomen ilmasto-olosuhteet, sillä etenkin rakennuksen ulkoisen auringonsäteilyn mukaan toimivia sovelluksia on testattu lämpimämmissä ilmasto-olosuhteissa. Suomen ilmasto-olosuhteissa faasimuutosmateriaalien käytössä tulisi keskittyä rakennuksen jäähdytystarpeen vähentämiseen. Vaikka faasimuutosmateriaaleja on sovellettu sekä betoni- että kevytrakenteisissa rakennuksissa, niistä on enemmän hyötyä kevytrakenteisissa rakennuksissa.

Faasimuutosmateriaalit ovat oikein sovellettuna rakennuksen energiankulutuksen laskemisen suhteen potentiaalisia materiaaleja. Niiden hyöty rakennuksen jäähdytystarpeen vähentämisessä on osoitettu lukuisissa tutkimuksissa sekä todellisista kohteista mitattujen lämpötilojen perusteella. Huolellisella suunnittelulla ja toteutuksella on merkittävä vaikutus PCM-materiaalin käytöstä saatavaan energiansäästöön. Aika näyttää yleistyykö faasimuutosmateriaalien laajamittainen käyttö rakentamisessa vai jäävätkö tuotteet pysyvästi vain yksittäisissä kohteissa sovellettaviksi ”tulevaisuuden” materiaaleiksi.

# LÄHTEET

Abhat, A. et al., 1981. Development of a modular heat exchanger with an integrated latent heat storage. Report no. BMFT FBT 81-050. Germany Ministry of Science and Technology Bonn.

ACTIS Insulation Ltd. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: <http://www.insulation-actis.com>. [Viitattu: 3.3.2010].

Aspen Aerogels. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: <http://www.aerogel.com/>. [Viitattu: 11.3.2010].

Association for Transparent Insulation. Internet-sivut: <http://www.umwelt-wand.de/ti/index.html>. [Viitattu: 1.6.2010].

Bankvall, C.G. 1972. Heat transfer in insulation and insulated structure. Lund Sweden, Lund Institute of Building Technology, Division of Building Technology, Report 39. 19 p.

BASF. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: [http://www.micronal.de/portal/basf/ien/dt.jsp?setCursor=1\\_290798](http://www.micronal.de/portal/basf/ien/dt.jsp?setCursor=1_290798). [Viitattu: 25.11.2009].

Bayer Sheet Europe GmbH. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: <http://www.bayersheeteurope.com/>. [Viitattu: 31.5.2010].

Björkholtz, D. 1991. Lämpö ja kosteus, rakennusfysiikka. Helsinki, Rakentajain kustannus Oy. 150 s.

BM TRADA. 2006. Certification of TRISO SUPER 10 manufactured by ACTIS. [Viitattu: 3.3.2010]. Saatavissa: <http://www.insulation-actis.com/news/87pdf13.pdf>.

Buddhi, D. & Sawhney, R.L. 1994. Proceedings on thermal energy storage and energy conversion School of Energy and Environmental Studies, Devi Ahilya University, Indore, India.

Caps, R. 2009. Vacuum insulation panels with overlapping edges and other improvements in the ways a VIP can be manufactured. Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Vacuum Insulation Symposium. London, September 17-18. [Viitattu: 17.3.2010]. Saatavissa: <http://www.ivisnet.org/>.

Castellón, C., Medrano, M., Roca, J., Nogués, M., Castell, A. & Cabeza, L.F. 2007. Use of Microencapsulated Phase Change Materials in Building Applications. Spain, University of Lleida. 6 p.

Chen, C., Guo, H., Liu, Y., Hailin, Y. & Chendong, W. 2008. A new kind of phase change material (PCM) for energy-storing wallboard, *Energy and Buildings*, 40, 5, pp. 882–890.

Climator Sweden AB. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: <http://www.climator.com/>. [Viitattu: 12.11.2009].

CSTB. 2007. Comparative measurements of energy consumption of two cells put in external environment. 14 p.

DIBt, Deutsches Institut für Bautechnik. Internet-sivut: <http://www.dibt.de/index.html>.

DIN 4102-1. 1998. Fire behaviour of building materials and elements – Classifications of building materials – Requirements and testing.

Dörken GmbH. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: <http://www.doerken.de/bvf-en/>. [Viitattu: 11.12.2009].

EN 12086. 1997. Thermal insulating products for building applications. Determination of water vapour transmission properties. Brussels, European Committee for Standardization. 16 p.

EN 12667. 2001. Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Products of high and medium thermal resistance. Brussels, European Committee for Standardization. 58 p.

EN 13501-1. 2007. Fire classification of construction products and building elements. Part 1: Classification using data from reaction to fire tests. Brussels, European Committee for Standardization. 53 p.

EN ISO 6946. 2007. Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance. Calculation method. Brussels, European Committee for Standardization. 28 p.

EN ISO 8990. 1996. Thermal insulation. Determination of steady-state thermal transmission properties. Calibrated and guarded hot box. Brussels, European Committee for Standardization. 24 p.

EN ISO 10456. 2007. Building materials and products. Hygrothermal properties. Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values. Brussels, European Committee for Standardization. 25 p.

EN ISO 11925-2. 2002. Reaction to fire test. Ignitability of building products subjected to direct impingement of flame. Part 2: Single-flame source test. Brussels, European Committee for Standardization. 28 p.

EPS (Environmental Process Systems) Ltd. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: <http://www.epsLtd.co.uk/>. [Viitattu 15.11.2009].

Euroform Products Ltd. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: <http://www.euroform.co.uk/>. [Viitattu 17.2.2010].

Fisch, M.N. & Kühl, L. 2004. Use of Microencapsulated Phase Change Materials in Office Blocks. Institute of Building Services and Energy Design (IGS), Braunschweig. 8 p. Saatavissa: <http://www.micronal.de/portal/streamer?fid=290431>.

Frawley, E. 2009. Engineering masters. Thermal testing of innovative building insulation. Dublin. Dublin Institute of Technology. 148 p. + app. 18 p.

Fricke, J. & Tillotson, T. 1997. Aerogels: production, characterization and applications. Thin Solid Films [verkkolehti]. 297, 1-2, pp. 212-223. [Viitattu: 9.3.2010]. Saatavissa: [http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws\\_home/504106/description#description](http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/504106/description#description)

Fricke, J. 2009. Vacuum insulation panels. Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Vacuum Insulation Symposium. London, September 17-18. [Viitattu: 17.3.2010]. Saatavissa: <http://www.ivisnet.org/>.

GLASSX AG. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: <http://www.glassx.ch/index.php?id=336>. [Viitattu: 10.1.2010].

Hagentoft, C.-E. 2001. Introduction to Building Physics. Lund, Studentlitteratur. 422 p.

Hausmann, T., Schossig, P. & Grossmann, L. 2008. Experiences with LowEx PCM Chilled Ceilings in Demonstration Buildings. Fraunhofer ISE, Freiburg, Germany. 9 p.

Hemilä, S. & Utriainen, P. 1989. Lämpöoppi. Jyväskylä, Gummerus kirjapaino Oy. 189 s.

H + H Deutschland. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: <http://www.hplush.de/home>. [Viitattu: 18.12.2009].

Hunger, M., Entrop, A.G., Mandilaras, I., Brouwers, H.J.H. & Founti, M. 2009. The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated phase change materials. *Cement and Concrete Composites* 31, 10, pp. 731-743.

IEA/ECBCS Annex 39. 2005a. VIP – Study on VIP-components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications, Subtask A. International Energy Agency, Energy Conservation in Buildings and Community Systems. 153 p.

Ilkazell GmbH. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: [http://www.ilkazell.de/en\\_index.php](http://www.ilkazell.de/en_index.php). [Viitattu: 11.1.2010].

Incropera, F.P. & DeWitt, D.P. 2002. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 5<sup>th</sup> ed. New York, John Wiley & Sons. 981 p.

Innovative Insulation Inc. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: <http://www.radiantbarrier.com/>. [Viitattu: 24.3.2010].

Koschenz, M. & Lehmann, B. 2004. Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings. *Energy and Buildings* 36, 6, pp. 567-578.

Krannila, M. 1989. *Termodynamiikka*. Kolmas painos. Tampere, Tampereen Pikakopio Oy. 206 s. + 6 liites.

Long, C. 1999. *Essential heat transfer*. Harlow, Pearson Education Limited. 387 p.

Maxit. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: <http://www.sg-weber.de/>. [Viitattu: 26.12.2009].

Mehling, H. & Cabeza, L.F. 2008. *Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications*. (Series: Heat and Mass Transfer). Berlin/Heidelberg, Springer-Verlag. 308 p.

Mills, A.F. 1999. *Basic Heat and Mass Transfer*. 2<sup>nd</sup> ed. Upper Saddle River, Prentice Hall, Inc. 1000 p.

NanoPore Incorporated. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: <http://www.nanopore.com/index.html>. [Viitattu: 17.3.2010].

Napp, V., Caps, R., Ebert, H.-P. & Fricke, J. 1999. Optimization of thermal radiation extinction of silicon carbide in a silica powder matrix. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 56, 1, pp. 77-85.

Oinonen, T. 2010. Vicover Oy. Sähköpostikeskustelu maaliskuussa 2010.

OKALUX GmbH. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: <http://www.okalux.de/>. [Viitattu: 1.6.2010].

Pasupathy, A., Velraj, R. & Seeniraj, R.V. 2008. Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12, 1, pp. 39-64.

Pool, M. 2009. Insulation of a mixed use building with 7 storeys in Munich with VIP. *Proceedings of the 9th International Vacuum Insulation Symposium*. London, September 17-18. [Viitattu: 25.4.2010]. Saatavissa: <http://www.ivisnet.org/>.

Porextherm. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: <http://www.porextherm.com/web/en/start/index.htm>. [Viitattu: 18.1.2010].

RakMk C3. 2010. Lämmöneristys, määräykset 2010. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö. 10 s.

RakMk C4. 2003. Lämmöneristys, ohjeet 2003. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö. 28 s.

RakMk E1. 2002. Rakennusten paloturvallisuus, määräykset ja ohjeet 2002. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö. 40 s.

Regin, A.F., Solanki, S.C. & Saini, J.S. 2008. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12, 9, pp. 2438-2458.

Reim, M., Körner, W., Manara, J., Korder, S., Arduini-Schuster, H.-P. & Fricke, J. 2005. Silica aerogel granulate material for thermal insulation and daylighting. *Solar Energy* 79, 2, pp. 131-139.

RIMA, Reflective Insulation Manufacturers Association. 2002. *Understanding and Using Reflective Insulation, Radiant Barriers and Radiation control Coatings*. 2nd ed. Phoenix. 27 p.



Rubitherm GmbH. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: <http://www.rubitherm.com/english/index.htm>. [Viitattu 20.11.2009].

Schade, A., Sinnesbichler, H. & Nimtsch, A. 2008. Comparative investigations of different roof insulation systems, performed on two test attics at the IBP field station at Holzkirchen. Holzkirchen, Fraunhofer IBP, IBP-Report No. ES-01/2008. 59 p.

Schossig, P., Henning, H.-M., Gschwander, S. & Haussmann, T. 2005. Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 89, 2-3, pp. 297-306.

Schwab, H., Heinemann, U., Ebert, H.-P. & Fricke, J. 2005a. Dependence of Thermal Conductivity on Water Content in Vacuum Insulation Panels with Fumed Silica Kernels. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 28, 4, pp. 319-326.

Schwab, H., Stark, C., Wachtel, J., Ebert H.-P. & Fricke, J. 2005b. Thermal Bridges in Vacuum-insulated Building Facades. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 28, 4, pp. 345-355.

Scobalit AG. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: <http://www.scobalit.ch/de/index.php>. [Viitattu: 1.6.2010].

SGL Group – The Carbon Company. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: [http://www.sglgroup.com/cms/international/home/index.html?\\_\\_locale=en](http://www.sglgroup.com/cms/international/home/index.html?__locale=en). [Viitattu: 15.12.2009].

Sharma, S.D. & Sagara, K. 2005. Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review. *International Journal of Green Energy* 2, 1, pp. 1-56.

Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R. & Buddhi, D. 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, 2, pp. 318-345.

Sisäilmastoluokitus 2008. 2008. Sisäympäristön uudet tavoitearvot. Sisäilmayhdistys Ry. [Viitattu: 26.3.2010]. Saatavissa: <http://www.sisailmayhdistys.fi/attachments/kehityshankkeet/sisailmastoluokitus2008-esittely.pdf>

SPU Systems Oy. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: <http://www.spu.fi/>. [Viitattu: 19.3.2010].

Stritih, U. & Novak, P. 2002. Thermal storage of solar energy in the wall for building ventilation. Second workshop: IEA, ECES IA Annex 17, Advanced thermal energy storage techniques—feasibility studies and demonstration projects, Ljubljana, Slovenia. 3–5 April 2002.

TEAP Energy Ltd. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: <http://www.teappcm.com/>. [Viitattu: 2.11.2009].

Tenpierik, M. & Cauberg, H. 2006. Vacuum Insulation Panel: friend or foe?, In: Proceedings of the the 23<sup>rd</sup> conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, September 6-8. pp. 535-540.

Tenpierik, M.J., Cauberg, J.J.M. & Thorsell, T.I. 2007. Integrating Vacuum Insulation Panels in Building Constructions: an Integral Perspective. *Construction Innovation* 7, 1, pp. 38-53.

Thermablok. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: <http://thermablok.com/index.html>. [Viitattu 11.3.2010].

Thermisol. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: <http://www.thermisol.fi/>. [Viitattu: 11.3.2010].

Tikkanen, M.H. 1990. Helppoa termodynamiikkaa. Helsinki, Otatieto Oy. 227 s.

Tyagi, V.V. & Buddhi, D. 2007. PCM thermal storage in buildings: A state of art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, 6, pp. 1146-1166.

Va-Q-tec. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: <http://www.va-q-tec.com/>. [Viitattu: 16.1.2010].

Variotec GmbH & Co. KG. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: <http://variotec.de/hp427/COMPANY.htm>. [Viitattu: 14.3.2010].

Vicover Oy. Internet-sivut: <http://www.vicover.fi/etusivu.html>. [Viitattu: 15.3.2010].

Vinha, J., Valovirta, I., Korpi, M., Mikkilä, A. & Käkelä, P. 2005. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Talonrakennustekniikan laboratorio, Julkaisu 129. 101 s. + 211 liites.

Vinha, J. 2007. Hygrothermal Performance of Timber-Framed External Walls in Finnish Climatic Conditions. A Method for Determining the Sufficient Water Vapour Resistance of the Interior Lining of a Wall Assembly. Doctoral Thesis. Tampere University of Technology, Publication 658. 338 p. + app. 10 p.

Vinha, J. 2009. Rakennusfysiikka. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto. Luentomoniste osa 1. 512s.

VTT-C-4937-10. 2010. Va-q-vip B tyhjiölämmöneristelevyt. Sertifikaatti. Haltija: Vi-cover Oy.

Wacker Chemie AG. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: <http://www.wacker.com/cms/en/home/index.jsp>. [Viitattu: 17.3.2010].

Wacotech GmbH & Co.KG. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: <http://www.wacotech.de/>. [Viitattu: 1.6.2010].

Web Dynamics Ltd. Materiaalivalmistajan Internet-sivut: <http://www.webdynamics.co.uk/>. [Viitattu: 16.2.2010].

Williams, R. & Ballard, G. 2007. Evaluation of the thermal performance of insulation systems used in roof structures. NPL Report MAT 8. 36 p.

Wong, I.L., Eames, P.C. & Perera, R.S. 2007. A review of transparent insulation systems and the evaluation of payback period for building applications. *Solar Energy* 81, 9, pp. 1058-1071.

Young, H.D. & Freedman, R.A. 2000. *University Physics with Modern Physics*. 10<sup>th</sup> ed. San Francisco, Addison Wesley Longman, Inc. 1513 p.

Zalba, B., Marin, J.M., Cabeza, L.F. & Mehling, H. 2003. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering* 23, 3, pp. 251-283.

Zhang, Y., Zhou, G., Lin, K., Zhang, Q. & Di, H. 2007. Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook. *Building and Environment* 42, 6, pp. 2197-2209.