

Merja Helander

# KEVENNYS- JA FAASIMUUTOS- MATERIAALIEN KÄYTTÖ RAKENTAMISESSA

Rakennetun ympäristön tiedekunta  
Diplomityö  
Tarkastaja: Prof. Juha Vinha  
Tarkastaja: DI Anssi Laukkarinen  
Joulukuu 2024

# TIIVISTELMÄ

Merja Helander: Kevennys- ja faasimuutosmateriaalien käyttö rakentamisessa  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Rakennustekniikan DI-tutkinto-ohjelma  
Joulukuu 2024

Rakentamisessa käytettyä energiaa pyritään vähentämään keventämällä rakennusmassaa uusissa rakennuksissa. Samalla tulee tarkastella tuotteen koko elinkaarimallia. Rakennusmassan keventäminen johtaa tarpeeseen kehittää uusia lämmönvarastointiin liittyviä materiaaleja, jotka soveltuvat lyhyt- ja pitkäaikaiseen lämmönvarastointiin rakenteissa, lisäksi on haluttu kehittää ekologiselta pohjalta materiaaleja, jotka hyödyntävät jo käytettyä tai muun tuotannon sivutuotteena syntynyttä materiaalia samalla kun ne keventävät rakennuksen kokonaismassaa. Rakennusten keventäminen asettaa käytettäville tuotteille erityisiä vaatimuksia silloin kun lämpöä, ääntä tai paloa eristävä massa korvataan uudella kevyemmällä tuotteella. Tutkimuksen tavoitteena oli saada kokonaiskäsitys uusista kevennysmateriaalien- ja faasimuutosmateriaalien tutkimuksista ja innovaatioista sekä jo olemassa olevista rakennusmateriaaleista.

Tämä työ on luonteeltaan kirjallisuusselvitys, jossa tarkastellaan eri osioissa kevennysmateriaaleja ja faasimuutosmateriaaleja. Kevennysmateriaaleiksi olen luokitellut materiaalit, joilla on merkittävä vaikutus varsinkin lopputuotteen tiheyteen ja myös ne, joita voidaan tuottaa kierrätetystä aineksestä. Faasimuutosmateriaalien avulla voidaan tasata rakennuksen lämpötilavaihteluja ja käyttää hyväksi ekologistia energiamuotoja, kuten aurinkoenergiaa. Faasimuutosmateriaali kykenee varastoimaan ja luovuttamaan lämpöä faasimuutoksessa eli olomuodon muutoksen aikana.

Molempiin osioihin sisältyy oma yhteenveto, jossa esitetään materiaalitutkimuksessa käytettyjä tutkimusmenetelmiä ja tutkimuksissa käytettyjä todellisia kohteita. Yhteisenä päätelmänä voidaan todeta, että faasimuutosmateriaalien käyttö pienentää rakennuksen energiankulutusta, mutta taloudellisen kannattavuuden arviointi vaatii tutkimusta Suomen olosuhteissa ja uusia laskentamalleja kannattavuuden mallintamiseksi. Kevennysmateriaalien käyttö pienentänee laastien tuotantokustannuksia samalla, kun ne oikealla tavalla käytettynä parantavat laasteilta vaadittavia ominaisuuksia.

Avainsanat: PCM-laastit, kevennetyt laastit, lämmön varastointi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check-ohjelmalla

# ABSTRACT

Merja Helander: The use of lightweight fill materials and phase change materials in building construction  
Master of Science thesis  
Tampere University  
Master's Programme in Civil Engineering  
December 2024

The energy used in the built environment aim to minimize by reducing the mass of the new buildings. At the same time comes to look at the life cycle of the product. To lighten the mass of the buildings leads to the need to develop new materials related to the heat storage, which are suitable for short-term and long-term heat storage in structures. It is also of interest to develop further materials that are already being used in buildings and utilize different side stream material, while reducing the building mass and ecological footprint.

The reduce of the mass of products set the special requirements when the heat, sound or fire insulating mass is replaced by a new lighter product. The objective of the thesis is to make an overview of new reviews and researches of lightweight and phase change materials as well as already existing construction materials of this kind.

The thesis is a literature report, which is divided into two sections covering lightweight materials and phase change materials. As lightweight materials I have classified those which have significant impact especially in the final product density, and those that can be produced from recycled materials. The phase change materials which can be used to stabilize the temperature of a building and also can be used as the ecological form of energy, such as solar energy. Phase change materials are based on their ability to store and release large amounts of energy in phase transition.

Both sections included the summary, setting out the research methods used in these reviews of material research and used in studies of real sites. As a conclusion is that the use of phase change materials reduces building energy consumption but the evaluation of the economic viability requires research in Finnish conditions as well as new computing models to verify the profitability. The use of lightweight materials in mortars may decrease the mortars production costs at the same time, when they are properly used to improve the characteristics required from mortars.

**Key words:** PCM-mortars, light weight mortars, thermal energy storage

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin Originality Check service.

# ALKUSANAT

Tämä tutkimus on toteutettu Tampereen teknillisellä yliopistolla rakennusfysiikan yksikössä.

Työ on suoritettu professori Juha Vinhan ohjauksessa. Tutkimuksesta teki haasteellisen se, että alussa ei tarkkaan tiedetty, mitä tutkimukselta odotetaan. Tutkimuksen aikana tavoitekuva hieman tarkentui, mutta varsinaisen projektin kannalta tutkimuksen tarkoituksenmukaisuus hämärtyi. Lisäksi tutkimusmateriaalin laajuus ja kiinnostavuus on tuottanut vaikeuksia tutkimusalueen rajaamisessa.

Diplomityön tekoa on haitannut aika ajoin allekirjoittaneen muut velvollisuudet yliopiston ulkopuolella. Kokemuksena sanoisinkin, että yliopisto on edelleen aika kankea kuuntelemaan ulkopuolisten näkemyksiä ja työtapoja.

Kiitos työn ohjaajalle Juha Vinhalle ja kaikille työkavereille kärsivällisyydestä ja neuvoista.

Sastamala, lokakuussa 2024

Merja Helander

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>1 JOHDANTO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Tutkimuksen lähtökohdat.....	1
1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset.....	1
1.3 Tutkimuksen suoritus ja työn rakenne .....	1
<b>2 TUTKIMUSTA KOSKEVA TEORIA.....</b>	<b>3</b>
2.1 Lämmön siirtyminen .....	3
2.1.1 Johtuminen .....	3
2.1.2 Säteily.....	6
2.1.3 Konvektio .....	8
2.2 Ominaislämpökapasiteetti .....	11
2.3 Entalpia .....	12
2.4 Akustiikka .....	12
2.4.1 Materiaalin tiheyden vaikutus ääneneristävyyteen.....	13
2.4.2 Ilmaaäneneristys .....	14
2.4.3 Askelääneneristys.....	15
2.5 Faasimuutos .....	16
2.5.1 Latentti lämpö .....	17
<b>3. KÄYTETTYJÄ STANDARDEJA.....</b>	<b>18</b>
3.1. Standardin määritelmä .....	18
3.2 Käytettyjä standardeja .....	18
3.3 Rakennustuotestandardit.....	19
3.4 RILEM, 1992 .....	20
<b>4. LAASTIEN JA TASOITTEIDEN OMINAISUUKSIA.....</b>	<b>22</b>
4.1 Tasoitteet, yleistä .....	22
4.2 Rappaustasoitteet ulkona .....	22
4.2.1 Kalkkilaastit .....	22
4.2.2 Kalkkisementtilaastit .....	23
4.2.3 Sementtilaastit .....	23
4.3 Sisätasoitteet.....	23
4.3.1 Lattiatasoitteet .....	23
4.3.2 Seinä- ja kattotasoitteet .....	25
4.3.3 Sisäpintojen rappaustasoitteet .....	27
4.3.4 Struktuuripinnoitteet .....	27
<b>5. KEVENNYSMATERIAALIEN KÄYTTÖ RAKENTAMISESSA.....</b>	<b>29</b>
5.1 Johdanto.....	29
5.2 Betonissa ja laasteissa käytettävät kevennysmateriaalit.....	29

5.2.1 Muovi .....	29
5.2.2 Lasi .....	32
5.2.3 EPS.....	33
5.2.4 Polyamidi.....	36
5.2.5 Kumirouhe.....	37
5.2.6 Puupilke.....	40
5.2.7 Öljypalmun kuori.....	41
5.2.8 Kipsi .....	42
5.2.9 Polyuretaani .....	43
5.2.10 Perliitti.....	44
5.2.11 Paisutettu grafiitti.....	46
5.2.12 Muut materiaalit .....	47
5.3 Johtopäätökset ja kehitysehdotukset .....	48
<b>6 FAASIMUUTOSMATERIAALIEN KÄYTTÖ RAKENTAMISESSA .....</b>	<b>50</b>
6.1 Johdanto.....	50
6.2 Faasimuutosmateriaalit.....	50
6.3 Faasimuutosmateriaalien valintakriteerit .....	52
6.4 Materiaalien jaottelu.....	54
6.4.1 Materiaalien jaottelu eri ryhmiin .....	54
6.4.2 Orgaaniset materiaalit .....	54
6.4.3 Epäorgaaniset materiaalit .....	55
6.4.4 Eutektiset materiaalit.....	56
6.5 Esimerkkejä tutkituista faasimuutosmateriaaleista.....	57
6.5.1 Mikrokapselit .....	57
6.6 Rakennerratkaisut ja käyttösovellukset.....	59
6.6.1 Rakennerratkaisut, yleistä .....	59
6.6.2 PCM kipsilevyseinässä.....	61
6.6.3 Käyttö passiivienergiataloissa .....	62
6.6.4 Tasoitteiden käyttäminen lämmityksessä ja viilennyksessä.....	63
6.7 Faasimuutosmateriaalia sisältävien rakenteiden kokeet .....	66
6.7.1 Trombe wall.....	67
6.7.2 Solar wall.....	68
6.7.3 Muut koejärjestelyt.....	69
6.7.4 Infrarakentamisen käyttökohteet.....	73
6.8 Johtopäätökset ja kehitysehdotukset .....	73
<b>7 YHTEENVETO .....</b>	<b>74</b>
<b>LÄHDELUETTELO .....</b>	<b>75</b>

# MERKINNÄT

A	pinta-ala	m <sup>2</sup>
E <sub>b</sub>	mustan kappaleen lähettämä säteilyteho	W/ m <sup>2</sup>
H	entalpia	J
Q	sulamislämpö	J/kg
Q <sub>l</sub>	latentti lämpö	J/kg Q
Q	lämpömäärä	J
R	lämmönvastus	m <sup>2</sup> K/W
Q	lämpömäärä	J
T	lämpötila	K, °C
T <sub>f</sub>	loppulämpötila	K, °C
T <sub>i</sub>	alkulämpötila	K
T <sub>m</sub>	sulamispiste	K
T <sub>m,opt</sub>	optimaalinen faasimuutospiste PCM:lle	°C
T <sub>r</sub>	huonelämpötila	°C
T <sub>d</sub>	huoneen päivälämpötila	°C
T <sub>n</sub>	huoneen yölämpötila	°C
t <sub>d</sub>	varausaika päivällä	s
t <sub>n</sub>	luovutusaika yöllä	s
t <sub>stor</sub>	päivittäinen varausaika	s
t <sub>d</sub> +t <sub>n</sub>	sykli (24h)	s
ΔT	lämpötilaero	K
U	lämmönläpäisykerroin	W/( m <sup>2</sup> K)
U	sisäenergia	J
V	tilavuus	J/(kg K)
c <sub>p</sub>	ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa	J/(kg K)
c <sub>pa</sub>	ilman ominaislämpökapasiteetti	J/(kg K)
D	lämpötilan diffuusiokerroin	mm <sup>2</sup> /s
d	paksuus	m
Δh <sub>m</sub>	sulamisentropia	J/kg
m	massa	kg

$p$	paine	$\text{N/m}^2$ , (Pa)
$q$	lämpövirran tiheys	$\text{W/m}^2$
pH	happamuus, alkalisuus	pH-lukuarvo
$\gamma$	materiaalin tiheys	$\text{kg/m}^3$
$f_{ck}$	betonin puristuslujuus	MPa
$f_{ct,sp}$	halkaisuvetolujuus	$\text{N/m}^2$
	sidoslujuus	MPa
	kutistuma	$\text{mm/m}$
$\phi$	lämpövirta	W
$\alpha$	absorptiokerroin	lukuarvo
$\alpha_{conv}$	konvektion lämmönsiirtokerroin	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
$\alpha_{rad}$	säteilyn lämmönsiirtokerroin	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
$\varepsilon$	emissiviteetti	$\varepsilon < 1$
$\lambda$	lämmönjohtavuus	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
$\sigma$	Stefan-Boltzmannin vakio ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ )	$\text{W/m}^2$
$\tau$	läpäisykerroin	lukuarvo
$R'w$	ilmääneneristysluku	dB
$L'_{n,w}$	askeläänitasoluku	dB
$L_{A,eq,T}$	Keskiäänitaso	dB
$L_{A,max}$	Enimmäisäänitaso	dB

# TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

## **Emissiviteetti**

Emissiviteetti,  $\epsilon$ , kuvaa materiaalin pinnan kykyä lähettää lämpösäteilyä verrattuna ns. mustan kappaleen lähettämään lämpösäteilyyn määrään samassa lämpötilassa.

## **Entalpia**

Entalpialla lasketaan muutosprosessin vaatima työ tai lämpö. Entalpiamuutos ei riipu siitä, miten alku- ja lopputilan välillä kuljetaan. Entalpiamuutoksen merkki vaihtuu, jos prosessi tapahtuu toiseen suuntaan.

## **Eutektinen**

Eutektinen seos on kahden tai useamman aineen seos, jonka mooliosuudet ovat sellaiset, että seoksen sulamispiste on mahdollisimman alhainen.

## **Faasimuutos**

Faasimuutos on materiaaliin sitoutuneen energian määrän muutoksesta johtuva olomuodon muutos, jossa aineen olomuoto riippuu tarkasteltavan aineen lämpötilasta, paineesta ja tilavuudesta.

## **Grashofin luku**

Luku kuvaa nostevoimien suhdetta viskooseihin voimiin.

## **Johtuminen**

Johtumisessa lämpöenergiaa siirtyy materiaalien molekyylien liike-energiana, niiden värähdellessä toisiaan vasten. Johtuminen on ainoa lämmön siirtymismuoto kiinteässä materiaalissa.

## **Konvektio**

Konvektiossa kaasu tai neste virtaa ulkopuolisen voiman (pakotettu konvektio) tai lämpötilaerojen aiheuttamien tiheyserojen (luonnollinen konvektio) vaikutuksesta. Lämpöenergiaa siirtyy virtaavan aineen mukana.

## Latentti lämpö

Suurempi energian varastointikyky perustuu aineen olomuodon vaihteluun. Kun aineeseen tuodaan energiaa, se sulaa tai höyrystyy. Sulamisen aikana aineen lämpötila ei muutu, koska kaikki energia menee aineen kiderakenteen rikkomiseen (endoterminen prosessi). Kun aine alkaa jäähmettymään kiinteäksi, se luovuttaa energiaa vastaavan määrän (eksoterminen prosessi). Sulaessa varastoituvaa ja jäähmettyessä vapautuvaa lämpöä kutsutaan latentiksi eli piileväksi lämmöksi. Yksikkö(J/kg).

## Lämmönjohtavuus

Lämmönjohtavuus,  $\lambda$ , osoittaa lämpömäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen ainekerroksen, kun lämpötilaero eri puolilla olevissa ilmatiloissa on yksikön suuruinen. Yksikkö (W/(m K)).

## Lämmönläpäisykerroin

Lämmönläpäisykerroin, U, ilmoittaa lämpövirran tiheyden 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)).

## Lämmönvastus virtaukseen

Lämmönvastus, R, osoittaa materiaalikerroksen tai rakenneosan lämmönsiirtymisvastuksen. Se on lämmönläpäisykerroimen käänteisluku. Yksikkö(m<sup>2</sup>K/W).

## Ominaislämpökapasiteetti

Suure, joka kuvaa lämpöenergian varastoitumista. Se kertoo, kuinka paljon energiaa tarvitaan kilogramman kyseistä ainetta lämmittämiseen. Ominaislämpökapasiteetti on johdannaisuure, joka riippuu lämpötilan ja sen muutoksen lisäksi vallitsevasta paineesta.

## Nusseltin luku

Luku kuvaa konvektio- ja johtumislämmönsiirron suhdetta nestekerroksessa.

## Pozzolaaninen

Materiaali, joka sitoutuu ja kovettuu veden ja liukoisen kaliumhydroksidin vaikutuksesta.

## Prandtlin luku

Nopeusrajakerroksen ja termisen rajakerroksen suhde

## Rayleighin luku

Lukua käytetään korreloimaan siirtymä laminaarista turbulentiin virtaukseen mikä on riippuvainen noste- ja viskoosien voimien suhteesta. Grashofin ja Prandtin lukujen tulo pystysuorille levyille.

## Sulamislämpö

Sulamislämpö,  $L$ , kuvaa energiamäärää, joka sitoutuu tai vapautuu massayksikön painoisen materiaalikappaleen kiinteän ja nestemäisen olomuodon välisissä faasimuutoksissa. Yksikkö (J/kg).

## Säteily

Säteilyssä lämpöenergia siirtyy sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä. Lämmön siirtyminen säteilyllä ei vaadi väliainetta ja se on tehokkainta tyhjiössä.

## Tuntuva lämpö

Lämpöä, jota materiaalit varastoivat lämmitessä ja luovuttavat jäähtyessä, kun faasimuutosta ei tapahdu. Materiaalin ominaislämpökapasiteetti kuvaa materiaalin ominaisuutta varastoida tuntuva lämpöä. Yksikkö (J/kg)

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Tutkimuksen lähtökohdat

Tutkimuksen lähtökohtana on kehittää uusi laastituotteissa käytettävä täyteaine. Tutkimuksen aikana testataan täyteaineiden vaikutusta materiaalin lämpö-, lujuus, kosteus- tai paloteknisiin ominaisuuksiin. Täyteaineen valinnassa painotetaan keveyttä, lämmöneristävyyttä ja lämmönvarauskykyä säätäviä eristys- ja faasimuutosmateriaaleja.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin kevyttäytteidien, kierrätysmateriaalien ja faasimuutosmateriaalien (PCM/ phase change materials) ominaisuuksia ja tutkimuksista saatua tietoa jatkotutkimuksia varten. Tavoitteena on saada Suomeen uusia energiaa säästäviä tuotteita, jotka ovat myöskin ekologisesti kestäväällä pohjalla. Tämä tutkimus on tehty kirjallisuus- ja aineistotutkimuksena.

## 1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset

Tässä tutkimusosiossa pyritään kokoamaan kattava kuva jo olemassa olevista materiaaleista, tuotteista ja tutkimuksista tutkimusaiheeseen liittyen ja selvittämään mahdollisia käyttökohteita rakentamisessa keskittyen kuitenkin laastien ja tasoitteiden, kehittämismahdollisuuksiin. Lisäksi faasimuutosmateriaalien tutkimus laajentaa tutkittavia materiaaleja myös esim. kipsilevyihin.

Kevyttäytteidistä on pyritty saamaan kattava kuva markkinoilla jo olevista ja kehitteillä olevista materiaaleista. Erityistä huomiota on kiinnitetty materiaalin kierrätykseen. Tarkoitus oli myös selvittää tuotteiden käytön ja jatkokehittelyn kannalta tärkeitä ominaisuuksia, kuten lämmönjohtavuus, työstettävyys, materiaalin lujuus ja palo- sekä akustiset ominaisuudet.

Tarkastelussa selvitettiin myös faasimuutosmateriaalin sulamispisteen merkitystä materiaalin käyttöön asuinrakennuksissa sekä niiden käytettävyyttä laasteissa. Faasimuutosmateriaalien käyttötarkoitus on lämpötilan tasaaminen sekä energian varastointi.

Työssä ei tehty uusia laskennallisia tarkasteluja vaan pyrittiin hyödyntämään olemassa olevaa tietoa ja selvittää esimerkkejä tutkimusolosuhteista ja laskentamenetelmistä varsinaisen tutkimuksen käyttöön. Faasimuutosmateriaalien laskennallinen tarkastelu on tämän tutkimuksen jatkotutkimus, jossa hyödynnetään tämän tutkimuksen esille tuomia tutkimusmenetelmiä ja -tuloksia.

## 1.3 Tutkimuksen suoritus ja työn rakenne

Tutkimuksen ensimmäinen luku ( luku 2) selvittää tutkimuksen taustaan liittyvää teoriaa, kuten lämmönsiirtymiseen liittyvää teoriaa ja faasimuutosmateriaalien toimintaa.

Luvussa 3 esitetään voimassa olevia laatustandardeja, joiden avulla voidaan määrittää tuotteen soveltuvuutta rakentamiseen.

Luvussa 4 perehdytään markkinoilla olevien tasoitteiden ja laastien valikoimaan ja ominaisuuksiin. Kyseeseen tulevat lattiatasoiitteet ja seinätasoiitteet sekä täytelaastit.

Luvussa 5 käsitellään kevyttäytteitä ja niiden ominaisuuksia tutkimusten, Internet-sivustojen ja kirjallisuuden pohjalta. Kustakin materiaalityypistä tuodaan esiin niiden tuotekehittelylle tärkeitä ominaisuuksia, joita on jo tutkittu. Lisäksi käsitellään materiaali-valmistajien jo olemassa olevia tuotteita sekä niiden materiaalien erilaisia käyttökohteita.

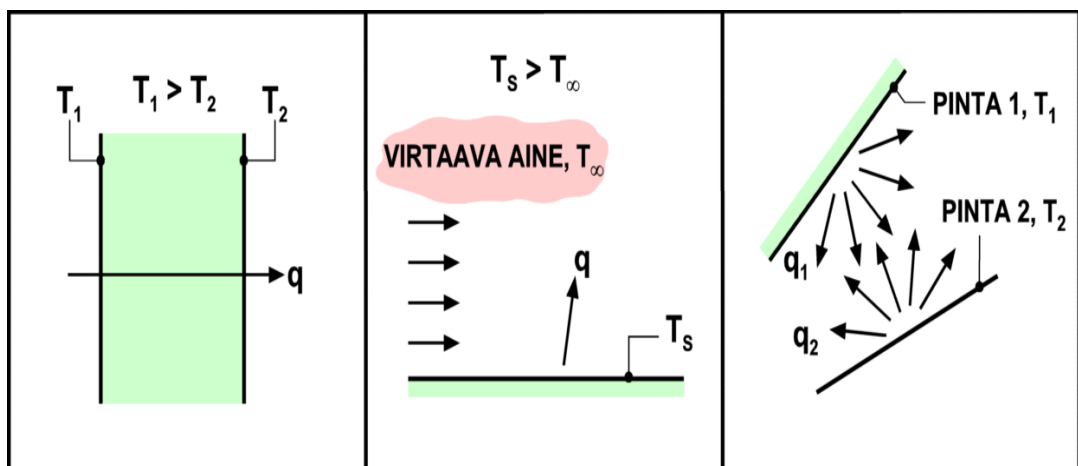
Luvussa 6 käsitellään faasimuutosmateriaaleja ja niiltä vaadittavia ominaisuuksia sekä niiden käyttöä rakentamisessa tutkimusten, kirjallisuuden ja Internet-sivustojen pohjalta. Samoin kuin kevyttuotteissa, tutkimuksista pyritään tuomaan esille tuotekehittelyn kannalta tärkeää tietoa.

Luvussa 7 tehdään yhteenveto koko tutkimuksen sisällöstä ja jatkotoimenpiteistä.

## 2 TUTKIMUSTA KOSKEVA TEORIA

### 2.1 Lämmön siirtyminen

Lämpö siirtyy rakenteissa olevan potentiaali- eli lämpötilaeron vaikutuksesta silloin kun lämmön siirtyminen tapahtuu ilman ulkoista vaikutusta. Lämpö siirtyy aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan kolmella eri tavalla, joita ovat johtuminen, säteily ja konvektio. Rakenteissa ja rakennusmateriaaleissa lämpö siirtyy yleensä näiden kolmen tavan yhteisvaikutuksena. Johtuminen tapahtuu paikallaan olevassa väliaineessa kuten kiinteässä materiaalissa. Konvektio vaatii liikkuvan väliaineen kuten ilman tai kaasun ja säteily ei vaadi väliainetta. (Kuva 2.1)



Kuva 2.1. Lämmön siirtymismuodot (Pentti 2005)

#### 2.1.1 Johtuminen

Johtumisessa eli konduktiossa energia siirtyy materiaalin molekyyleissä tapahtuvan sisäisen värähtelyn seurauksena niin, että vain energia siirtyy materiaalia pitkin korkeammasta lämpötilasta matalampaan niin, että lämpötilaerot tasoittuvat. (Vinha 2009) Lämmön johtuminen tapahtuu materiaalista riippuen nopeammin tai hitaammin. Johtuminen voi tapahtua myös materiaalista toiseen.

Lämmön johtumista kuvataan lämpövirran tiheydellä  $q$  ( $W/m^2$ ), joka voidaan laskea Fourierin lain mukaan: Kaava 2.1

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

missä

$\lambda$  on materiaalin lämmönjohtavuus ( $W/(mK)$ )

$T_1 - T_2$  on kappaleen yli vallitseva lämpötilaero

$d$  on kappaleen paksuus (m)

Suure  $R$  ( $\text{Km}^2/\text{W}$ ) kuvaa materiaalin kykyä vastustaa lämpövirtaa, materiaalikerroksen lämmönvastus lasketaan kaavalla 2.2:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (2.2)$$

Kerroksellisen rakenteen kokonaislämmönvastus voidaan laskea Standardin SFS-EN ISO 6946 mukaisesti yläraja-alaraja- menetelmää käyttäen.

Jos rakenne koostuu eri kerroksista ja eri materiaaleista, lasketaan kokonaislämmönvastus summaamalla eri kerrosten erilaiset lämpövastukset.

Koko rakenteen läpi kulkeva lämpövirta saadaan suhteuttamalla rakenneosien eri vastukset osien suhteelliseen pinta-alaan.

$$R_{\text{tot,lower}} = R_{\text{si}} + R_1 + R_2 + \dots + R_{j1} + R_{j2} + \dots + R_{\text{se}} \quad (2.3)$$

jossa

$R_{\text{tot,lower}}$  on rakenteen kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo

$R_i$  on epätasa-aineisen kerroksen lämmönvastus

eli tehollinen lämmönjohtavuus lasketaan kerroksessa olevien materiaalien suhteella. Tämä on rakenteen lämmönvastuksen alaraja, joka antaa materiaalin eristyskyvylle minimirajan. Alarajamenetelmässä lämpötila muuttuu vain x-akselin suunnassa.

Ylärajamenetelmä perustuu oletukseen, että kaikki lämmön virtaus tapahtuu x-akselin suunnassa, jolloin todellisuudessa lämpö virtaa myös rakenteen suunnassa. Ylärajamenetelmä antaa todellista suuremman arvon lämmönvastukselle.

$$1/R_{\text{tot,upper}} = f_a/R_{\text{tot;a}} + f_b/R_{\text{tot;b}} + \dots \quad (2.4)$$

missä

$R_{\text{tot;a}}, \dots$  ovat osa-alueiden kokonaislämmönvastukset laskettuna kaavalla 2.2

$f_a, f_b, \dots$  ovat osa-alueiden pinta-alat suhteessa koko alaan

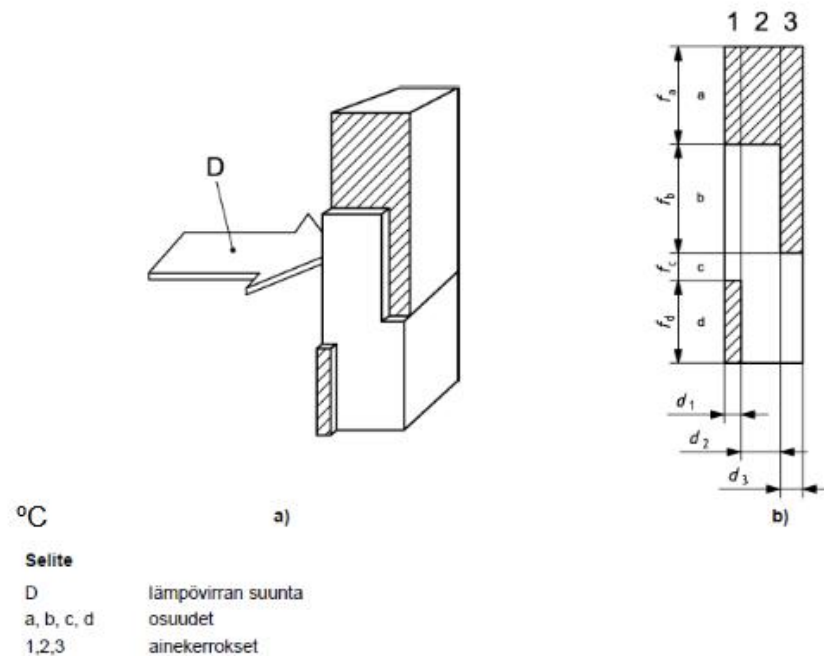
Jos rakennusosassa on pintojen suuntaisia ainekerroksia, joissa on rinnakkain lämmönvastukseltaan erilaisia osa-alueita (esim. puurunko ja villa) eli ainekerrokset ovat epätasa-aineiset (epähomogeeniset), lasketaan rakenteen kokonaislämmönvastus lämmönvastuksen ylälikiarvon  $R_{\text{tot;upper}}$  ja alalikiarvon  $R_{\text{tot;lower}}$  keskiarvona

$$R_{\text{tot}} = R_{\text{tot;upper}} + R_{\text{tot;lower}} / 2$$

Jos ylä- ja alalikiarvon suhde on suurempi kuin 1,5 tätä menetelmää ei voida käyttää.

Eryityisesti näin tapahtuu, jos rakenteessa on metallirakenteita. Tällöin laskettua U-arvoa korjataan kylmäsiltojen korjaustekijällä (RAFNET2020, Oppimateriaalin teoriaosan osio L)

Ylä- ja alalikiarvon laskemisessa käytetään kaavoja (2.3), (2.4). Kaavoissa käytettyjen merkintöjen ymmärtämisessä auttaa alla oleva standardin SFS-EN ISO 6946 kuva 2.2.

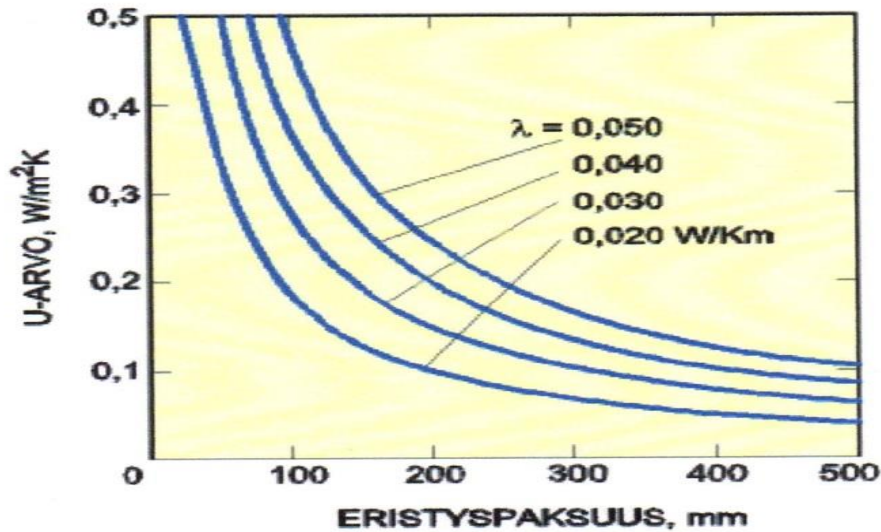


**Kuva 2.2.** U-arvon laskenta ylä- ja alarajamenetelmällä EN ISO 6946-standardin mukaisesti (RAFNET 2020, Oppimateriaalin teoriaosan osio L)

Rakennusmääräyksissä esiintyvä rakenteen lämmönläpäisykerroin, U-arvo, kuvaa stationääritilassa pinta-alayksikköä kohti tapahtuvan lämpövirran, kun lämpötilaero rakenteen eri puolilla on yksikön suuruinen. (Pentti 2005). U-arvo on lämmönvastuksen käänteisluku ( $W/m^2K$ )

$$U = 1/R_{tot} \quad (2.5)$$

U-arvoja tarvitaan kuvaamaan rakennuksen lämpöhäviöitä ja lämmitystarpeen laskennassa. Lisäksi U-arvo kuvaa rakenteen lämpöeristeen eristyskykyä, kuten kuvassa



**Kuva 2.3.** Lämpöeristeen paksuuden vaikutus U-arvoon.

2.3 esitetään. Täytyy muistaa, että lämmöneristyskyky ei parane lineaarisesti eristepaksuutta kasvattamalla, vaan eristyskykyyn vaikuttaa myös muut tekijät.

### 2.1.2 Säteily

Säteily on energian siirtymistä sähkömagneettisina aaltoina, rakennusfysiikassa säteilylämmönsiirtoa tarkastellaan usein kahden pinnan välisenä nettosäteilynä.

Säteilyä on lyhytaaltoista esim. auringon säteily, silloin kun säteily heijastuu esim. rakennuksesta tai pitkäaaltoista huonelämpötila-alueelta materiaalien emittoimaa lämpösäteilyä.

Säteily on energiaa, joka virtaa kaikkialla joko sähkömagneettisena aaltoliikkeenä ja hiukkasten liike-energiana. Säteily voidaan ajatella pieninä energiapaketteina, jotka tunkeutuvat aineeseen ja luovuttavat siihen energiaa.

Mustan kappaleen pinnan emittoimaa säteilyn tehoa kuvataan Stefan-Boltzmannin lailla:

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

missä

$E_b$  mustan kappaleen lähettämä säteilyteho (W)

$\sigma$  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)

Mustaksi kappaleeksi kutsutaan kappaletta, joka absorboi ja sen jälkeen emittoi kaiken vastaanottamansa säteilyn. Musta kappale on ideaalinen säteilijä, jota ei oikeasti ole olemassa, vaan todellinen kappale voidaan tietyllä tarkkuudella kuvata mustana kappaleena, jolloin voidaan hyödyntää Planckin lakia säteilyn intensiteetin laskemiseen.

Mustan kappaleen säteilytehon tiheys ei riipu kappaleen pinnan muodosta tai kappaleen koosta, vaan ainoastaan säteilijän lämpötilasta.

Planckin lain perustana on lämpövärtely ja kappaleen energiatila riippuu taajuudesta ja Planckin vakioista

$$E = h\nu \quad (2.7)$$

missä

$\nu$  on värähtelyn taajuus

$h$  on Planckin vakio ( $6,63 \cdot 10^{-34}$  Js)

Kiinteiden kappaleiden spektri on jatkuva, jolloin Planckin laki voidaan esittää myös aallonpituuden funktiona.

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (2.8)$$

missä

$c$  on valonnopeus ( $3 \cdot 10^8$  m/s)

$k$  on Boltzmannin vakio ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K)

$\lambda$  on aallonpituus

Emissiviteetti ( $\epsilon$ ) kuvaa todellisen kappaleen ja mustan kappaleen säteilytehon suhdetta  $E/E_b$ .

Todellisen kappaleen lähettämä säteilyteho voidaan ilmaista emissiviteetin avulla kaavalla:

$$E = \epsilon \sigma T^4 \quad (2.9)$$

missä

$T$  on säteilevän pinnan lämpötila (K)

$\sigma$  on Stefan-Boltzmannin vakio ( $5,67 \cdot 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)

$\epsilon$  on pinnan emissiviteetti

Tämän tutkimuksen kannalta keskeinen säteilymuoto on auringonsäteily. Suomessa auringonsäteilyn tehon vaihtelu vuodenaikojen ja maantieteellisen sijainnin mukaisesti on erittäin suurta. Suomi on jaettu neljään säävyöhykkeeseen, joiden kuukausittaiset keskilämpötilat ja auringon säteilyenergiat on taulukoitu jopa erittelemällä eri ilmansuunnat toisistaan.

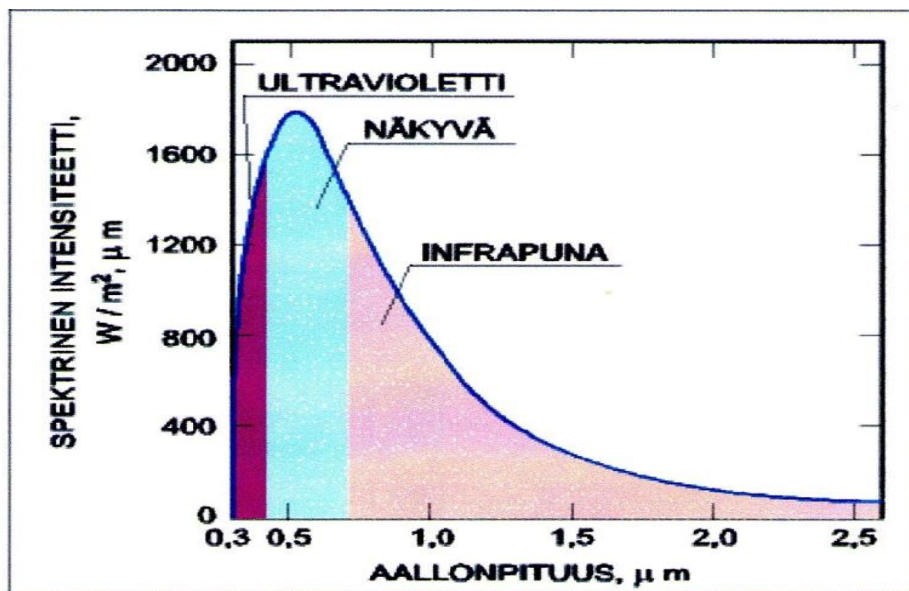
Auringon säteily jakautuu niin, että sen spektrinen intensiteetti vastaa sellaisen mustan kappaleen säteilyä, jonka lämpötila on 5762K. Kuvassa 2.4 esitetään auringon

säteilyn aallonpituuksien jakauma. Kokonaissäteily on jaettu kolmeen osaan: Pintaan osuva suora säteily, pintaan osuva hajasäteily sekä muualta heijastunut säteily.

Suomessa auringonsäteilystä on merkittävää hyötyä kevästä syksyyn, kesällä se voi nostaa huonelämpötiloja merkittävästi, jolloin jäähdytystarve on olennainen. Auringonsäteilyn vaikutusta rakenteisiin voidaan säädellä eri tavoin. Säteilyn absorboitumista rakenteeseen voidaan joko edistää tai ehkäistä rakenteen asemoinnilla ja pintastruktuurilla sekä värillä. Myös ikkunoiden koko ja sijainti ovat olennaisia tekijöitä rakennuksen lämmönsäätelyssä.

Hyvä suunnittelija ottaa huomioon ilmansuunnat ja huoneiden käytön eri vuorokaudenaikoina, tosin nykyään pienten tonttien ja kuntien suunnittelumääräysten myötä vaikuttaminen rakennuksen muotoon ja ilmansuuntiin on rajallista.

Säteilyenergian merkitykseen palataan luvussa 6, jossa käsitellään uusia innovaatioita faasimuutoksen alalta.



Kuva 2.4. Auringonsäteilyn spektrinen intensiteetti

### 2.1.3 Konvektio

Konvektiossa lämpö siirtyy kaasun tai nesteen virtauksessa paine-eron vaikutuksesta. Virtaus voi olla pakotettu tai luonnollinen. Pakotetussa konvektiossa virtaus aiheutetaan ulkoisen voiman avulla (esim. pumpulla). Luonnollista konvektiota esiintyy rakenteiden sisällä, kuten paksuissa eristeissä, joissa on yhtenäinen huokosverkosto. Lämpimän pinnan läheisyydessä oleva ilma lämpenee ja alkaa virrata ylöspäin, kun taas kylmän pinnan puolella oleva ilma jäähtyy ja virtaa alaspäin. (Vinha 2009, LUT-noppaluennot)

Luvussa neljä on esimerkki konvektion hyödyntämisestä käytännössä ns. trombeseinässä. Rakennuksia suunniteltaessa on otettava huomioon esimerkiksi tuulen vaikutus, ilman kerrostuminen sekä liikkuminen lämmön siirtymisessä.

Lämmön konvektio pinnan ja ilman välillä voidaan laskea Newtonin jäähtymislain mukaan:

$$Q_{\text{conv}} = \alpha_{\text{conv}}(T_s - T_a) \quad (2.10)$$

missä

$\alpha_{\text{conv}}$  on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin ( $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ )

$T_s$  on materiaalin pintalämpötila (K)

$T_a$  on ympäröivän ilman lämpötila (K)

Konvektio lämmönsiirtoa analysoidaan yhtälöillä, jotka on muutettu dimensiottomiksi yhdistämällä muuttujia.

Tällaisia muuttujia ovat mm.

#### **Nusseltin luku**

$$\text{Nu} = \frac{\alpha L}{\lambda} \quad (2.11)$$

missä

$\lambda$  on fluidin lämmönjohtavuus ( $\text{W}/\text{mK}$ )

$L$  on karakteristinen pituus (m)

$\alpha$  on paikallinen konvektiokerroin ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )

#### **Reynoldsin luku**

$$\text{Re} = r_a d_h / (\eta_a / \rho_a) \quad (2.12)$$

missä

$r_a$  on virtausnopeus, m/s

$d_h$  on virtauskanavan hydraulinen halkaisija, m

$\eta_a$  on dynaaminen viskositeetti  $\text{Pa}\cdot\text{s}$

$\rho_a$  on tiheys  $\text{kg}/\text{m}^3$

Luku lasketaan virtaavan aineen materiaaliominaisuuksilla

**Prandtlin luku**

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (2.13)$$

missä

- $\mu$  on dynaaminen viskositeetti (kg/ms)
- $c_p$  on ominaislämpökapasiteetti (J/(kg K))
- $\lambda$  on lämmönjohtavuus (W/(Km))

**Grashofin luku**

$$Gr = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu} \quad (2.14)$$

missä

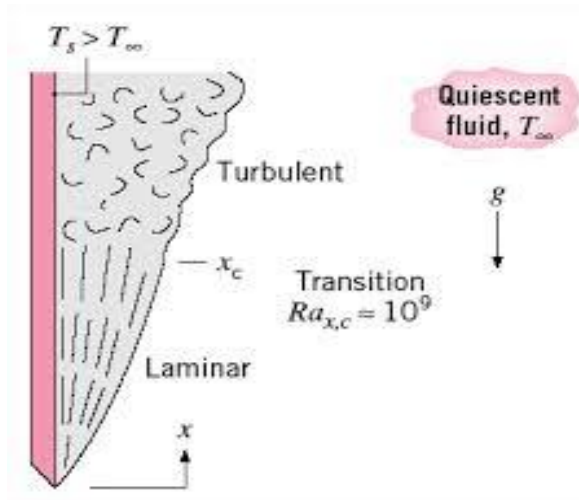
- $\beta$  on tilavuuden lämpölaajenemiskerroin (1/K)
- $g$  on gravitaatiovakio (9,81 m/s<sup>2</sup>)
- $T_s$  on pinnan lämpötila (K tai °C)
- $T_\infty$  on rajalämpötila (K tai °C)
- $L$  on pystypinnan korkeus(m)
- $\nu$  on aineen kinemaattinen viskositeetti (m<sup>2</sup>/s)

**Rayleighin luku**

$$Ra = GrPr = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu \alpha} \quad (2.15)$$

joka on Grashofin ja Prandtlin lukujen tulo pystysuorille levyille

Vapaassa kovektiossa siirtymä laminaarista turbulentiin virtaukseen tapahtuu suunnilleen Rayleighin luvun 10<sup>9</sup> kohdalla. Kanavavirtauksessa siirtymä laminaarisesta turbulentiin virtaukseen tapahtuu alueella Ra=2000-10000.( Kuva 2.5.)



**Kuva 2.5.** Virtauksen siirtymä, (Lappeenrannan teknillinen yliopisto)

## 2.2 Ominaislämpökapasiteetti

Suure, joka kuvaa lämpöenergian varastoitumista. Se kertoo, kuinka paljon energiaa tarvitaan kilogramman kyseistä ainetta lämmittämiseen yhden lämpötila-asteen verran. Ominaislämpökapasiteetti on johdannaisuure, joka riippuu lämpötilan ja sen muutoksen lisäksi vallitsevasta paineesta. Taulukossa 2.1 on esitetty materiaalien ominaislämpökapasiteetteja.

Energiamäärä, joka vaaditaan materiaalin lämpötilan nostamiseen saadaan kaavasta:

$$Q = cm\Delta T \quad (2.16)$$

missä

$c$  on materiaalin ominaislämpökapasiteetti (J/(kg K))

$m$  on materiaalikappaleen massa (kg)

$\Delta T$  on materiaalin lämpötilanmuutos (K)

Lämpömäärä on positiivinen, jos materiaaliin tuodaan lämpöä. Materiaalin lämpötilan laskiessa siitä viedään lämpöä, jolloin laskettu lämpömäärä on negatiivinen. Laskennassa kiinteän aineen ominaislämpökapasiteetti voidaan olettaa vakioksi, koska kiinteät ja nestemäiset aineet laajenevat lämmitessään vähän.

Hyvin pienten lämpömäärän muutosten ominaislämpökapasiteetti  $c$  (J/(kg K)) voidaan laskea kaavalla:

$$c = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT} \quad (2.17)$$

**Taulukko 2.1.** Materiaalien ominaislämpökapasiteetteja, SFS-EN ISO 10456

Materiaali	Ominaislämpökapasiteetti $c$ (J/kg K)
Betoni	1000
Graniitti	1000
Kipsilevy	1000
Polyuretaanivaaho	1400
EPS	1450
Puu	1500-1700
Savitiili	800
Teräs	450
Vesi	4190

## 2.3 Entalpia

Entalpialla lasketaan muutosprosessin vaatima työ tai lämpö. Entalpien muutos ei riipu siitä, miten alku- ja lopputilan välillä kuljetaan. Entalpiamuutoksen merkki vaihtuu, jos prosessi tapahtuu toiseen suuntaan: veden höyrystymisentalpia lämpötilassa 25 °C on +44 kJ/mol, joten tiivistymisentalpia samassa lämpötilassa on -44 kJ/mol. (Kalliorinne et al. 1990) Entalpia on tilafunktio, joka määritellään kaavalla:

$$H = U + pV \quad (2.18)$$

missä

$U$  on systeemin sisäenergia (J)

$p$  on systeemin paine (N/m<sup>2</sup>)

$V$  on tilavuus (m<sup>3</sup>)

## 2.4 Akustiikka

Ihmisen havaitsema ääni on ilmanpaineen nopeaa vaihtelua, jossa painealue vaihtelee välillä 10mPa-100Pa. Äänen taso lasketaan paineesta logaritmiasteikolla ja sen yksiköksi on sovittu desibeli (dB).

Äänen nopeus kiinteässä aineessa ja ilmassa on erilainen. Ilmään nopeus on 340 m/s taajuudesta riippumatta, mutta aineessa äänen nopeus vaihtelee eri materiaaleilla.

Esim. puulla nopeus on 3400-4500 m/s, kun taas mineraalivillalla se on 180 m/s. Rakenteen ääneneristävyys riippuu pääasiassa rakenteen massasta ja taajuudesta

Tässä tutkimuksessa vaadittavat akustiset ominaisuudet voidaan jakaa kahteen eri osa-alueeseen. Ne ovat ilmaääneneristys ja askelääneneristys.

Ääneneristystä mitataan desibeleinä ja desibelitasoille on määrätty tietyt raja-arvot käyttötarkoituksen mukaisesti. Taulukossa 2.2 on esitetty Ympäristöministeriön asetuksen 796/2017 mukaiset ääneneristykselle asetetut raja-arvot, joiden katsotaan täyttyvän, kun rakennus suunnitellaan ja rakennetaan ohjeissa esitetyllä tavalla tai äänieristyksen mittausta suoritetaan rakennuksessa todennäköisesti esiintyvien tilanteiden pohjalta esimerkiksi käyttämällä laboratoriomittauksia, aikaisemmin hyväksytyjä rakenneratkaisuja teknisissä selosteissa esitetyjä ratkaisuja, laskentamenetelmiä sekä kenttämittauksia.

Käytettyjen menetelmien tulee täyttää standardivaatimukset EN- tai ISO-standardien mukaisesti. Ääniolosuhteita on pyritty simuloimaan erilaisilla laskentamenetelmillä, joita on esitelty esim. rakennusfysiikkaseminaareissa vv. 2007 ja 2009. (Kylliäinen). Ääneneristyksen problematiikkaa on käsitelty myös Joose Takalan diplomityössä, Suomalaisen asuinhuoneistojen ääniolosuhteet ja ääneneristävyden mittaustapa

*”Tutkimuksessa selvitettiin ääneneristysmittausten taajuusalueen laajentamisen vaikutuksia. Uusien ja vanhojen mittalukujen erotuksia vertailtiin keskenään. Tuloksista voitiin päätellä, että pienten taajuuksien mittaaminen vaikuttaa merkittävästi rakenteiden paremmuusjärjestykseen ja suurien taajuuksien mittaamisella ei ollut merkitystä. Ilmaääneneristystä kuvaavilla mittaluvuilla pienten taajuuksien sisällyttämisellä mittalukuihin oli selvä vaikutus kevyille rakenteille, mutta massiivirakenteille vaikutus oli huomattavasti pienempi. Askelääneneristystä kuvaavilla mittaluvuilla pienet taajuudet muuttivat huomattavasti rakenteiden paremmuusjärjestystä. Suurien taajuuksien mittaamisella ei ollut askel- eikä ilmaääneneristyksen kannalta merkitystä.” (Takala Joose 2013)*

### 2.4.1 Materiaalin tiheyden vaikutus ääneneristävyyteen

Yksinkertaisen rakenteen ääneneristävyys kasvaa 6dB massan kaksinkertaistuessa, jolloin materiaalin tiheydellä on suuri merkitys. Jos rakenne on kelluva, materiaalin tiheyden raja-arvoksi voidaan asettaa  $700-800 \text{ kg/m}^3$ , joka tarkoittaa 50 mm laatan paksuudella  $n.30-40 \text{ kg/m}^2$ . Tutkimuksissa on kevennetyillä materiaaleilla saavutettu tämä taso.

**Taulukko 2.2.** Asuinrakennuksissa noudatettavat akustiset vaatimukset**Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä 796/2017**

<b>Pienimmät sallitut ilmanääneneristysluvun <math>R'_w</math> (dB) arvot</b>		
Asuinhuoneiston ja sitä ympäröivien tilojen välillä yleensä		55dB
Asuinhuoneiston ja toista huoneistoa palvelevan uloskäytävän välillä, kun välillä on ovi		39dB
<b>Suurimmat sallitut askeläänitasoluvun <math>L'_{n,w}</math> (dB) arvot</b>		
Asuinhuoneistoa ympäröivistä tiloista keittiöön tai muuhun asuinhuoneistoon yleensä		53dB
Uloskäytävästä asuinhuoneeseen		63dB
<b>Suurin sallittu jälkikaiunta-aika uloskäytävissä (sekuntia)</b>		
Uloskäytävässä, josta on käynti vähintään kahteen huoneistoon		1,3 s
<b>Rakennuksen LVIS-laitteiden ja muiden niihin rinnastettavien laitteiden aiheuttama suurin sallittu äänitaso asunnossa</b>		
	$L_{A,eq,T}$ (dB)	$L_{A,max}$ (dB)
Keittiö	33	38
Muut asuinhuoneet	28	33

**2.4.2 Ilmääneneristys**

Ilmääneneristyksen tarkoitus on vähentää huonetilaan syntyneen ilmaäänien siirtymistä toiseen tilaan tai rakennuksen ulkopuolisen äänilähteen aiheuttaman melun siirtymistä ulkoa sisään.

Ilmääneneristyksen suure  $R$ (dB) kuvaa rakenteen kykyä eristää äänienergian siirtymistä rakenteen toiselle puolelle. Rakenteen ääneneristyskyky on riippuvainen taajuudesta ja massasta. Rakenne ei kuitenkaan käyttydy suoraan verrannollisesti esim. massan määrään, vaan on riippuvainen rakenteen asettelusta ja esim. jäykkyydestä, sekä äänilähteestä ja sen taajuusalueesta.

Ympäristöministeriön asetukset 796/2017 ja 360/2019 määrittelevät äänieristyksen eri tasot uusilla määritelmillä, jotka eroavat vanhoista maankäyttö- ja rakennuslain 958 /2012 määritelmistä

### 2.4.3 Askelääneneristys

Askelääneneristyksen tarkoitus on eristää rakenteeseen tulevien mekaanisten äänten kulkeutuminen rakenteen toiselle puolelle. Asetuksen 796/2017 mukaan suurin sallittu askeläänitasoluku  $L'_{n,w}$  on asuinhuoneistojen välillä 53 dB.

Ongelmia ovat tuottaneet äänet, jotka tuottavat suurimmat askeläänitasot alle 100 Hz:n äänitaajuudella. Mittauksissa ei aikaisemmin ole otettu huomioon alle 100 Hz:n äänitasoa mittausten puuttumisen vuoksi. Mikko Kylliäinen ja Antti Mikkilä kiinnittivät tähän huomiota tutkimuksessaan rakennusosien ilmaääneneristävyyksien mallintaminen rakentamisessa ja tuotekehityksessä. (Rakennusfysiikka 2009)

Spektripainotusermi  $C_1$  lasketaan taajuuskaistoilla 100-2500 Hz ja  $C_{1, 50-2500}$  taajuuskaistoilla 50-2500 Hz. Spektritermi kuvaa askeläänipainetasoa poikkeamaa vertailukäyrästä. Kapeakaistainen äänispektri koetaan yleensä häiritsevänä, jolloin rakenne, joka muuten täyttää ääneneristysvaatimukset, ei toimi hyvin todellisen askelääneneristäjänä.

Uusimmat mittaukset tulee huomioida suunniteltaessa välipohjien rakenteita. Normaali mittauksella mitatut ääneneristystasot ovat kelloilla rakenteilla parempia, kuin esimerkiksi muovimatolla tai parketilla päällystetyillä latioilla. Spektritermillä mitattuna kelluvan lattian ääneneristys on huonompi kuin muiden lattioiden.

Askelääneneristystä voidaan yksinkertaistaen laskea EN standardin 12354-2 mukaisesti lattiapäällysteen askelääneneristävyyden parannusluvun  $\Delta L_w$  ja sivutiesiirtymän huomioon ottavan tekijän K ja välipohjan pintamassan perusteella silloin, kun välipohjan pintamassa on 100-600 kg/m<sup>2</sup>.

Ekvivalentti askeläänitasoluku  $L_{n,w,cq}$  [dB] saadaan kaavasta:

$$L_{n,w,eq} = 164 - 35 \lg \frac{m'}{\frac{1 \text{ kg}}{\text{m}^2}} \quad (2.19)$$

jossa  $m'$  on välipohjan pintamassa [kg/m<sup>2</sup>]

Askeläänitasoluku  $L'_{n,w}$  [dB] saadaan kaavasta

$$L'_{n,w} = L_{n,w,eq} - \Delta L_w + K \quad (2.20)$$

jossa  $\Delta L_w$  on päällysmateriaalin mitattu askelääneneristävyyden parannusluku.

Esimerkki  $\Delta L_w$  i askeläänitasoluvun laskennasta:

Askelääneneristävyyden parannusluku materiaalilla  $\Delta L_w = 14$  dB

Sivutiesiirtymän korjaus  $K = 1$  dB

Välipohjarakenteen pintamassa esim. 530 kg/m<sup>2</sup>

$$L_{n,w \text{ eq}} = 164 - 35 \lg \frac{530 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}}{\frac{1 \text{kg}}{\text{m}^2}} = 69,7 \text{ dB}$$

$$L'_{n,w} = (69,7 - 14 + 1) \text{ dB} = 56,7 \text{ dB}$$

Askeläänitasoluvun määrittämiseen käytettävät mittaukset voidaan mitata standardin SFS-EN ISO 140-7 mukaisesti.

## 2.5 Faasimuutos

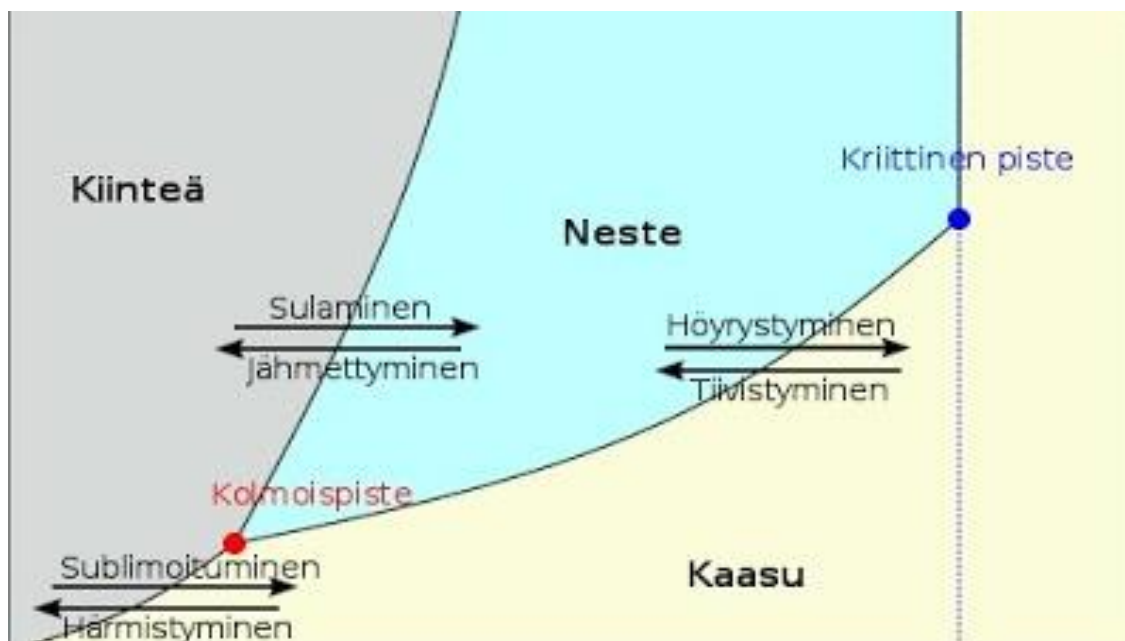
Faasimuutoksia tapahtuu nestemäisen, kiinteän ja kaasumaisen olomuodon välillä.

Rakentamisessa faasimuutosta käsitellään yleensä vain nestemäisen ja kiinteän olomuodon välillä.

Kuvassa 2.6 nähdään aineen olomuotomuutokset. Faasimuutoksessa aineen olomuoto riippuu tarkasteltavan aineen lämpötilasta, paineesta ja tilavuudesta

Aine voi olla puhdas, eutektinen sekoitus tai ei-eutektinen sekoitus. Eutektisessä sekoituksessa faasimuutos tapahtuu tietyssä lämpötilassa, kun taas ei-eutektisessä sekoituksessa faasimuutos tapahtuu lämpötilan muuttuessa portaittain. Eutektinen seos tarkoittaa ainetta, jossa seoksen mooliosuudet ovat sellaiset, että sulamispiste on mahdollisimman alhainen.

Faasimuutos voi tapahtua, kun aineeseen tuodaan tai siitä viedään energiaa. Sulaminen tarvitsee energiaa, kun taas aineen jähmettyminen tuottaa energiaa.



Kuva 2.6. Aineen olomuodot, Fysiikka 2

## 2.5.1 Latentti lämpö

Suurempi energian varastointikyky perustuu aineen olomuodon vaihteluun. Kun aineeseen tuodaan energiaa, se sulaa. Sulamisen aikana aineen lämpötila ei muutu, koska kaikki energia menee aineen kiderakenteen rikkomiseen (endoterminen prosessi). Kun aine alkaa jähmettyä kiinteäksi, se luovuttaa energiaa vastaavan määrän (eksoterminen prosessi).

Sulaessa varastoituvaa ja jähmettyessä vapautuvaa lämpöä kutsutaan latentiksi eli piileväksi lämmöksi. Siirtyvä lämpömäärä voidaan laskea kaavalla:

$$Q = m L \quad (2.21)$$

missä

$L$  on sulamislämpö ( J/kg)

Kuvassa 2.7 esitetään latentin lämmön varastoituminen faasimuutoksen aikana.

1. Kuvasta huomataan, kuinka ensin materiaali jäähtyy jähmettymispisteeseen, joka on laskettavissa lämpötilan muutoksen ja aineen (neste) ominaislämpökapasiteetin avulla.

2. Sen jälkeen faasimuutoksessa lämpöä vapautuu, mutta lämpötila pysyy muuttumattomana.

3. Kiinteä aine luovuttaa lämpöä siihen asti, kunnes se on tasapainossa.

Fig. 8 shows the time evolution of the temperature  $T$  of the pure ideal body, and the time evolution of the heat flux  $q$  leaving the body, if the external environment is subjected to a temperature step  $\Delta T$ , which leads to the solidification of the body. During the cooling there are three steps:

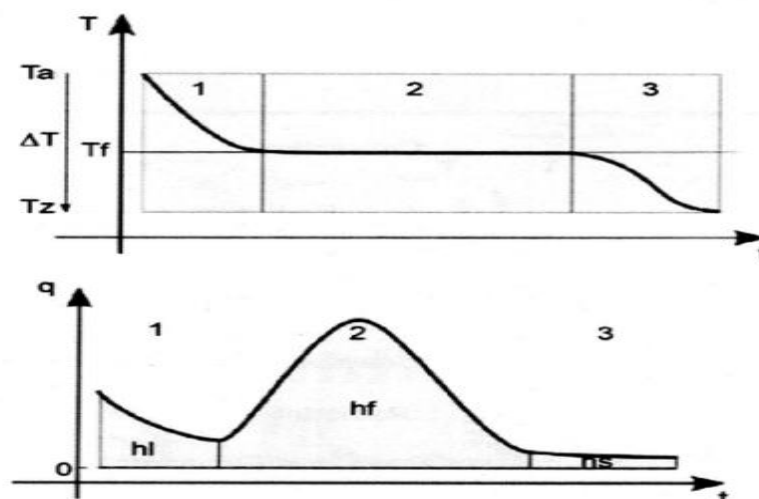


Fig. 8. Time evolution of the temperature and heat flux during the solidification of a pure body submitted to a temperature step  $\Delta T$ .

**Kuva 2.7.** Latentin lämmön muodostuminen (Kuznik et al. ,2010)

## 3. KÄYTETTYJÄ STANDARDEJA

### 3.1. Standardin määritelmä

Standardit ovat julkaisuja, joihin on kirjattu yhteisesti sovittuja vaatimuksia, suosituksia tai vaikkapa ominaisuuksia tuotteille ja niiden valmistukselle tai testaukselle sekä järjestelmille tai palveluille. Ilman näitä yhteisiä sopimuksia arkemme ei olisi lainkaan niin sujuvaa ja turvallista. ( SFS Suomen Standardit ry)

### 3.2 Käytettyjä standardeja

Tasoitteissa ja laasteissa asetetaan standardeja tuotteen lujuus- ja kestävyysominaisuuksien perusteella. Lisäksi tuotteelle asetetaan päästövaatimuksia sen mukaisesti, missä tuotetta käytetään. Erityisesti on kiinnitetty huomiota esim. pölyämättömyyteen sekoitusvaiheessa.

Yleisimmät Suomessa käytetyt standardit ovat EN ja ISO standardit, sekä VTT:n tutkimusten perusteella saadut hyväksynnät ja sertifikaatit.

EN-standardi tarkoittaa eurooppalaisten jäsenvaltioiden hyväksymää standardia. Standardisoimisjärjestö CEN.

SFS-EN on standardi, joka on hyväksytty kansallisesti Suomessa. Saksassa esim. DIN-EN)

ISO-standardi on kansainvälinen. SFS-ISO on voimassa Suomessa ja kansainvälisesti muualla kuin Euroopassa. SFS-EN-ISO on vahvistettu kaikissa kolmessa järjestössä.

VTT myöntää tuotesertifikaatteja, joiden avulla yritys voi osoittaa tuotteen olevan vaatimukset täyttävä niin kotimaassa kuin kansainvälisesti

NA on kansallinen liite, jota käytetään Eurokoodien kanssa

ASTM International vuoteen 2001 asti American Society for Testing and Materials on kansainvälinen standardisoimisjärjestö, joka kehittää ja julkaisee vapaaehtoisia, yksimielisiä ja teknisiä standardeja.

ACI-standardi, American Concrete Institute on myös usein käytetty näissä tutkimuksissa.

CE-merkinnällä tuotteen valmistaja tai valtuutettu edustaja vakuuttaa, että tuote täyttää EU:n direktiivien ja asetusten olennaiset vaatimukset Merkitty tuote saa liikkua vapaasti EU:n alueella. Yleensä CE-merkinnän hoitaa valmistaja itse eli vakuuttaa toimivansa asetettujen vaatimusten mukaan, mutta tietyt tuotteet on testautettava niin sanotussa ilmoitetussa laitoksessa ennen merkinnän kiinnittämistä. ( SFS Suomen Standardit ry

Standardi voi olla kansallinen, eurooppalainen tai kansainvälinen.

Kullakin standardilla on oma tunnus, josta selviää monta asiaa. Tunnus voi olla esimerkiksi SFS-EN ISO 128-1:2020

Se, missä maassa tunnus on vahvistettu, näkyy standardin ensimmäisestä kirjainyhdistelmästä, esimerkiksi SFS-tunnus on suomessa vahvistetun standardin tunnus, kun taas esimerkiksi Saksassa käytetään tunnusta DIN.

Eurooppalainen standarditunnus on EN ja Euroopan valtioiden täytyy vahvistaa kaikki eurooppalaisen standardointijärjestön (CEN) standardit.

ISO merkintä tarkoittaa maailmanlaajuisia standardointia.

Standardin numerotunnus pysyy aina samana.

### **3.3 Rakennustuotestandardit**

Rakennustuotteille on käytössä Euroopan tasolla harmonisoidut tuotestandardit, joissa on sekä vapaaehtoisia ja pakollisia sovellettavia osia.

Rakennustuoteasetus edellyttää rakennustuotteiden CE-merkintää, jos kyseiselle tuotteelle on julkaistu harmonisoitu eli yhdenmukainen tuotestandardi. CE-merkinnällä valmistaja siis ilmoittaa tuotteen ominaisuudet yhdenmukaisella eurooppalaisella tavalla.

Rakennustuotteiden CE-merkinnän yhteydessä CE-merkintä tarkoittaa yleensä sitä, että tuotteen ominaisuudet on ilmoitettu harmonisoidussa tuotestandardissa nimettyjä menetelmiä käyttäen. Toisin sanoen, CE-merkintä ei vielä takaa tuotteen soveltuvuutta tiettyyn tilanteeseen, vaan ainoastaan sen, että sille ilmoitetut ominaisuudet on määritetty standardoiduilla menetelmillä.

Velvoittavasti merkittyinä harmonisoidussa tuotestandardissa (hEN) olevat testaus- ja luokitusstandardit ovat pakollisia sovellettaviksi. Se mitkä osat ovat pakollisia, määritellään standardin lopussa olevassa ZA-liitteessä ( [henhelpdesk.fi](http://henhelpdesk.fi) )

Esimerkkinä käytössä olevasta standardista toimii kantavien rakenteiden suunnittelustandardit Eurokoodit.

Standardeista voidaan poiketa joissakin perustelluissa tapauksissa, kuten on ollut puurunkorakenteen lujuuden määrittäminen silloin, kun runkorakenne tehdään omaan käyttöön omasta puutavarasta. Silloin runko täytyy tarkastuttaa erikseen siihen auktorisoidulla tavarantarkastajalla, joka leimaa runkorakenteen.

### 3.4 RILEM, 1992

.(The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures-is an international, non-governmental technical organization, founded in 1947)

Materiaalin ominaisuuksia verrataan usein RILEM- standardiin, johon viitataan usein tutkimuksissa joten sen esittely olkoon paikallaan.

RILEM-symposiumeissa näitä standardeja päivitetään olemassa olevan uuden tiedon kautta. Alla olevassa taulukossa 3.1 on esimerkki tätä tutkimusta koskevat testisarjasta.

**Taulukko 3.1.** Durability of glass fibre reinforced polymer mortar composites.(Neelamegan, Parameswaran)

OCM- Ordinary cement mortar

PIM- Polymer impregnated mortar

REM- Resin mortar

PCM- Polymer cement mortar or latex modified cement mortar

RILEM-tulokset eri testeissä

Type of test	OCM	PIM	REM	PCM
Compressive strength(Mpa)	32,15	126,32	117,91	29,09
75*150 cm cylinder	35,53	126,8	115,02	30,87
	34,2	134,79	114,58	29,8
Split tensile strength (Mpa)	2,39	9,72	10,16	3,05
75*150 mm cylinder	2,82	10,27	8,05	3,53
	3,05	7,99	9,71	3,64
Direct tensile strength (MPa)	2,50	10,74	11,03	2,95
	2,35	12,06	10,87	3,54
Flexural strength (MPa)	6,62	23,91	27,22	10,12
40 mm*40 mm*160 mm beam	6,71	23,18	30,35	8,46
	6,62	26,49	29,8	9,2
Central deflection of flexural	2,00	4,00	4,50	2,30
beam (mm)	1,70	4,20	4,20	2,30
40 mm*40 mm*160 mm beam	2,10	4,25	6,00	2,30
Density kN/m <sup>3</sup>	21,04	21,45	20,68	19,70

Sementtilaastin kestävyysominaisuuksia voidaan mitata vain testaamalla materiaalia eri rasisuskokeilla.

Näitä testejä ovat

1. Veden imeytyminen ,
2. Veden vastus ,
3. Jäätymis-sulamis-koe,
4. Lämpötilan vaihtelun kesto,
5. Maaperän alkalisuuden-happamuudensieto,
6. Kemiallinen kestävyys

Japanissa 1990 tehtyjä RILEM testejä, RILEM workshop Testing during concrete construction (1990)

#### **Kemiallinen kestävyys:**

Polyesterihartsilaasti altistettiin 80 päivää sulfaattihapolle, pH 2,0 ja natriumhydroksidille pH 12,0. Lämpötilavaihteluina olivat 40°C, 60°C ja 80°C.

#### **Veden vastus:**

Testikappaleet upotettiin kiehuvaan veteen, koska on todettu, että 1500 tuntia kiehuvaan vedessä vastaa 60 vuoden rasitusta normaaliolosuhteissa.

#### **Veden imeytyminen:**

Normaaliolosuhteissa veden imeytymistä ei tapahtunut. Ei myöskään huomattavaa imeytymistä 48 tunnin aikana 1:n ja 2:n MPa:n paineessa. Veden lämpötilan nosto 100°C lisäsi veden imeytymistä 2,1 %:iin painosta 200 tunnin testin jälkeen.

#### **Säänkesto**

Säänkestoa mitattiin altistamalla koekappaleet ultraviolettisäteilylle 2000 tunnin ajan. Lujuus heikkeni 1,1- 1,7 %.

#### **Maaperän kestävyys:**

Koekappaleet upotettiin happamaan (pH 1,5-2,3, 30- 50°C) ja alkaliseseen (pH 8,5-9,5, 63-67°C) maaperään kymmeneksi vuodeksi. Lujuuden menetys happamassa maassa oli n. 10 % ja alkalisessa maassa n. 15 %.

#### **Lämpötilan vaihtelun kesto:**

Kokeessa kappaleita pidettiin vuorotellen neljä tuntia +65°C ja neljä tuntia -20°C, 15, 30, 45 ja 60 kerran sykleissä. Lujuuden heikkenemistä ei havaittu.

## 4. LAASTIEN JA TASOITTEIDEN OMINAISUUKSIA

### 4.1 Tasoitteet, yleistä

Tasoitteita käytetään rakennuksen ulko- ja sisäpinnoissa rakenteiden viimeistelyyn. Niiden sideaineina käytetään pääasiassa kalkkia, sementtiä ja kipsiä. Erilaisia polymerejä käytetään parantamaan laastien rakenteellisia ominaisuuksia.

Ulkopinnoissa käytetään julkisivua suojaavia rappauslaasteja ja sokkelia suojaavia sokkelitasoiteita. Sisäpinnoissa laastit voivat toimia toisen materiaalin alustana kuten esim. lattiatasoiteet tai valmiina pinnoitteena esimerkiksi katoissa

On olemassa myös erikoislaasteja, joita käytetään esimerkiksi betonirakenteiden korjaukseen ja suojaamiseen sekä juotos- ja täyttövaluihin. Lisäksi laasteja voidaan käyttää erilaisissa infrakohteissa, kuten kallioankkuroinnissa ja injektoinnissa ja seinissä.

### 4.2 Rappaustasoitteet ulkona

Talojen rappaaminen poltetun ja sammutetun kalkin avulla on ollut käytössä jo satoja vuosia myös Suomessa. 1950-luvulle asti pääosa kivitaloista päällystettiin rappaamalla. Rappauslaasteja on kolmea eri tyyppiä; kalkkilaastit, kalkkisementtilaastit ja sementtilaastit. Yleisesti laasteihin on lisätty orgaanisia aineita värin aikaansaamiseksi. Lisäksi on käytössä erilaisia silikaatti- ja silikonihartsipinnoitteita. (Kivitaloinfo)

Rappaus voidaan suorittaa myös levypinnalle silloin, kun halutaan lisälämmöneristys. Eristeen päälle asennetaan tuuletusrimat, joiden päälle tulee erilliset kiviaineslevyt. Rappaus suoritetaan kiviaineslevyjen päälle. (Weber opas 2021)

#### 4.2.1 Kalkkilaastit

Kalkkilaasteja on valmistettu Suomessa jo keskiajalta lähtien. Kalkkia on poltettu yksinkertaisissa masuuneissa. Suomessa on esiintynyt lounaissuomalaista kalsiittikiveä ja itäsuomalaista dolomiittikiveä. Kalkkiin lisätty tuhka, savi ja masuunikuona ovat polton yhteydessä varmistaneet kalkkilaastien hydraulisuuden eli se kovettuu kosteissa olosuhteissa.

Kalkkilaastin runkoaineena toimii hiekka. Kalkki toimii sideaineena, joka kiinnittää hiekan laastiksi ja toimii myös sideaineena rappausalustaan. Vedellä saadaan sideaine ja runkoaine tasaiseksi ja työstettäväksi. Keskiajalla kalkkilaasti tehtiin paljon kalkkipitoisemmaksi kuin nykyajan laasti. Laasti valmistettiin kalkkihaudassa märkäsammutetusta kalkkitahnasta ja hiekasta. Sideaineena on käytetty mm. karvoja ja hiiltä.

Kalkkilaasteja on käytetty käsin rappauksessa vanhoissa taloissa ja nykyään niitä käytetään pääosin korjauksissa ja entisöinneissä. Kalkkirappaus on maalattu kalkki-maalilla. Kalkkirappaus on Suomessa työlästä, koska se pitää ajoittaa alkukesään hitaan kovettumisen takia. Kalkkimaali valmistetaan märkäsammutetusta kalkista ja väriai-neista. (Kivitaloinfo)

#### **4.2.2 Kalkkisementtillaastit**

Kalkkisementtillaastien käyttö yleistyi 70-luvulla. Kalkkisementtillaastien kovettumis-aika on nopeampi kuin kalkkilaastien, joten sillä saatiin työaikaa pidennetyksi syksyä kohti. 70-luvulla yleistyi myös konerappaus, joka onkin nykyään yleisin työmuoto. Kalk-kisementtillaastin sideaineena käytetään sementtiä ja ilmakalkkia. Laastin ominaisuuksin vaikutetaan kalkki-sementti- seossuhteella. Erilaisia kalkkisementtillaasteja on useampia käyttökohteesta riippuen. Pintalaastiin voidaan lisätä väripigmenttiä halutun värisävyn saavuttamiseksi. (Weber opas 2021)

#### **4.2.3 Sementtillaastit**

Sementtillaasteja käytetään uusissa kohteissa ja nykyään ne ovat polymeerisidonnai-sia, jolloin ohuet rappaukset ovat mahdollisia. Ohutrappauksiin voidaan käyttää erilaisia lisäaineita ominaisuuksien parantamiseksi, esimerkiksi kuituvahvisteinen ohutrappaus-laasti. (Weber opas 2021)

### **4.3 Sisätasoitteet**

Sisätiloissa käytettävät tasoitteet jaetaan yleisesti lattiatasoitteisiin ja muihin, seinissä ja katoissa käytettäviin tasoitteisiin. Päälystettävän pinnan lujuus- ja tasaisuusvaatimuk-sia annetaan esimerkiksi SisäRYL2013-ohjeissa. Muita luokituksia ovat esimerkiksi Si-säilmayhdistyksen luokitusohjeet, joiden mukaan paras rakennusmateriaalin päästö-luokitus on M1. GEV-luokitus määrittelee erittäin vähäiset päästöt Emicode EC1-luokkaan. (GEV-Emicode, Association for the Control of Emissions in Products for Floor Installation, Adhesives and Building Materials)

#### **4.3.1 Lattiatasoitteet**

Lattiatasoitteet ovat sementtiseidonneita. Käyttökohteen ja täytön paksuuden mu-kaan voidaan valita joko normaali tai nopeasti kuivuva tasoi-te. Lisäksi on kuituvahvistei-sia ja vähän pölyäviä tasoitteita. Yleensä tasoitteiden kerrosvahvuus vaihtelee 0 mm:stä-250 mm:iin, esim. betonin tilalla käytettävät täyttötasoi-teet.

Lattiatasoitteiden lujuus- ja tartuntavaatimuksista annetaan ohjeita mm. Betonilattiat by45/BLY7- ohjeissa Lattiatasoitteiden pitäisi täyttää myös EN 13813:2002 standardin vaatimukset, jolloin ne ovat CE-merkittyjä. Lattiatasoitteita on valmistettu eri alustoille sekä uudis- että korjausrakentamiseen. Tasoitteen käytössä betonialustoille tulee ottaa

huomioon betonin riittävä kuivuminen ennen tasoitusta ja käytetyn tasoitteen matala-alkalisuus, jolloin betonin alkalisuudesta johtuvia päästöjä ei pääse syntymään. Muille alustoille voidaan käyttää tartuntasiltoja ja vahvistusverkkoa tasoitteen tarttuvuuden ja tasaisuuden varmistamiseen. (Rakennuslehti 2015)

Lattiatasoitteiden oheistuotteina on työtä helpottava korkomerkki, rajausnauha, valmis erotuskaista lattiatasoitteen erottamiseen pystyrakenteista, polymeeripinnoitteinen lasikuituverkko, valusuojakangas sekä askelääneneristysmatto. (Weber opas 2021)

Taulukossa 4.1 on yleisiä lattiatasoitteita ja niiden ominaisuuksia. Pääsääntönä tasoitteiden käytössä on kuitenkin, että kohteeseen käytetään vain saman tuoteryhmän tasoitteita. Eri valmistajien tasoitteissa voi olla toisilleen sopimattomia ainesosia, jolloin tasoitteet voivat reagoida keskenään haitallisesti.

**Taulukko 4.1** Lattiatasoitteiden ominaisuuksia

Tuote Lattiatasoitteet	Riittoisuus kg/m <sup>2</sup> /mm	Pakkaus kg	Täyttömäärä kg	Puristuslujuus MPa	Päällystys	Muuta
Pikalattiamassa	1,9	20	10-200			11 l/ säkki valmista massaa
Weber 6000	1,8	25	10-250	C20	15 h	n.10 mm/m <sup>2</sup> /säkki
Pikalattiamassa	1,9	20	5-100			
Pikasaneeraus Plaano	1,7	25	5-50	C30	1-4vrk	
Oikaisutasoite	1,7	20	3-50			12 l/säkki valmista massaa
Lattialämmitystasoite	1,7	20	3-50			
Lämpölattiatasoite	1,8	20	5-100			
Kiilto Multiplan	1,7	20	3-50			Tasoittaa kaadot itse
Fiberflex Kuitulattiatasoite	1,6	20	3-20			Heikkolujuuksisille alustoille
Weber 4310	1,7	25	12-30	C20	1-3vko	
Tasofelx Yleistasoite	1,6	20	3-20			Myös pumppaus
Weber 4350	1,7	25	10-50	C16	1-3vko	dB-tasoite
Kiilto TopPlan	1,6	20	1-10			Myös pumppaus
Weber 3100	1,5	25	0-10	C30	24 h	
TopPlanDF	1,6	20	1-10			Vähäpölyinen
Kiilto 97 Pintatasoite	1,6	20	1-7			Myös pumppaus
Weber 3300	1,5	25	0-10	C25		
Maxirapid	1,6	20	1-40			Päällystys 2-4 h, myös ulkona
Easyrapid	1,3	15	0-10		2 h	Päällystys 2 h
Weber 4400	1,6	25	0-30		2 h	
Kiilto Plan, Universal	1,6	25	4-30			Itsetasoittuva sisätiloihin
Kiilto Plan Fibre	1,6	25	5-30			Kuituvahvisteinen, heikoille alustoille
Kiilto Plan Base	1,8	25	8-50			Karkea tasoite
Weber5000	1,8	25	5-50	C20	1-5vrk	

### 4.3.2 Seinä- ja kattotasoitteet

Vanhoissa kohteissa seinissä on käytetty tasoitteena paksua kalkkirappausta. Kalkkirappausten sideaineina on käytetty savea, olkia tai joitain muita saatavilla olevia kuitumaisia täyteaineita. 50-luvulla on siirrytty vähitellen käyttämään kalkin mukana sementtiä. 70-luvulla siirryttiin enenevässä määrin käyttämään betonielementtejä rakentamisessa, jolloin seinien tasoitukseen ei tarvittu paksuja kerroksia tasoitetta. (Museovirasto)

**Taulukko 5.1** Seinätasoitteiden ominaisuuksia

Tuote Seinätasoiitteet	Riittoisuus kg/m <sup>2</sup> /mm	Pak- kaus kg	Täyttömäärä mm	Muuta
Kiilto OT	1,5	20	5-40(5-20)	Kuiva- ja märkätilat
Weber Vetonit 137	1,5	20	3-15	Kuiva- ja märkätilat myös ulkokäyttö
Kiilto OTR Oikaisutas.	1,5	20	5-30(5-20)	Kuiva- ja märkätilat myös ulkokäyttö
Weber Vetonit 410	1,5	20	2-15	
Kiilto TM Seinän PT	1,5	20	5-50(5-20)	Vedeneristys 1 vrk
Weber PTM	1,2	20	5-50	
Kiilto KL Kuitulaasti	1,5	20	3-15(3-10)	Oikaisu- ja verkotuslaasti
Kiilto TT Oikaisutasoite	1,4	20	30(5)	Kuiva- ja märkätilat
Weber TT Tiilitasoite	1,2	20	2-10	
Kiilto Märkätilatasoite	1,3	20	10(3)	Betoni- ja harkkoseinät Märkätilat
Weber VetonitMT	1,3	20	1-10	Pohjatasoite märkätiloihin
Kiilto SR DF PikaMTtas.	1,4	20	15(5)	Vähäpölyinen
Kiilto SH pintatasoite	1,3	20	2	Maalattavat kuiva- ja märkätilat
Weber Vetonit V+	1,2	20	1-5	
Kiilto GP Nauhoitustas.	1,2	20	3	Liimasideaine, kuivat kipsilevyt
Kiilto LK Pohjatasoite	1,2	20	3	Liimasideaine, kuivat kipsilevyt
Weber L Pohjatasoite	1,2	20	1-5(3)	
Kiilto LH Pintatasoite	1,2	20	2	Liimasideaine, kuivat kipsilevyt
Weber LR Pintatasoite	1,2	20	1-5(3)	
Kiilto käsirappauslaasti	2	20		Kalkki-sementtilaasti rappauksiin
Weber Unirender	1,4	20	5-30	Kuituvahvisteinen kalkkisementtilaasti

Taulukossa 5.1 on esitetty tavanomaisempien seinätasoitteiden ominaisuuksia käytötarkoituksen mukaan. Lisäksi tasoiitteet on jaettu yhteentoista rasisusluokkaan, neljään tasaisuusluokkaan ja kolmeen ulkonäköluokkaan.

MaalausRYL 2021 mukaan seinätasoitteet jaetaan kuuteen rasisitusluokkaan sisätiloissa ja viiteen rasisitusluokkaan ulkona.

RL 01 Vähäiset rasisitukset ja vaatimukset kuivissa sisätiloissa

RL 02 Tavanomaiset rasisitukset ja vaatimukset kuivissa sisätiloissa

RL 03 Suuret rasisitukset ja vaatimukset kuivissa sisätiloissa

RL 04 Erittäin suuret rasisitukset ja vaatimukset kuivissa sisätiloissa

RL 05 Erytisrasitukset ja -vaatimukset sisätiloissa

RL 06 Erytissuunnittelua vaativat rasisitukset sisätiloissa

Vastaavasti viisi rasisitusluokkaa ulkona ovat

RL 11 Lievä ilmastorasitus ulkona

RL 12 Kohtalainen ilmastorasitus ulkona

RL 13 Ankara ilmastorasitus ulkona

RL 14 Erittäin ankara ilmastorasitus ulkona

RL 15 Erytissuunnittelua vaativat rasisitukset ulkona

Tasaisuusluokalla tarkoitetaan pinnan tasaisuuden vaatimustasoa (SisäRYL 2000 ja RT 33-10858)

Tasaisuusluokkia on seinäpinnoissa 4

L0 maalattavat pinnat, joille asetetaan tavanomaista korkeammat tasaisuusvaatimukset

L1 maalattavat tai ohuen tapetin alustaksi tarkoitetut seinät ja sileät, maalattavat katot

L2 kankaan tai paksun tapetin alustaksi tarkoitetut seinät ja ruiskutetut katot

L3 pinnat, joille asetetaan tavanomaista vähäisemmät tasaisuusvaatimukset

Valmiin tasoitepinnan ulkonäköluokkia on kolme Ts1, Ts2 ja Ts3 (SisäRYL2000)

Ts1 pinnalle asetetaan suuret vaatimukset

Ts2 pinnalle asetetaan tavanomaiset vaatimukset

Ts3 pinnalle asetetuilla vaatimuksilla on tavanomaista vähäisempi merkitys

Seinätasoitteet ovat sementtiseideaineisia tai liimasideaineisia käyttökohteen mukaan. Taulukossa 5 on seinätasoitteiden tärkeimpiä valintakriteereitä. Oikaisutasoite on vahvempi ja karkeampi tasoite suurille kerrosvahvuuksilla 5-40 mm, tuotteesta riippuen. Lisäksi on erikseen käsirappauslaasti seinien oikaisuun ja täyttöön. Pikatäyttömassaa voi käyttää esimerkiksi piikkausrailojen täyttöön. Märkätilaan sopivat sementtiseideaineiset pohja- ja pintatasoite. Lisäksi joissakin tuoteperheissä on pölyämätön vaihtoehto. Kipsilevyille on olemassa erikseen nauhoitus-, pohja-, ja pintatasoite. Seinätasoitteiden

oheistuotteena on rappausverkko tasoitteiden vahvistamiseen sekä rappauskulmaprofiili.(Weber opas 2021)

### 4.3.3 Sisäpintojen rappaustasoitteet

Sisäpintoihin voidaan käyttää varta vasten siihen tarkoitettuja rappaustasoitteita, jotka voidaan sävyttää ja strukturoida esimerkiksi ruisku-, harja-, hierto- tai piirtopintaiseksi. (Weber opas)

Antiikkilaastia on käytetty useimmin erilaisten takkapintojen ja muurien pinnoittamiseen. Laastista tehdään kaksikerroksinen pinta, jossa ensimmäinen kerros on alusta- ja tartuntakerros. toinen kerros voidaan muotoilla harjalla haluttuun strukturiin. (Weber opas)

Hiertopinnoite on valmiiksi sävytetty pinnoite, joka hierretään levittämisen jälkeen pintaan muovilastalla. tasainen lopputulos saadaan, kun pinnoite tehdään kahteen kertaan. Seinäpinnat tulisi tehdä yhtäjaksoisesti näkyvien työsaumojen välttämiseksi.( Tikkurila ammattilaisille)

Julkisivuihin tarkoitettu silikonihartsia sisältävä pinnoite sopii myös sisärappaukseen. Alusta pitää maalata silikaattimaalilla ennen rappausta, jolloin lopputulos on tasavärinen. Hierto tehdään styrox-palalla tai muovihierkimellä halutunlaiseksi.

Alusta maalataan silikaattimaalilla tai sementtimaalilla, jolloin lopputuloksesta tulee tasainen. Laastipinta hierretään haluttuun muotoon esim. muovihierkimellä.

### 4.3.4 Struktuuripinnoitteet



**Kuva 4.1.** Kivistrukturi, Sto

Struktuuripinnoitteet sijoittuvat laastien ja maalien välimaastoon. Struktuuripinnoitteita on eri karkeusluokkaa ja työtavat vaihtelevat maalauksesta laastin levitykseen. Sto-tuotteissa on lisätarvikkeena mm. lasikuulia ja marmorihiekkaa sekä marmori- ja tiilijauhoa. Lisäksi pinnoitteisiin voidaan lisätä erilaisia materiaaleja, joilla saadaan halutunlainen vaikutus. Kuvassa 4.1 on esimerkki kivistruktuuripinnoitteesta.(Sto)

Pohjamaalin päälle on teipattu vapaalla kädellä kuviot. Teipin hännät jätetään kuvioitavan alueen ulkopuolelle, jolloin ne on helppo poistaa. Tunto Kivi sävy KP50 on levitetty teräsliippauksella mahdollisimman tasaiseksi kerrokseksi.

Kuvassa 4.2 oleva Tru Pac X struktuuripinnoite sekoitetaan muurauslaastiin, jonka jälkeen sitä voi muotoilla ja tehdä vaikka kivimuurin.



**Kuva 4.2.** Tru Pac X Mortar Convert Kit esimerkkikohde, Walttools.com

## 5. KEVENNYSMATERIAALIEN KÄYTTÖ RAKENTAMISESSA

### 5.1 Johdanto

Kevennysmateriaalien käyttö betonissa ja laasteissa on yleistä. Taloudellisuuden lisäksi keveämmillä materiaaleilla pyritään saamaan laastiin ja betoniin parempaa työstettävyyttä ja käytön keveyttä. Kevennysmateriaalin lisääminen laasteihin ei kuitenkaan ole ongelmatonta. Varsinkin veden vaikutukset laastiin, joihin on lisätty kevennysmateriaaleja, on vaihteleva ja oikeanlaisen sekoitussuhteen löytäminen on työlästä. Aihetta käsittelevissä tutkimuksissa onkin keskitytty materiaalien perusominaisuuksien, kuten tiheyden, veden imeytymisen ja lujuuksien mittaamiseen.

Suuri kysymysmerkki ovat myös kierrätysmateriaalit ja niiden käyttö. Ekologisuuden ja kestäväen kehityksen kannalta kierrätysmateriaalien käyttöä tulisi lisätä, mutta niiden käyttömuodot muiden materiaalien kanssa vaativat paljon aikaa vievää tuotekehittelyä, vaikkakin kierrätysmateriaalin taloudellisuus pitkällä aikavälillä tasoittaa tuotekehittelyyn uhrattuja resursseja. Lisäksi materiaalien kotimainen saatavuus on joillakin materiaaleilla huono.

Tässä luvussa on pyritty tuomaan esille eri materiaaleja, joista voisi olla hyötyä uusia tuotteita kehiteltäessä ja jotka sopisivat myös käytettäväksi yhdessä PCM- materiaalin kanssa. Lisätäyteaineiden käyttö voi myöskin parantaa materiaalin palonkestävyyttä ja lämpöeristävyyttä. Jotkut kevyttäytteet, jotka perustuvat silika-aluminaateille, edistävät materiaalin pozzolaanista reaktiota ja ovat näin parantamassa materiaalien mekaanista lujuutta. Pozzolaaninen materiaali sitoutuu ja kovettuu veden ja liukoisen kaliumhydroksidin vaikutuksesta.

### 5.2 Betonissa ja laasteissa käytettävät kevennysmateriaalit

#### 5.2.1 Muovi

Muovin käytön lisääntyminen on tuonut maailmalle huomattavan jäteongelman, jota yritetään ratkaista mm. muovin uusiokäytöllä. Muovi muodostuu monista kemikaaleista, jolloin sen joutuminen hukkaan saastuttaa ympäristöä.

Muovia voidaan käyttää energiajätteenä ja sitä poltetaan jo yleisesti, mutta poltosta tulleet muut ainesosat, erityisesti kadmium ja lyijy, voivat suodattamattomina saastuttaa maaperää ja vesistöä. Muovista on myös tehty uusiomuovia, mutta ongelma ilmenee silloin lajittelussa, jonka pitäisi olla tarkkaa eri muovilaatujen kohdalla.

Paras tapa hävittää muovijätettä on edelleenkin uusien tuotteiden tekeminen niin, että ne sisältävät jossain määrin muovijätettä. Muovin käytöstä betonissa ja laasteissa on tehty useampia tutkimuksia. Niissä on vertailtu erityyppisten muovien ominaisuuksia

runkoaineena, kuituina ja täyteaineena. Siddique et al .on jo vuonna 2008 (Siddique, Khatib, Kaur,2008) tehnyt katsauksen eri muovijätteiden käytöstä betonissa. Uudessa vuodelta 2011 olevassa tutkimuksessa (Nabajyoti, Saikia, Jorge de Brito 2011) on tutkittu laajemmin muovia sisältävän betonin ja laastin ominaisuuksia.

Erilaisia muovilaatua voivat olla esim. PET- muovit (polyethylene terephthalate), PVC (poly vinyl chloride), HDPE ( high density polyethylene), EPS (expanded polystyrene foam), GRP (glass reinforced plastic),PC ( polykarbonaatti), polyuretaani (PUR) sekä polypropyleeni.

Saikian et al. (2012) tutkimuksessa on lueteltu taulukkoina jo tiedossa olevia tutkittuja ominaisuuksia eri muovilajeilla ja eri koostumuksilla. Taulukossa 5.1 on lueteltu muutamia tutkimuksia, joissa on käytetty kierrätysmateriaaleja ja joissa on tutkittu esimerkiksi materiaalin tiheyttä, elastisuutta sekä taivutusvetolujuutta. Materiaalin tiheyden kehitys tulee merkitykselliseksi silloin, kun mitataan kevennettyjen materiaalien ääneneristävyyttä.

**Taulukko 5.1.** Muovimateriaaleilla tehtyjä tutkimuksia

Tutkimus	Seostyyppi	Lisätyt aineet ja prosentit	Muovijätteen laatu
Kou et al. 2009	Kevennetty betoni	Hienoaines 5,15,30 ja 45	PVC-putki
Marzouk et al. 2007	Laasti	Hienoaines 2,5,10,15,20,30,50,70 ja 100	PET-pullot
Kan et al. 2009	Betoni	Runkoaines 25,50,75 ja 100	EPS-pakkausmateriaali
Mounanga et al. 2008	Laasti	Hienoaines 13,1-33,7	Polyuretaanijäte
Akcaozoglu et al. 2010	Laasti	Hienoaines 50,100	PET-pullot
Hannawi et al. 2010	Laasti	Hienoaines 3,10,20 ja 50	PET- ja polykarbonaattijäte
Remadnia et al. 2009	Laasti	Hienoaines 30,50 ja 70	PET-pullot

PET-muovista tehdyllä runkoaineella on huomattavasti pienempi lämmönjohtokyky kuin perinteisillä runkoaineilla, kun taas lämpökapasiteetti on muita suurempi. Alkalinen huokosvesi voi pilata PETin käytön runkoaineena reagoimalla Ca, Na, K tai OH ioneilla C-O yhdistettä vastaan.

Plastisuuden arvot ovat useissa tutkimuksissa vaihdelleet huomattavasti. Suurimassa osassa muovirunkoaine tuotti jäykempää betonimassaa kuin perinteiset runkoaineet. Syynä ovat muoviaioksen särnäisyys. Toisaalta päinvastaisia tuloksia on saatu aikaan pallomaisilla muovinäytteillä ( Choi et al 2005 ja 2009) Yksi syy lisääntyneeseen plastisuuteen arveltiin olevan muovisen runkoaineen veden imukyvyn puuttuminen. Koikeissa pallomaisella runkoaineella tehdyn betonin vesisementtisuhdetta pienennettiin verrattuna särnäiseen muovirunkoaineeseen.

Koesekoitusten tiheys on ollut noin. kolmanneksen pienempi, kuin samanlaisella betonilla ilman muovirunkoainetta. RILEM LC2:n mukainen minimitiheys kevennetylle betonille on 2000 kg/m<sup>3</sup>.

Muovirunkoainetta sisältävän betonin puristuslujuus laski kaikissa tehdyissä tutkimuksissa. Syyksi on arveltu muovin ja sementin sidoksen heikkoutta tai toisena vaihtoehtona sementin hydraation estymistä muoviaiaineksen vaikutuksesta. Puristuslujuus laski suoraan verrattuna muovirunkoaineen määrään. 5 % lisäys sementtiin laski puristuslujuutta jo 20 %, kun 20 %:n lisäys laski sitä jo 75 %. Kuitenkin puristuslujuus jäi vaadittua minimipuristuslujuutta suuremmaksi.

Kou et al. (Kou et al. 2009) tutkimus osoitti, että 5% lisäys PVC-rouhetta vähensi puristuslujuutta vain 9% ja 15% lisäys 18,6 %.

Polykarbonaatti- aines osoittautui Hannawi et al. (2010) tekemässä tutkimuksessa paremmaksi runkoaineeksi puristuslujuuden osalta kuin PET, jonka puristuslujuus laski 20%: n lisäyksellä 46,1%:ia. PET-materiaalilla tehdyn laastin puristuslujuus nousi, kun sidosaineena käytettiin normaalin Portland-sementin sijasta sekoitusta, jossa oli puolet Portland-sementtiä ja puolet masuunikuonaa.

Paras tulos on saavutettu, kun runkoaineeseen on lisätty melamiinia ja sidosaineena on käytetty Portland-sementtiä ja lentotuhkaa. (Panyakapo et al. 2008). Kevennetty betoni täyttää silloin ASTM C129-05 II tyyppistandardivaatimukset.

Polyuretaanin (PUR) lisäys runkoaineeseen vähensi betonin puristuslujuutta dramaattisesti, mutta parempia tuloksia saatiin lisäämällä nesteytysainetta. Nesteytyksen käytöllä saatiin sementin määrää vähennetyksi 15 % ja betoni oli lähes ACI 318 ja ASTM C 330 standardien mukainen. (Fraj. et al. 2010). PUR-betonin hyvä jälkihoito kastelemalla lisäsi puristuslujuutta.

Kan ja Demirboga tutkivat EPS:n käyttöä täyteaineena käyttäen lämpökäsittelyjä EPS rakeita. Käsittelyssä EPS-rakeiden laajuus vähenee 20 kertaisesti. Paras tulos saatiin kuumentamalla materiaalia 130 C-asteessa 15 minuuttia. Normaalien EPS materiaalin tiheys ennen käsittelyä oli  $10 \text{ kg/m}^3$ , kun se lämpökäsittelyn jälkeen oli  $217 \text{ kg/m}^3$ . Lujuus nousi 0,12 MPa:sta 8,29 MPa:iin ( Kan ja Demirboga, 2009)

Lämpökäsittelyä polystyreeniä (MEPS) käytettäessä puristuslujuus oli n. 40 % suurempi, kuin esim. käytettäessä perliittiä tai vermikuliittia. (Kan ja Demirboga, 2009)

Saikian ja Briton tutkimuksen mukaan halkaisuvetolujuus noudattelee kaikissa esille tuoduissa tutkimuksissa samaa kaavaa puristuslujuuden kanssa, jolloin täyteaineen lisäys alentaa sekä puristuslujuutta, että halkaisuvetolujuutta. (Saikia ja Briton, 2012)

Kimmomoduulilla on suora suhde runkoaineen tyyppiin ja sen käyttäytymiseen. Muovien lisäämisestä runkoaineeseen on tehty muutamia tutkimuksia, jotka ovat kaikki samansuuntaisia.

Kimmomoduulin arvo laski normaalibetonin 48,1:stä GPa:sta 41,8 GPa:liin. (Frigione et al. 2010) Kimmomoduulin arvon laskun syynä arveltiin olevan muovin alempi kimmomoduuli sekä runkoaineen ja muovin heikko sidos. (Hannawi et al. 2010)

Myös taivutusvetolujuuden arvot laskivat samalla tavalla yhteydessä puristuslujuuden kanssa, kuitenkin muutosta ei tapahtunut huomattavasti PET-määrän ollessa alle 10 % normaalibetonin runkoaineesta tai vastaavasti PC-määrän ollessa alle 20 % normaalibetonin runkoaineesta. (Hannawi et al. 2010)

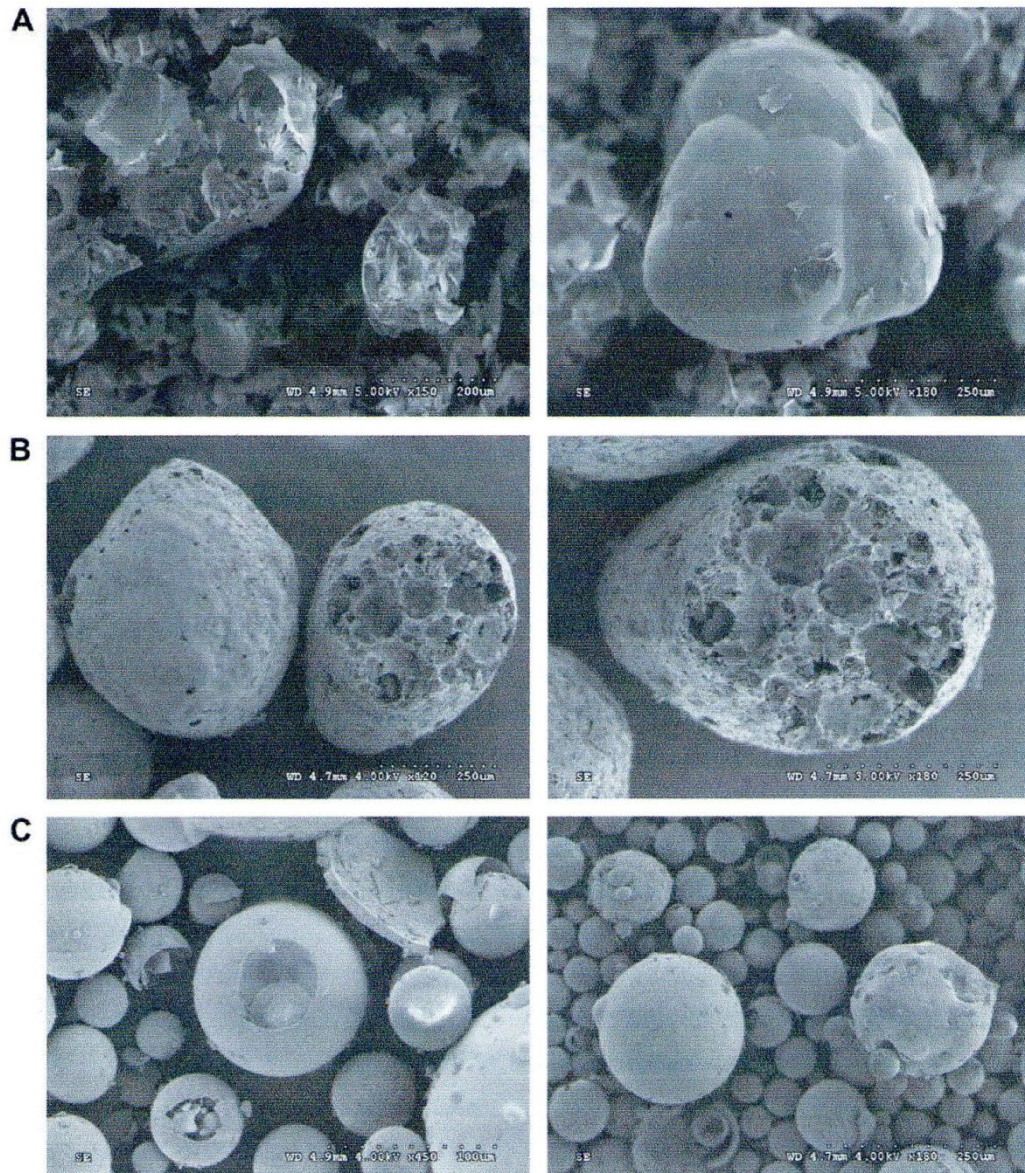
Puristuslujuuskokeissa huomattiin myös, että ne näytteet, jotka sisälsivät muovia, eivät murre hauraasti kuten tavalliset sementtilaastit vaan murtuminen on enemmänkin plastinen. Useamman tutkijan huomio on ollut, että ominaisuuden avulla näytteet, joissa oli muovia, pystyivät kantamaan kuormaa muutaman minuutin murtumisen jälkeen. Albano et al. (2009) huomasivat myös, että murtuman paikka vaihteli muovilaadun mukaan kuitenkin runkoaineen korvausprosentin ollessa 20 % kaikissa näytteissä. On myös otaksuttu, että hiutalemainen PET-muovi muodostaa sillan murtuman kohdalle.

## 5.2.2 Lasi

Lasia on totuttu käyttämään kierrätettynä muun muassa eristeissä jo vuosikymmeniä. Laasteissa lasia voidaan käyttää kevennysmateriaalina korvaamaan hienoainesta.

Kierrätyslasista valmistetaan mikrokokoisia lasipalloja paisuttamalla lasijauhetta kovassa lämpötilassa. Samoin menetelmin valmistetaan myös perliittimateriaalia ja kevyttä alumiinisilikaattia. Alumiinisilikaatti muotoutuu pyöreämmäksi kuin lasipallot. Kuvassa 5.1 on esitetty eri materiaalien eroja. Muuten lasi ja alumiinisilikaatti ovat ominaisuuksiltaan samankaltaisia, kun taas samalla menetelmällä valmistettu perliitti on heikompa ja vedenimeytyvyys on suurempi kuin kahdella edellisellä.

Lasipalloja käytetään sinällään keventämään laasteja tai sitten niitä voidaan käyttää PCM-materiaalin mikrokuorina. Lasimateriaalista on olemassa kaupallisia sovelluksia.



**Kuva 5.1.** (A) paisutettu perliitti (expanded perlite), (B) Paisutettu lasi (expanded glass), (C) Paisutettu alumiinisilikaatti (hollow micro-spheres) (Torres ja Garcia-Ruiz 2008)

### 5.2.3 EPS

Polystyreeniä runkoaineena voidaan käyttää kohteissa, joissa ei vaadita massalta suurta tiheyttä kuten rappaus- ja koristepinnoitteissa. Polystyreeniä käytetään kiinteänä (UEPS) ja paisutettuna (EPS). EPS-materiaalia saa maailmanlaajuisesti, toisin kun muita kevytmateriaaleja.

Sementissä sitä käytetään keventämään laatan painoa, laatta toimii samalla eristävänä materiaalina. Kevennettyä betonia on käytetty paljon esim. laitureissa ja monissa muissa erikoiskohteissa kuten öljynporauslautoilla. Kevennetyn betonin ja -laastin käyttöä on rajoittanut sen heikko puristuslujuus. Joissakin tutkimuksissa on todettu puristuslujuuden parantuvan EPS-pisaroiden kokoa pienentämällä. Tutkimuksissa on todettu,

että pienemmällä pisarakoolla samalla materiaalilla voidaan saavuttaa jopa 50 % parempi puristuslujuus kuin suurella pisarakoolla.

K.Miled et al.(2003) testasivat kevennetyn betonin ominaisuuksia 100kN:n hydraulii-katestillä. Testeissä ei havaittu eroa eri reikäkokojen kesken kimmomoduulin jäädessä noin puoleen normaalista molemmissa tapauksissa ja puristuslujuuden ollessa n. 8MPa molemmissa tapauksissa vertailubetonin puristuslujuuden ollessa 35 MPa Ominaisuuksia kartoitettiin myös erilaisilla laskentamenetelmillä, joista on kuitenkin saatu samankaltaisia tuloksia kuin puristuskokeesta. Tässä tutkimuksessa ei voitu todistaa, että EPS:n pisarakoolla olisi mitään vaikutusta kevytbetonin lujuuteen, kun näytteitä verrataan toisiinsa.

Babu et al ovat tehneet vuosina 2003-2006 neljä eri tutkimusta kevennetyn betonin ominaisuuksista. Ensimmäinen tutkimus keskittyi kestävyysominaisuuksiin silloin kun EPS-betoniin on lisätty silikaa. Toinen tutkimus käsitteli kestävyyttä ja korroosiota ja kolmas kestävyysominaisuuksia silloin, kun betoniin on lisätty 50 % lentotuhkaa. Neljäs tutkimus keskittyi EPS-pisaroiden kokoon mitattaessa EPS-betonin ominaisuuksia.

Betonista valettiin näytteitä, joihin jälkikäteen porattiin sapluunalla reikiä kahdella eri reikäkoolla, 3 mm ja 5 mm, jotka korvasivat varsinaiset EPS- pisarat. Kummallakin reikäkoolla testattiin kolme näytettä.

Tässä vuonna 2006 julkaistussa tutkimuksessa puristuslujuuden kehitystä verrattiin sekä EPS-materiaalin kokoon että materiaalitiheyteen. Myös betonin yleistiheys vaikutti täytemateriaalien merkitykseen betonissa. Taulukosta 5.2 näkyy eri koekappaleiden koostumukset ja se, miten täyteaineen lisäys vaikuttaa tiheyteen.

Kuvasta 5.2 nähdään, kuinka EPS- materiaalin prosentuaaliset osuudet ja partikkeleiden koko vaikuttavat kevennetyn betonin puristuslujuuteen. Kevennetyn betonin tiheys vaikuttaa suoraan puristuslujuuteen. Vaihteluvälillä 200-2000 kg/m<sup>3</sup> tiheyksillä voidaan puristuslujuus laskea kaavasta (Babu et al. 2006)

$$f_c = (10.3 * \gamma^{1.918} * 10^{-6}) \quad (5.22)$$

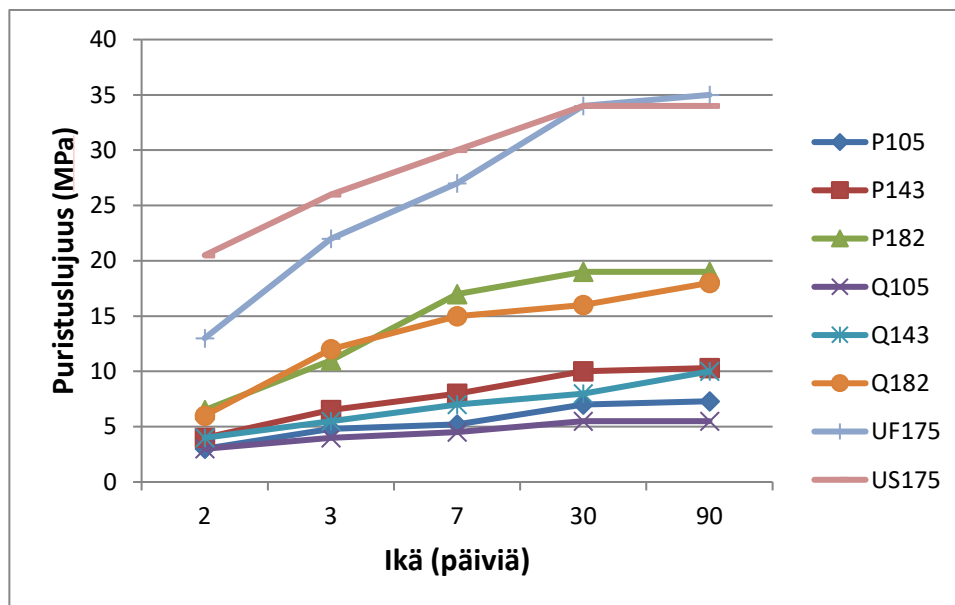
missä

$f_c$  on puristuslujuus (MPa)  
 $\gamma$  on tuoreen betonin tiheys(kg/m<sup>3</sup>)

**Taulukko 5.2.** Tutkimuksessa käytetyt materiaalseokset (Babu et al, 2006)

Nimi	Se- ment- tiä	Lento- tuhka	w/(c+f) suhde	Runkoaineen jakauma %			Lo- pull. PS%	SP%	Märkäti- heys (kg/m <sup>3</sup> )	Flow (m m)
				Hiek- ka	C A	P S				
Sarja 1: EPS lisäys sisältäen 30% lentotuhkaa										
P10 5	39 4	16 9	0.3 55	15	0	8 5	0 5	0.50	1012	605
P14 3	39 4	16 9	0.3 55	14	2 6	6 0	3 5	0.50	1492	630
P18 2	39 4	16 9	0.3 55	24	4 2	3 4	2 0	0.50	1858	590
Q10 5	39 4	16 9	0.3 55	15	0	8 5	0 5	0.50	1076	580
Q14 3	39 4	16 9	0.3 55	14	2 6	6 0	3 5	0.50	1454	550
Q18 2	39 4	16 9	0.3 55	24	4 2	3 4	2 0	0.50	1842	490
NW C	52 5	0	0.3 78	33	6 7	0	0	0	2410	0
Sarja 2: UEPS lisäys										
UF1 75	39 3	21 2	0.2 65	18	3 1	5 1	3 0	1.00	1786	520
US1 75	45 4	51	0.3 27	20	3 4	4 6	3 0	1.25	1795	550

Tyyppi P:EPS 2,36- 8 mm	BD	kg/ 23,6 m <sup>3</sup>
Tyyppi Q: EPS 6,3- 8 mm	BD 9	kg/ m <sup>3</sup>
Tyyppi U:UEPS 2,36-8 mm	BD	kg/ 66,5 m <sup>3</sup>

**Kuva 5.2.** Koostumuksen vaikutus puristuslujuuteen, Babu et al. (2006)

Myös halkaisuvetolujuus parani EPS- materiaalin rakeiden pienenemisen myötä. EPS- materiaalia sisältävät testikappaleet murtuivat erilailla, kuin normaalit testikappaleet. Kuitenkin ne kappaleet, joihin oli lisätty UEPS:ia, murtuivat samoin kuin normaali testikappale.

Kokeet vahvistivat myös tuloksen, jonka mukaan saadaan kaava puristuslujuuden ja halkaisuvetolujuuden välille.

$$f_{ct} = 0.2416 * f_c^{0.7933} \quad (5.23)$$

missä

$f_{ct}$  on halkaisuvetolujuus(MPa)  
 $f_c$  on puristuslujuus (MPa)

Vertailtaessa eri seoksia, huonoin tulos oli suurirakeisella ja paljon EPS-materiaalia sisältävällä betonilla Babu et al.(2006) mukaan rakeiden pienentäminen parantaa puristuslujuutta tiheyden funktiona edellä esitetyn kaavan mukaisesti.

Tutkimuksissa vertailtiin myös erilaisten seosten vedensietokykyä. Tuloksista kävi ilmi, että EPS- materiaalilla tehty kevytlaasti/betoni sieti hyvin vettä, koska EPS- materiaali itsessään ei ime vettä. Erityisen hyvä vesiabsorptioprosentti oli UEPS- betonilla, johon oli lisätty joko lentotuhkaa tai silikaa.

D.S Babu et al myös vertasivat saatuja tuloksia muihin vastaaviin tutkimuksiin. Vertailu vahvisti kaavojen paikkansapitävyyden.

## 5.2.4 Polyamidi

Polyamideja käytetään rakentamisessa ja teollisuudessa, varsinkin rakennusmateriaaleissa parantamaan esimerkiksi materiaalien joustavuutta ja kestävyyttä. Materiaalien valmistuksessa syntyvää polyamidijätettä pyritään hyödyntämään kierrätyksessä. Kierrätyspolyamidia pyritään lisäämään esimerkiksi kevennysaineeksi rakennuslaasteihin. Taloudellisuuden sivutuotteena tulevat myös kierrätyksen päästöjä vähentävä vaikutus sekä materiaalin ominaisuuksiin perustuen laastin parempi palonkestävyys ja lämpötekniset ominaisuudet. Polyamidijätteen lisääminen kipsituotteisiin vähentää uuden kipsin käytön määrää.

Gutiérrez-González et al. (2012) tutkimuksessa käytettiin materiaalien sekoitussuhdetta (w/p +PAW) EN 13279-2 standardin mukaan. Sekoitus mitattiin erikseen niin, että siitä saatiin hyvin työstettävä ja koossa pysyvä.

Yleinen huomio polyamidin käytöstä on, että PAW-materiaalin lisäämisen myötä laastin työstettävyyden parani ja työstöaika piteni huomattavasti. Myös mekaaniset ominaisuudet käytettäessä polyamidia olivat paremmat kuin vastaavasti esim. polystyreenillä.

## 5.2.5 Kumirouhe

Kumirouhetta saadaan yleisimmin rouhimalla mekaanisesti käytettyjä renkaita.

Espanjalaisen tutkimuksen mukaan vuonna 2006 Espanjassa kierrätettiin vain yksi prosentti kaikesta kumijätteestä. Suurin osa (n. 80 %) meni suoraan kaatopaikoille. (del Río Merino et al. 2006). Käytetyt renkaat muodostavat maailmanlaajuisesti merkittävän jäteongelman.

Rakentamisessa kumimateriaalia on käytetty esim. asfalteissa ja maanrakentamisessa kuten patovalleissa. Aikaisemmin on tehty useampia tutkimuksia kumirouheen lisäämisestä betoniin ja laastiin. Kumirouheella on korvattu runkoaineen hienoimpia aineksia. Tutkimustulokset ovat olleet samansuuntaisia:

Halkeamien määrä vähentyy, puristus- ja vetolujuus pienenee, kantavuus pienenee ja plastisuus lisääntyy, rakenteen liikkuvuuden sieto lisääntyy, murtuminen ei ole hauras, kumirouhe säilyy muuttumattomana betonissa.

Mercedes del Río Merino et al. (2006) testasivat kumirouheen käyttöä laastissa asettamalla ensin vertailuseoksen, jossa on mahdollisimman paljon kumirouhetta kuitenkin niin, että seoksen työstettävyys säilyy.

Sen jälkeen tehtiin useita koekappaleita, joissa on eri määrä kumirouhetta. Joissakin koekappaleissa käytettiin myös lasikuitua 1-2% kokonaispainoista. Lasikuidun lisäämisen tarkoituksena oli mahdollinen mekaanisten ominaisuuksien parantaminen.

Parhaan testituloksen saanutta seosta verrattiin standardiseokseen sekä aikaisemmissa tutkimuksissa käytettyyn saviseoksen (leca-sora) ominaisuuksiin.

Testeissä käy ilmi myös yllättävä kumin ja sementin sitoutumisen puuttuminen, jolloin massa erottuu ja koekappaleet murenevat heti valmistuttuaan.

Kumi-sementti-seoksen tiheys aleni oletetustikin noin 60 % prosenttiin normaalilaastin tiheydestä, sekä taivutusvetolujuus sekä puristuslujuus pienenevät. Kuitenkin rasitusmurtuminen on taas pitkittynyt ja koekappaleet tuhoutuvat kokonaan murenemalla. Kumirouheen muoto vaikutti myös murtumaominaisuuksiin.

Kapillaaritestit tehtiin 1 cm vedessä niin kauan kuin vesi nousi kappaleisiin, noin 50min. Testi osoitti, että kumirouhelaasti on huokoisempi ja imee vettä n. 60 % enemmän kuin normaali laasti.

Kumi-sementti laastilla on monta hyvää puolta (del Río Merino et al. 2006)

1. Kestävän kehityksen kannalta on parempi korvata uusia materiaaleja kierrätysmateriaalilla, joka muuten menisi kaatopaikoille.
2. Hintakehitys pitäisi puoltaa ekologisuutta silloin kun valtio tukee kierrätystä ja kumirouheen kysyntä kasvaa, jolloin tuottaminen tulee edullisemmaksi.
3. Kumi-sementti laastin elastisuus tukee käyttöpaikkoja, joissa vaaditaan hyvää rasituskestävyyttä liikkuvuutta vastaan.

4. Kumirouhe on lämpöeristävä materiaali verrattuna perinteiseen runkoainekseen.
5. Kumirouhe pysyy muuttumattomana
6. Ääneneristykseen kumisementti laasti sopii sen ominaisuuksien takia.
7. Keveys antaa mahdollisuuden käyttää laastia esim. puuvälipohjissa.

PCM- materiaalin käyttöä yhdessä kumirouheen kanssa on tutkittu Meshginin, Xi ja Lin tutkimuksessa vuodelta 2010. Tarkoituksena oli tutkia eri seosten ominaisuuksia lisäämällä sementtilaastiin kumia, puhdasta kalsiumia, liukenevaa polymeeriä, metyyliiselluloosaa ja puukuituja.

Kumirouheen oli valmistanut AcuGreen, Denver. Seula analyysi suoritettiin standardin ASTM C136-06 mukaan. Kumirouheen kokoluokkia oli kaksi, 6 mesh ja 8-10 mesh.

Puhdasta kalsiumia (ground calsiun, GC) käytetään sementtituotteissa fillerinä, koska kalsiumhiukkaset ovat pienempiä kuin sementtahiukkaset. Kalsium täyttää sementin jättämät välit ja näin ollen tiivistää laastin rakennetta. Tutkimuksessa käytettiin 325 mesh kalsiumia, jonka oli tuottanut Mineral Technologies.

Liukeneva polymeeri (redispersible polymer powder, RPP) on myös kaupallinen tuote. Polymeeri parantaa tiheyttä ja adheesiolujuutta. Lisäksi se vähentää veden absorptiota. Tutkimukseen käytettiin Dow Chemical Companyn valmistamaa DLP210 tuotetta.

Metyyliiselluloosa (Methyl Cellulose, MC) on selluloosan johdannainen. Valkoinen jauhe liukenee veteen ja sitä käytetään parantamaan laastin työstettävyyttä, viskositeettia tarttuvuutta. Tutkimuksessa on käytetty Dow Chemical Company-Methocel K15M tuotetta.

Puukuitua (WF) voidaan tuottaa esim. puista, korsista, bambusta, puuvillasta, siemenistä, hampusta ja sokeriruo'osta, Puukuitua käytetään sideaineena ja sen käytöstä on oma osionsa. Tutkimuksessa käytettiin TECHNOCEL 1004-7N puukuitua, jonka on tuottanut CFF. Kaikissa koekappaleissa oli sama määrä puukuitua.

PCM- materiaalina tutkimuksessa käytettiin Microtekin tuottamaa MPCM-28 tuotetta. Sulamislämpö tällä tuotteella on 28°C. MPCM-28 on kapseloitu niin, että se kestää laastin valmistuksen.

Testeissä tutkittiin puristuslujuutta, taivutuslujuutta, lämmönjohtokykyä, kuivumiskustumaa ja vetolujuutta. Kumipartikkeleiden koko ei mainittavasti vaikuttanut puristuslujuuteen eikä taivutuslujuuteen, joka on myös todettu muissa tutkimuksissa, sen sijaan kumipartikkeleiden määrä vaikuttaa lujuuteen heikentävästi.

Varsinkin puristuslujuuden heikkeneminen on huomattavaa. Puristuslujuuden heikkeneminen on selitettävissä kumirouheen ominaisuuksilla pehmeänä materiaalina. Taivutuslujuuden pienempi lasku selittyy kumirouheen hiutalemaisella muodolla, joka parantaa vetolujuutta. Merkittävä havainto on myös lujuuksien eron pieneneminen laastin vanhetessa.

RPP:n käyttö heikentää myös laastin puristuslujuutta, mutta taivutuslujuus säilyy suunnilleen samana, kuin muillakin seoksilla. Siksi RPP käy hyvin laasteihin, joissa pyritään minimoimaan halkeamia.

PCM:n vaikutuksia vertailtiin lisäämällä sama määrä PCM:a, kuin lisättiin kumipartikkeleita osassa näytteitä. PCM:n tilavuusosuus vastasi muissa näytteissä olevan kumirouheen tilavuusosuutta, koska materiaalien tiheydet ovat kutakuinkin samat.

Puristus- ja taivutuslujuus eivät vertailussa eronneet paljoa toisistaan, sen sijaan taivutusmurtumat erosivat täysin toisistaan. PCM- näytteen, kuva 5,3 murtuma oli äkkinäinen ja hauras, kun taas kuminäytteen murtuma oli hidas ja joustava.



**Kuva 5.3.** Ylempänä kumirouhe-laastilla tehty koekappale ja alempana PCM-laastilla tehty koekappale. (Meshgin et al. 2012)

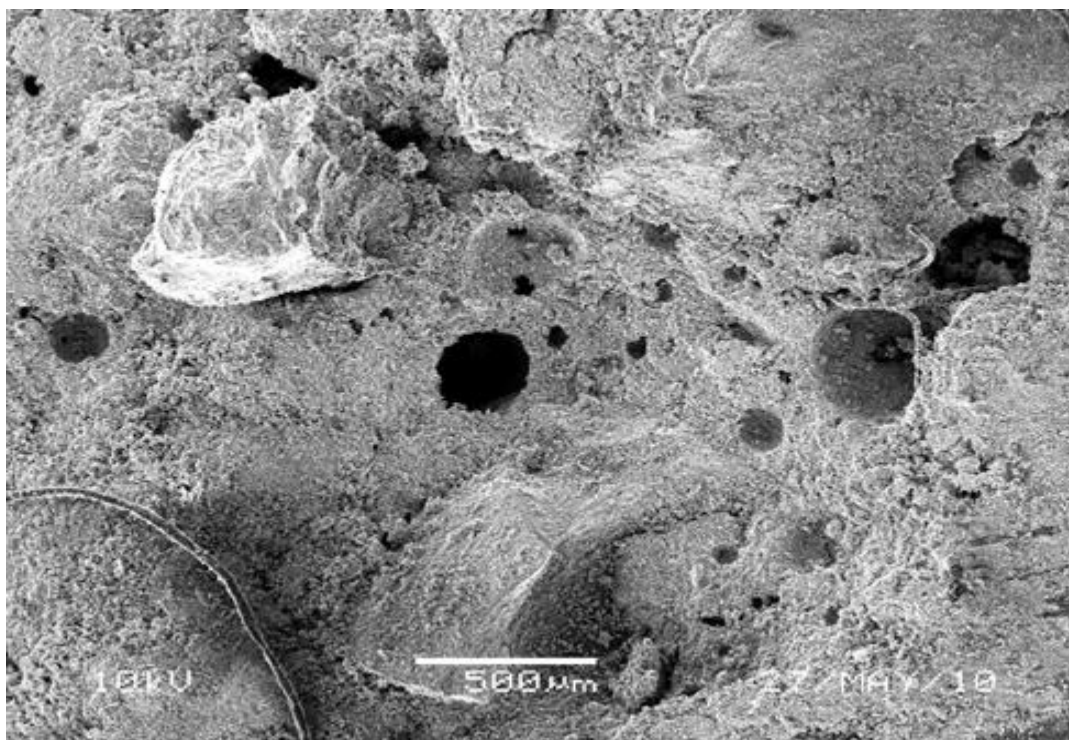
Kumirouhetta sisältävän laastin lämmönjohtavuuteen vaikuttaa sekä partikkeleiden koko että niiden määrä. Mitä enemmän pieniä partikkeleita laastissa on, sitä vähemmän laasti johtaa lämpöä. Lähes samanlaiseen tulokseen päästään lisäämällä kumirouheen määrää laastissa. RPP taas lisää kumirouhelaastin lämmönjohtavuutta.

PCM käyttäytyy suunnilleen samoin kuin suurempikokoisia partikkeleita sisältävä kumirouhelaasti. PCM:n ominaisuuksien ero näkyy PCM:n sulamispisteessä, jolloin lämpökapasiteetin nousu näkyy piikkinä mittaustuloksissa. Suuri lämpökapasiteetin nousu korreloi myös eristävyysparanemiseen laastissa. Myös lämpötilan diffuusiokerroin muuttuu huomattavasti sulamispisteessä ja pysyy korkeana myös sulamispisteen jälkeen.

Vetolujuustesteissä saivat paremmat arvot kumirouhelaasti pienillä partikkeleilla sekä RPP, joilla on hyvä sitoutumiskyky. Sen sijaan PCM-laastin vetolujuus oli huomattavasti parempi kuin muiden. Tätä selittää PCM-partikkeleiden pieni koko ja sen sekoittuminen sementin kanssa.

Samankaltaisia tuloksia saatiin myös kutistumisarvoilla. Kutistuminen on suurinta silloin, kun kumirouhetta on paljon tai partikkelikoko on suuri. RPP, PCM ja pienikokoinen kumirouhe kutistuvat suunnilleen samalla tavalla. Tämän katsotaan johtuvan siitä, että pienet partikkelit täyttävät sementin huokosia ja kosteuden läpäisy hidastuu, josta johtuen myös kutistuminen pienenee. PCM-materiaalissa oleva vesi suurentaa vesi-sementti-suhdetta ja luulisi näin vaikuttavan kutistumaan, mutta mikrokapseleiden pieni koko vaikuttaa vastavoimana kutistumaa vähentävästi. Elektronimikroskoopin kuva 5.4

kumirouhesementistä kertoo, että kumin ja sementin sidos on luja, samaten puukuidun ja sementin sidos. Puukuitu näkyy kuvassa vasemmalla ohuena pitkänä linjana, jossa ei ole mitään aukkoja sementin ja puukuidun välillä. Samoin keskellä oleva pyöreä kumirouhepartikkeli on täysin sementin ympäröimä.



**Kuva 5.4.** Kumirouheen ja sementin sidos. (Meshgin et al. 2012)

Kumirouhesementin palonkesto-ominaisuuksista ei löytynyt tutkimuksia erikseen.

Kumirouheen käyttö komposiittipaneeleissa seossuhteella 60/40 ja 50/50 paransi ääneneristystä verrattuna vastaaviin vain puusta tehtyihin levyihin.

Tekotavasta johtuen jätekumilla on paljon paremmat lujuus- ja elastisuusarvot kuin luonnonkumeilla. Jätekumi koostuu suurelta osin butyylikumista (IIR), butadieeniakryliiniinikumista (NBR) ja hiilimustasta.

## 5.2.6 Puupilke

Puupilke on puutuotannon jätettä, jota käytetään Suomessa esim. energian lähteenä. Puupilkkeen käytöstä betonin ja tasoitteen lisäaineena on tehty muutama tutkimus tarkoituksena lisätä puupilkkeen hyötykäyttöä.

Puupilkkeen hyötyjä olisi keveyden lisäksi sen akustiset ja eristävät ominaisuudet.

Tutkimuksessaan vuonna 2004 Coatanlem et al. kehittivät kevytbetoniyhdistelmän, joka täyttää RILEM-suositukset. Tutkimuksessa viitataan Tamban et al. aikaisempaan

tutkimukseen, jossa keskityttiin materiaalien fysikaalisiin ja kemiallisiin ominaisuuksiin. Tässä Coatanlemin tutkimuksessa keskitytään materiaalin mekaanisiin kestävyysominaisuuksiin erilaisissa koetilanteissa. Tarkoituksena on lujittaa puu-sementti-sidettä materiaalissa.

Tutkimuksessa käytettiin puuainesta, jonka läpimitta vaihteli 0,5-10 mm välillä.

Sementtinä käytettiin CEM I 52.5 jonka puristuslujuus 28 pv:n jälkeen on 48MPa. Suoraan sementtiin sekoitettuna puu-aines voi sekoittaa vesi-sementti-suhdetta, joka taas voi vahingoittaa hydraatiota.

Puu-aines kyllästettiin liuksella, joka sisälsi natriumsilikaattia. Natriumsilikaatin on todettu muissa tutkimuksissa parantavan sitoutumista. (pozzolaaninen efekti)

Kuukauden näytteissä puristuslujuus kaikissa näytteissä jäi alle 10MPa ja tulokset ovat tyypillisiä kevyen laastin tuloksia. Etringiitin synty silloin, kun saatavilla on natriumia on ilmeistä.

Mehling et al. käyttivät PCM-materiaalina kahta Rubitherm kapselityyppiä. GR40, 1-3 mm ja GR50, 0,2-0,6 mm. Puumateriaali ei sanottavasti heikentänyt betonin mekaanisia ominaisuuksia.

Lämmönjohtavuus:  $\lambda = 0,15-0,75 \text{ W/m K}$

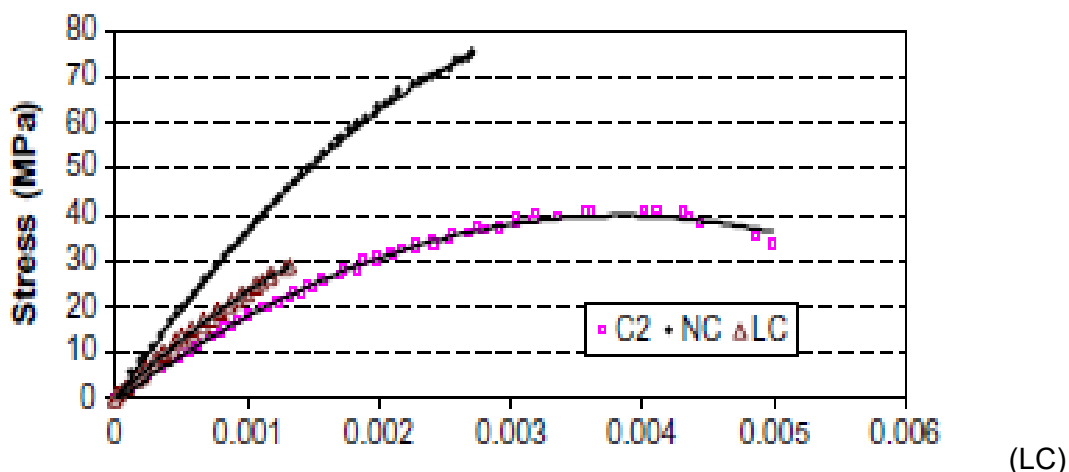
Ominaislämpökapasiteetti:  $C^p = 0,39-0,48 \text{ kJ/kg}$  kun  $\rho = 1300 \text{ kg/m}^3$

### 5.2.7 Öljypalmun kuori

Palmuöljyn sivutuotteena syntynyt kuoriaines soveltuu, kuten muutkin kuidut, kevyt-betonin runkoaineeksi.

Palmuöljyä tuotetaan pääasiassa trooppisilla alueilla, kuten Aasiassa, Afrikassa sekä Keski- ja Etelä-Amerikassa. Shafigh et al (2011) tutkimuksessaan osoittaneet että palmuöljykuidulla (OPS) voidaan tuottaa hyvän puristuslujuuden omaavaa kevytbetonia/laastia. Tutkimuksessa verrattiin OPS materiaalilla kevennettyä betonia, normaalibetonia ja paisutetulla savella (lecasora) kevennettyä betonia.

Kuvassa 5.5 esitetään eri seosten jännitys-venymäkäyrät. Vertailu antaa hyvän kuvan OPS betonin sitkeydestä.



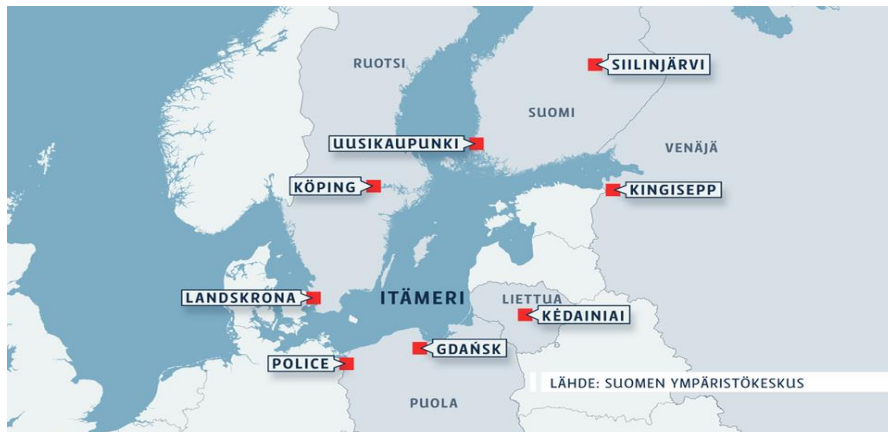
**Kuva 5.5.** Jännitys-venymäkäyrien vertailu. OPS (C2), normaali (NC) ja Leca (LC) betoni. ( Sahfigh P et al. 2011)

Betonilaatat ovat läpäisseet käyttökuorman standardivaatimukset ja myös vetolujuus on ollut huomattavan korkea verrattuna muihin kevytmateriaaleihin. Myös leikkauslujuus on ollut hyvä. Ainoa huono puoli on ollut OPS-betonin elastisuuden puute.

### 5.2.8 Kipsi

Kipsi on yleisesti käytetty materiaali sisärakentamisessa. Kipsiä käytetään sellaiseenaan erilaisissa täytöissä, koska se kuivuu nopeasti ja sillä voi tehdä isoja täyttöjä kerralla. Kipsistä voi valaa myös esimerkiksi lattioita. Kipsilevyjen käytöstä syntyy runsaasti jätettä, jota on viime aikoina alettu keräämään myös jäteasemilla. Rakennusjätteen lajittelu jo työmailla on ensiarvoisen tärkeässä asemassa jätteen hyödyntämisen kannalta. Kipsijätteen hyödyntäminen esim. maatyöissä on hankalaa, koska märkä kipsijäte sisältää pohjavettä saastuttavia aineita sekä muodostaa haisevaa kaasua maaperässä.

Teollista kipsijätettä syntyy muun tuotannon sivutuotteena. Kuvassa 5.6 on esitetty Itämeren valuma-alueen kipsivuoret. Niiden fosforipäästöt ovat vuonna 2011 olleet n. 125 tonnia vuodessa. Venäjän Kingiseppin fosforipäästöjä on saatu alennetuksi n. 2000 tonnista 50-100 tonniin vuodessa. Kuvassa 5.7 on näkymä Siilinjärveltä, jossa on toiminnassa oleva tuotantolaitos sekä apatiittikaivos.



**Kuva 5.6.** Itämeren alueen fosforikuormitus (YLE 2013)



**Kuva 5.7.** Siilinjärven Yara lannoitetehtaan kipsivuori (vastavalo.fi)

Teollisuuskipsijätteen hyödyntäminen on vaikeampaa, koska kipsijättemassa herkästi reagoi kemiallisesti muiden yhdisteiden kanssa ja lisäksi kipsijätteellä on olematon vedensietokyky.

The Pennsylvania State University on aloittanut vuonna 2011 kaupallisen tutkimuksen kipsilevyjätteen hyödyntämisestä betonin seassa n. 20: %: lla. Kipsijätteen käyttäminen vähentäisi betonin kustannuksia sekä toimisi ekologisesti vähentämällä sementin kulutusta.

### 5.2.9 Polyuretaani

Polyuretaanijätteellä ei ole tähän mennessä ollut paljon käyttökohteita. Yleensä jätettä on käytetty esim. maantäyteenä. Ekologista ajattelua noudattaen olisi hyvä, jos materiaali voitaisiin kierrättää.

Revitty polyuretaanijäte voidaan sekoittaa sementin kanssa kevytlaastiksi.

Polyuretaanipitoisen kevytlaastin ominaisuuksia on verrattu myös muihin aikaisemmin tuotettuihin kevytmateriaalitasoitteisiin sekä materiaalista on pyritty löytämään optimaalinen koostumus, joka olisi hyvä tuotannon kannalta.

(Gadea et al.2010) vertailee laastien tiheyttä vaihtelevilla koostumuksilla, josta seuraavassa tiivistelmä.

Kevytlaastin valmistuksessa on käytetty autoteollisuudesta saatavaa polyuretaanijätettä (PFW) joka on revitty 0-4 mm kokoisiksi palasiksi ja sekoitettu eri koostumuksilla kahden eri sementtilaadun kanssa.

Toisin kuin on ajateltu, PFW:n lisäys vähensi vesi-sementti suhdetta, jonka ajateltiin johtuvan siitä, että vettä vaativa osuus koostumuksessa pieneni.

Laastin työstettävyys määritellään EN Standardin 1015-9 mukaan ajaksi, jolloin laasti saavuttaa  $0,5\text{N}/\text{mm}^2$  lujuuden mitattuna  $14,7\text{ N}$  voimalla. Mittaukset PFW- laastista osoittivat suurempia lujuuksia, kuin standardivaatimukset. Työstettävyysaika suureni huomattavasti PFW: n lisäyksen seurauksena.

Ominaispainon vähennys tuoreena oli kahdella eri koesarjalla oli enimmillään 30 %:sta 50 %:iin.

Kuivuneella laastilla ominaispainon vähennys oli noin 200 kg lisää, jolloin I-sarjan painoksi saadaan n.  $1200\text{ kg}/\text{m}^3$  ja II-sarjan painoksi n.  $1000\text{ kg}/\text{m}^3$ .

Myös testimateriaalin vesihöyrynläpäisevyys todettiin hyväksi , koska PFW muodostaa laastiin luontaisia reittejä, joita myöten vesihöyry voi kulkea.

Puristus- ja taivutuslujuus mitattuna EN 10015-11 standardin mukaisesti on PFW-laasteilla kuivuneena n. 50 % heikompi kuin normaalilaastilla. 25 %:n PFW- lisäyksellä puristuslujuus on I-sarjassa n.25 MPa ja II-sarjassa n.24 MPa.

PFW: lla on kokeiden perusteella tiettyä joustavuutta, joka mahdollistaa pienen rakenteellisen liikkeen kestävyuden, vaikka muuten läpäisevyys tekee siitä mekaanisesti heikomman rakenteen.

## 5.2.10 Perliitti

Sengul et al. tutkivat perliitin ominaisuuksia ja taloudellisuutta 2010 julkaistussa tutkimuksessaan. Perliitti on piioksidipitoinen vulkaaninen lasi, joka laajenee lämmitettäessä yli  $870^\circ\text{C}$ :n 4-20 kertaiseksi. Paisutetun perliitin tiheys on pieni, se on kevyttä. Sitä käytetään rakentamisessa, maataloudessa ja lääke- sekä kemiallisessa teollisuudessa. Käyttö kevytlaastissa, hyvä ääneneristävyys ja paloneristävyys. Perliittibetoni ei kestä kuormaa. Perliittisekoitteista laastia voidaan käyttää esim. uima-altaissa, piippujen rappauksissa ja lattioissa keventäjänä ja äänieristäjänä.

Perliitin suuri veden absorptiokyky auttaa sementin nesteytyksessä pitkällä aikavälillä, jolloin sementin vesi/sementtisuhde voidaan pitää alhaisena. Perliitti on myös pozzolainen materiaali.

Sengulin tutkimuksessa perliittiä on lisätty betonin runkoaineen tilalle 20-100%. Puristuslujuus 20 % perliitin lisäyksellä oli 17,3 MPa, kun normaali betonin puristuslujuus oli 28,8 MPa. 20%:n perliitin lisäyksellä saatua betonia nimitetään kevyeksi rakennebetoniksi, kun yli 20 % perliittiä sisältävä betoni luokitellaan eristäväksi betoniksi. Taulukossa 5.3 on esitetty tutkimuksessa olleet seokset. Taulukko 5.4 esittää saadut tulokset koekappaleilla.

**Taulukko 5.3.** Tutkimuksen seossuhteet. (Sengul et al. 2010)

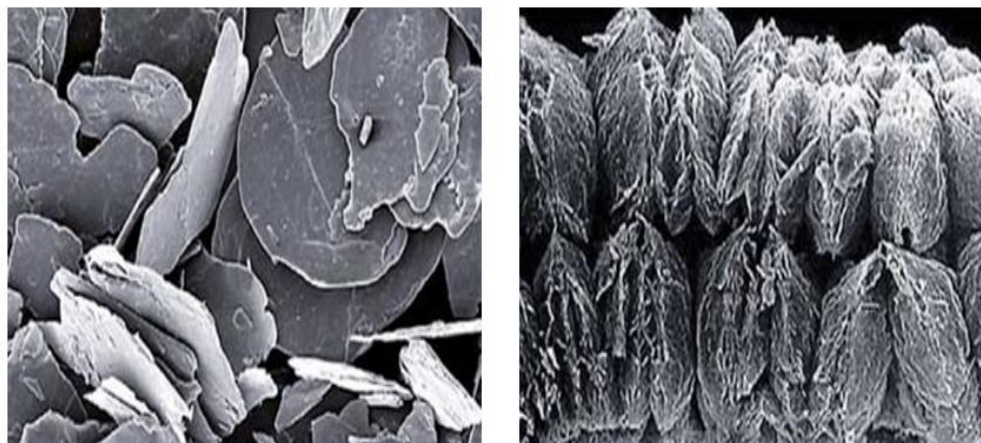
Concrete codes	NC	EPC20	EPC40	EPC60	EPC80	EPC100
Cement(kg/m <sup>3</sup> )	317	337	326	301	297	295
Water (kg/m <sup>3</sup> )	175	185	179	166	163	162
Pre-absorption water (kg/m <sup>3</sup> )	0	37	71	100	131	162
Effective water/cement ratio	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
Natural sand 0-4 mm (kg/m <sup>3</sup> )	1517	1288	937	581	286	0
Expanded perlite 2-4 mm (kg/m <sup>3</sup> )	0	17	33	47	61	76
Superplasticizer (kg/m <sup>3</sup> )	4,8	5,1	1,5	0	0	0
Air entraining admixture (kg/m <sup>3</sup> )	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9
Fresh unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	2015	1870	1549	1196	939	696

**Taulukko 5.4.** Puristuslujuuden ja muiden ominaisuuksien vertailutaulukko. (Sengul et al. 2010)

Concrete codes	NC	EPC20	EPC40	EPC60	EPC80	EPC100
Compressive strength (MPa)	28,8	17,3	10,9	4,6	1,1	0,1
Modulus of elasticity (GPa)	19,5	12,8	9,4	3,3	-	-
Thermal conductivity (W/mK)	0,6	0,57	0,53	0,35	0,21	0,13
Water absorption (%)	6,4	9,8	13,3	19,8	33,9	79,3
Sorptivity coefficient (*10 <sup>-3</sup> cm/s <sup>1/2</sup> )	0,12	0,18	0,19	0,22	0,25	0,41

### 5.2.11 Paisutettu grafiitti

Sementtilaastiin on lisätty parafiinia sisältävää paisutettua grafiittia. Parafiini on lisätty grafiittiin vakuumiabsorbointi menetelmällä. Paisutettu grafiitti on sopinut hyvin parafiinin kanssa tuomaan sille paremman lämmönvarauskyvyn ja stabiliteetin. Kuvassa 5.8 on esitetty grafiitin ja paisutetun grafiitin ero.



**Kuva 5.8.** Oikealla grafiitti ja vasemmalla paisutettu grafiitti. (Brynmolf Grönmark Ab)

Li, Wu ja Tan 2012 tutkivat paisutetun grafiitin (EG) käyttöä PCM materiaalien kanssa sementtilaastissa. Parafiinilla on yksin käytettynä sen käytön estäviä ominaisuuksia, kuten parafiinin vuotaminen materiaaliin ja sen lämmönjohtokyky. Tässä tutkimuksessa parafiini sekoitettiin paisutettuun grafiittiin, jolloin saatiin lämpöä varastoiva sementtilaasti.

Testeissä on mitattu PCM- sementtilaastin kykyä varastoida lämpöä verrattuna tavalliseen sementtilaastiin. (OCM). Molemmilla testikappaleilla maksimi lämpötilanvaihtelu on 2,2K lämpövarauksen aikana ja 1,5K lämmön luovuttamisen aikana. Lämmönvaraus HSCM-laattalla on 1,74 kertainen tavalliseen laattaan.

Kokeissa käytetty parafiini on hankittu Rubithermilta, grafiitti on Qingdao Graphite Co., hiilipitoisuus 97 %. Sementtinä käytettiin Portland- sementtiä 32,5. Lisäksi käytettiin lateksijauhoa (VAE), sekä hydroxipropyli metyyliiselluloosaa (HPMC).

Taulukoissa 5.5 ja 5.6 on eritelty testikappaleiden koostumus ja ominaisuudet.

**Taulukko 5.5.** Testikappaleiden koostumus

Massojen suhde, s/h	Vesi-sementtisuhte	HPMC	VAE	Ppfiber	EG
1:2	0,89	0,2 % of c.	2 % of c.	0,2 % of c.	20 % of c.
1:2,5	0,86	0,2 % of c.	2 % of c.	0,2 % of c.	0

**Taulukko 5.6.**Ominaisuudet 28:n vuorokauden jälkeen

Materiaali	Paksuus	Puristuslujuus	Taivutuslujuus	Sidoslujuus	Kutistuma	Kuivatiheys	Lämmönjoht.
	mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	kg/m <sup>3</sup>	W/mK
HSCM1406	9	5,1	2,01	0,3	0,547	1406	0,81
OCM	8	5,5	2,31	0,47	0,442	1635	0,75

Lämmönvarastointiominaisuuksia mitattiin Multi-channel Temperature Recorder, (TP90008U) Näytteiden mikrorakenne testattiin SEM-laitteella, 20kV Latenttilämmön ja faasimuutoslämpötilat mitattiin differentiaaliscannauskalorimetrillä (DSC200F3, Germany)

EG/parafiini-komposiitti lämmitettiin 60°C:sta ja annettiin jäähtyä huonelämpötilaan 100 kerran sykleissä. Komposiitti muuttui vain hieman 100 kerran jälkeen, joten sitä voidaan käyttää PCM-materiaalina. EG/parafiini-komposiitin faasimuutoslämpötila on hieman pienempi(28,55°C) kuin pelkän parafiinin(28,8°C).Samoin latentti lämpö on hieman alhaisempi183,0 kJ/kg kuin pelkällä parafiinilla (209,3 kJ/kg).

Vertailussa huomattiin myös, että lämmitys/jäähtyminen-sykli on laajempi komposiittimateriaalilla, kuin pelkällä parafiinilla, koska grafiitilla on suuri lämmönjohtokyky.

Erilaisilla PCM-pitoisuuksilla saadut puristuslujuus- ja taivutuslujuusarvot osoittavat, että PCM-materiaalia ei saa olla enempää kuin 20 % . JC 890-2001 standardin mukaan puristuslujuuden arvo ei saisi olla vähempää kuin 5,0 MPa ja taivutuslujuuden arvo vähempää kuin 2,0 MPa. British Standard BS 476: Part 22, 1987 ja BS 6319: 1983, Chinese Standard: JC/T 890:2001, JG/T 230:2007 (Special Masonry Mortar and Plaster Mortar for Autoclaved Aerated Concrete) (Li, Wu ja Tan 2012)

## 5.2.12 Muut materiaalit

**Silica** eli silika on piin ja hapen yhdiste. Piidioksidi on luonnossa esiintyvä mineraali, jolla on kolme kidemuotoa, kvartsi, kristobaliitti ja tridymiitti. Kolme muuta tunnettua muotoa ovat keatiitti, koesiitti ja stishoviitti. Amorfinen piidioksidi (silikalasi) syntyy kuumentettaessa piidioksidikidettä sulamispisteeseen. Silikasta tehdään täytepalloja lasin tavoin, tutkimuksissa todettu hyväksi kuorimateriaaliksi grafiitin tavoin.

Silikageeli on piidioksidin ja piihappojen seos, jota käytetään kosteuden sitojana esim. tavaroiden kuljetuksessa. Hapetettua piitä käytetään myös eristeenä.

Mikrosilika on betonin lujiteaineena käytettyä amorfista piidioksidia, jotka ovat mikronin kokoisia noin 50 kertaa normaalia sementtiä hienojakoisempia hiukkasia.

**PMMA** (polymethylmethacrylate, akryyli) on lineaarinen kestopuovi, jolla on hyvä mekaaninen kestävyys. Sitä käytetään palloina täyteaineena. Akrylaatti imee hyvin vähän kosteutta ja siitä valmistetut tuotteet pysyvät muuttumattomina. Ominaisuudet paranevat lämpötilan noustessa. PMMA ei kuitenkaan sovellu dynaamiseen kuormitukseen. UV-säteily ja otsoni vaikuttavat vain vähän lujuusominaisuuksiin. PMMA on kuitenkin palava materiaali, jonka palamisesta vapautuvat tuotteet ovat haitallisia. Akrylaatti kestää kuitenkin heikosti kloorattuja ja aromaattisia hiilivetyjä, estereitä ja ketoneita. (Milena Kolvea, 2016)

**Vuolukivi** eli pyrofylliitti on metamorfinen suurelta osin mangnesiitista ja talkista koostuva kivilaji. Vuolukivellä on suuri tiheys verrattuna esim. tiileen, myös lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti ovat hyviä. Sitä käytetäänkin paljon tulisijoissa. Taulukossa 5.7 nähdään vuolukiven ominaisuuksia verrattuna graniittiin ja tiileen. (Tulikivi)

**Taulukko 5.7.** Vuolukiven ominaisuudet

Ominaisuudet	Vuolukivi	Graniitti	Tiili
Tiheys kg/m <sup>3</sup>	3000	2750	2000
Lämmönjohtavuus W/m/K	6,4	2,1-4,1	0,25
Ominaislämpökapasiteetti kJ/kg/K	0,98	0,8	0,9

Pitäisi tutkia vuolukiven ominaisuuksien muutos, jos kiveä käytetään murskattuna täyteaineena, jolloin saataisiin kiven valmistuksessa käytetty hukkamateriaali käyttöön.

### 5.3 Johtopäätökset ja kehitysehdotukset

Kevytlaastia voidaan käyttää puuväli pohjissa korvaamaan perinteisen rakenteen ja PCM-laastia käyttämällä parannetaan rakennuksen energiatehokkuutta.

Huoneistojen välisten seinien tasoitteet voidaan korvata kevytlaastilla, jolloin rakenteesta saadaan kevyempi .

Grafiittipohjaisia tuotteita on käytetty kaupallisesti PCM- materiaalien kanssa lähinnä levytuotteissa. PCM- materiaalina on käytetty kaupallisia PCM-tuotteita. Yksi johtavista valmistajista valmistaa komposiittilevyjä sekä PCM-grafiittiseosta. Levyissä voidaan käyttää myös paisutettua grafiittia ja PCM-materiaalia. Silikasta tehtyjä palloja voidaan käyttää kevennysaineena

Muovirunkoainetta sisältävän betonin puristuslujuus laski kaikissa tehdyissä tutkimuksissa . Syyksi on arveltu muovin ja sementin sidoksen heikkoutta tai toisena vaihtoehtona sementin hydraation estymistä muoviaineksen vaikutuksesta. Puristuslujuus laski suoraan verrattuna muovirunkoaineen määrään. 5 % lisäys sementtiin laski puristuslujuutta jo 20 %, kun 20 %:n lisäys laski sitä jo 75 %.

PET-materiaalilla tehdyn laastin puristuslujuus nousi, kun sidosaineena käytettiin normaalin Portland-sementin sijasta sekoitusta, jossa oli puolet Portland-sementtiä ja puolet

masuunikuonaa. Paras tulos on saavutettu, kun runkoaineeseen on lisätty melamiinia ja sidosaineena on käytetty Portland-sementtiä ja lentotuhkaa. (Panyakapo et al. 2008)

Puristuslujuuskokeissa huomattiin myös, että ne näytteet, jotka sisälsivät muovia, eivät murru hauraasti kuten tavalliset sementtilaastit vaan murtuminen on enemmänkin plastinen. Useamman tutkijan huomio on ollut, että ominaisuuden avulla näytteet, joissa oli muovia, pystyivät kantamaan kuormaa muutaman minuutin murtumisen jälkeen. Albano et al.(2009) huomasivat myös, että murtuman paikka vaihteli muovilaadun mukaan kuitenkin runkoaineen korvausprosentin ollessa 20 % kaikissa näytteissä. On myös otaksuttu, että hiutalemainen PET-muovi muodostaa sillan murtuman kohdalle.

# 6 FAASIMUUTOSMATERIAALIEN KÄYTTÖ RAKENTAMISESSA

## 6.1 Johdanto

Vaatimukset energian käytön vähentämiseen asumisessa johtaa kiristyviin vaatimuksiin myös rakentamisessa. Energiansäästön rinnalla halutaan edistää ekologista rakentamista, jolloin lasketaan rakennuksen valmistuksen ja käytön tuottamaa hiilijalanjälkeä. Energian kokonaiskulutuksesta maailmassa 28 % käytetään rakentamiseen.

Kiristyneet vaatimukset ovat johtaneet uusien innovaatioiden kehittelyyn energian kulutuksen vähentämisessä. Erityisesti halutaan tutkia, voidaanko passiivenergiatalon massiivirakenteita korvata kevyemmällä rakenteilla, jolloin valmistukseen käytetty energiamäärä vähenee ja valmistuksen kannattavuus paranee.

Termisellä massalla, joka tarkoittaa materiaalin kykyä ottaa vastaan, sitoa ja luovuttaa lämpöä, voidaan lisätä energian hidasta talteenottoa sekä energian hidasta luovutusta. Vrt. esim. vanha tiiliseinä. Materiaaleilta vaaditaan hyvää lämmön talteenottokykyä, keski- ja korkeaa infrapuna- säteilykykyä.

## 6.2 Faasimuutosmateriaalit

Faasimuutosmateriaalit (PCM-materiaalit) pystyvät varastoimaan suuremman määrän energiaa, kuin muut energian säilömismenetelmät. Faasimuutosmateriaaleja voidaan käyttää joko aktiivisina tai passiivisina lämmön tai kylmän tuottajina.

Termistä massaa on kevytrakenteissa pyritty korvaamaan myös faasimuutosmateriaaleilla (PCM), jotka lisäävät energian varastointikykyä. PCM-materiaalien tehokkaassa käytössä on vielä ratkaisemattomia ongelmia ja myös niiden käyttö oikeissa rakennuksissa on ollut vähäistä. Kevyissä rakenteissa PCM-sijoittelu korvaa termisen massan. Luvussa 4.3 käsitellään faasimuutosmateriaaleille soveltuvia rakenneratkaisuja.

Optimaalinen PCM-lämpötila voidaan laskea kaavasta (Peippo et al.1990)

$$T_{m,opt} = T_r + \frac{Q}{ht_{stor}} \quad (6.24)$$

missä

$T_{m,opt}$  on optimaalinen faasimuutospiste PCM: lle (°C)

$T_r$  on huonelämpötila

$Q$  on pinnan absorboima lämpömäärä (J/m<sup>2</sup>)

$h$  on pinnan lämmönläpäisykerroin (W/m<sup>2</sup>/K)

$t_{stor}$  on päivittäinen varausaika (s)

$$D_{opt} = \frac{t_n h}{\rho \Delta H} (T_{m,opt} - T_n) \quad (6.25)$$

missä

$D_{opt}$	on PCM-materiaalin optimaalinen paksuus (m)
$T_n$	on huoneen yölämpötila
$\Delta H$	on latentin lämmön määrä (J/kg)

$$T_r = \frac{t_d T_d + t_n T_n}{t_d + t_n} \quad (6.26)$$

missä

$t_d$	on varausaika päivällä (s),
$T_d$	on huoneen päivälämpötila (°C)
$t_n$	on luovutusaika yöllä (s)
$T_n$	on huoneen yölämpötila (°C)
$t_d + t_n$	on sykli (s), (24 h)

Laskennan tulos ei ole yleispätevä, vaan riippuu rakenteesta, käytetystä PCM-materiaalista ja sen lämpötilan diffuusiokertoimesta.

Läpäisy aika  $t_p$  voidaan laskea kaavasta

$$t_p = (e/2)^2 / \alpha \quad (6.27)$$

missä

$\alpha$	on diffuusio ( $m^2/s$ )
$e$	on seinän paksuus.

Läpäisyajan on oltava vähemmän, kuin 12 tuntia, jotta saavutetaan päivittäinen lämmönvaraus.

## 6.3 Faasimuutosmateriaalien valintakriteerit

### Kineettiset ominaisuudet

1. Nopea kiteytyminen, joka estää nesteen alijäähtymistä.
2. Suuri kidekasvu, joka edesauttaa pitkäaikaisuutta

Alijäähtyminen estää eksotermista faasimuutosta ts. materiaali ei jähmety, vaikka sen lämpötila on jähmettymispisteen alapuolella. Luonnossa ilmiö voidaan nähdä vesistöjen jäätyminen yhteydessä. Materiaali ei luovuta varastoitua energiaa huoneilmaan epätäydellisen faasimuutoksen vuoksi. Alijäähtymisen estämiseksi voidaan käyttää tuotteita, joilla on nopea kidekasvu.

### Thermodynaamiset ominaisuudet

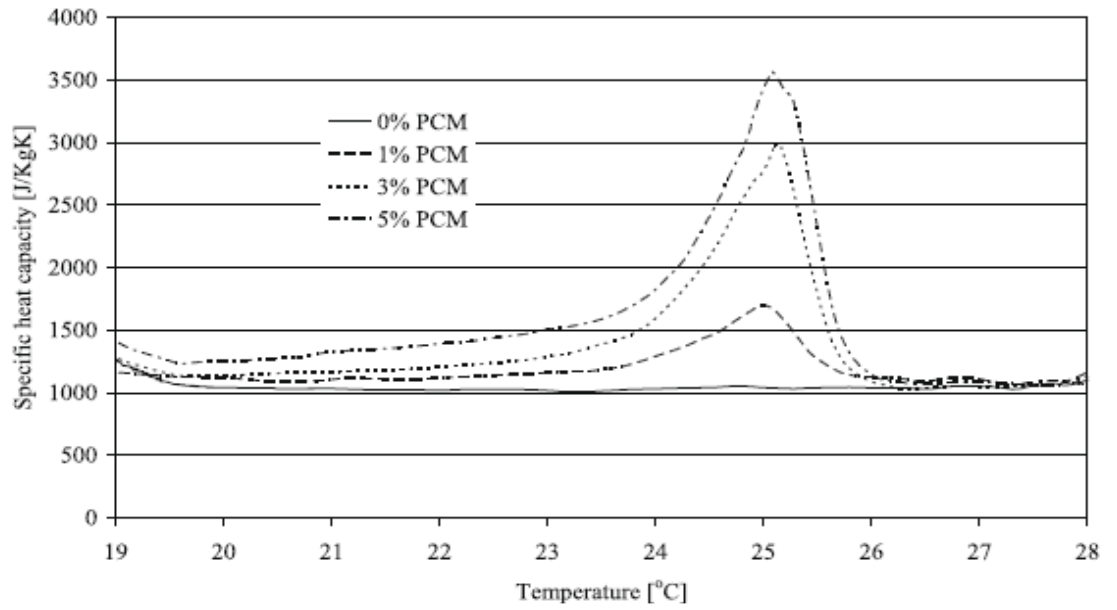
1. Sulamis- ja jähmettymispiste halutulla alueella käytön mukaan
2. Korkea lämmönvarastointikyky
3. Korkea lämmönjohtavuus
4. Korkea ominaislämpökapasiteetti ja tiheys
5. Pienet tilavuusmuutokset
6. Jähmettyminen-sulamisen yhdenmukaista

Materiaaleilta, joita käytetään asuinrakennuksissa passiivisena lämmönsäätelijänä, vaaditaan lämpötilaominaisuuksia, jotka soveltuvat nimenomaan ihmisen oleskelulämpötiloihin. (Yleensä 18-28°C) Muissa rakenteissa, kuten silloissa, lämpötila voi olla kylmempi. Koneellisen jäähdtyksen ansiosta voidaan käyttää myös materiaaleja, joiden jähmettymispiste on alhaisempi, jolloin faasimuutosmateriaalin käytettävyyss paranee.

Faasimuutosmateriaaleina on yleisesti käytetty epäorgaanisia aineita kuten suoloja, joilla on korkea energianvaraamiskyky ja lämmönjohtavuus. Lisäksi suolat ovat syttymättömiä ja halpoja. Suoloja on myös hyvin saatavilla. Epäorgaaniset aineet eivät kuitenkaan sovi yhteen kaikkien aineiden kanssa, ne voivat aiheuttaa esim. korroosiota sekä ns. ylijäähtymistä.

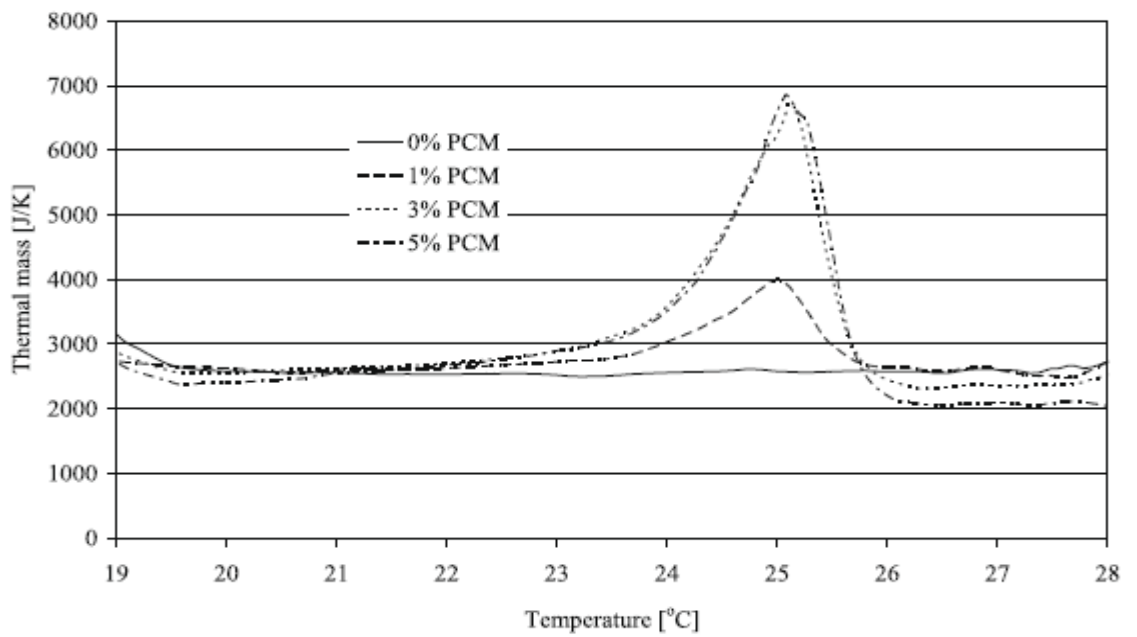
Lämmönjohtavuuden merkitys kasvaa rakenteesta riippuen. Jos PCM-materiaalin ja huoneilman välissä on huonosti lämpöä johtavia materiaaleja, lämmönsiirtyminen PCM-materiaalista huoneilmaan hidastuu. Tämän seurauksena on faasimuutosmateriaaleja käytettäessä otettava huomioon myös runkoaineen lämmönjohtavuus ja suunnitellun rakenteen paksuus. (Hunger M. et al. 2009)

Hungerin et al. mukaan suuri ominaislämpökapasiteetti vaikuttaa materiaalin lämmönvarastointikykyyn sekä myös lämmönluovutukseen materiaalin jäähtyessä. Faasimuutosmateriaalin lisäys vaikuttaa teholliseen ominaislämpökapasiteettiin, 5 %:n lisäyksellä ominaislämpökapasiteetti kasvaa 3,5 kertaiseksi riippuen käytetystä materiaalista. Kuitenkin suurempi PCM:n lisäys ei vaikuta materiaalin termiseen massaansa lisäävästi. Kuvissa 6.1 ja 6.2 esitetään PCM:n lisäyksen suhde materiaalin ominaislämpökapasiteettiin ja termiseen massaansa.



**Kuva 6.1.** Ominaislämpökapasiteetti PCM:n lisäyksen suhteessa.

(Hunger M. et al. 2009)



**Kuva 6.2.** Terminen massa PCM:n lisäyksen suhteessa. (Hunger M. et al. 2009)

### Kemialliset ominaisuudet

1. Kemiallinen tasapaino
2. Sulamis-jähmettymiskierto palautuva ja kestävä
3. Palamaton, myrkytön, ei räjähdysaltis eikä korroosiota tuottava materiaali

Faasimuutosmateriaalin toiminta on varmistettava ennen sen sijoittamista rakenteisiin. Materiaalin toiminta ei saa heiketä jatkuvien sulamis-jähmettymissykliden aikana, eikä se myöskään saa aiheuttaa ympäröivälle rakenteelle vahinkoa. Useimmat faasimuutosmateriaalit kapseloidaan, jolloin ympäröivälle materiaalille ei aiheudu vaurioita ja rakenne on turvallinen ympäristölle.

### Taloudelliset seikat

1. Edulliset investointikustannukset
2. Elinkaarikustannukset
3. Saatavuus

Tutkimuksen lisääntyessä kaupallisten innovaatioiden määrä kasvaa, joka vaikuttaa faasimuutosmateriaalien saatavuuteen. Yleistymisen seurauksena myös materiaalien hinta laskee ja niiden soveltaminen rakentamisessa tulee edullisemmaksi. Lisäksi faasimuutosmateriaalit vaikuttavat rakentamisen energiankulutukseen, joka on ollut suurin tekijä näiden materiaalien kehityksessä. Yksi houkutteleva tekijä on myös faasimuutosmateriaalin tuoma rakennuksen käyttömukavuus.

## 6.4 Materiaalien jaottelu

### 6.4.1 Materiaalien jaottelu eri ryhmiin

Faasimuutosmateriaalit on jaoteltu orgaanisiin, epäorgaanisiin ja eutektisiin materiaaleihin. Pasupathy et al. vertaili tutkimuksessaan eri materiaalien ominaisuuksia, hyötyjä ja haittoja

### 6.4.2 Orgaaniset materiaalit

#### Parafiinit ( $C_n H_{(2n+2)}$ )

Kaupallisesti suurin käytetty materiaali, joissa on suuri valikoima tuotteita. Parafiinia käytetään yleensä kapseloituna esimerkiksi lasin, muovin tai grafiitin kanssa. Parafiinivaha syntyy raakaöljyn tislauksessa, jonka sivutuote on helposti syttyvää. Parafiinien lämmönjohtavuus on alhainen 0,2-0,6 W/(m K). Parafiineista on saatu kuitenkin käyttökelpoisia lisäaineilla

### Rasvahapot $CH_3[(CH)_2]_{2n}COOH$

Parafiineihin verrattuna rasvahapoilla on suuri sulamislämpö ja tähän ryhmään kuuluvat aineet käyttäytyvät koostumuksesta riippuen kaikki eri lailla toisin kuin parafiinit, jotka ovat suuri tasainen ryhmä. Rasvahapoilla on hyvä syklikestävyys eikä ne alijäähdy helposti. Lisäksi niillä on alhainen lämmönjohtavuus, ne syttyvät helposti ovat epästabii-leja korkeissa lämpötiloissa. Myrkyllisyys vaihtelee tuotteittain. Rasvahapot ovat myös kaksi kertaa kalliimpia, kuin parafiinit. Taulukossa 6.1 on esitetty orgaanisten materiaalien etuja ja haittoja.

**Taulukko 6.1.** Orgaanisten materiaalien edut ja haitat

Edut	Haitat
Saatavilla useilla lämpötila-alueilla	Alhainen lämmönjohtavuus kiinteässä muodossa
Vähän alijäähtymistä	Latentin lämmön varastointikyky on matala
Tasainen sulaminen	
Ei eriydy	Syttyvä, voidaan välttää oikealla teknisiä parafiineja
Kemiallisesti stabiileja	
Turvallisia käyttää	
Kierrätettäviä	

### 6.4.3 Epäorgaaniset materiaalit

#### Suolahydraatit ( $M_nH_2O$ )

Suolahydraatit omaavat suuren sulamislämmön ja ne ovat halvempia kuin orgaaniset PCM-materiaalit. Lisäksi niiden lämmönjohtavuus on hyvä, jolloin lämpö siirtyy hyvin PCM-materiaalin ja ympäristön välillä. Tilavuudenmuutos on myös pienempää, kuin orgaanisilla materiaaleilla, joten lämmön varastoinnin suunnittelu on helpompaa. (Sharma et al. 2009)

Suolahydraattien heikkoutena on todettu taipumus epäyhdenmukaiseen sulamiseen. Suolahydraateissa esiintyy erottumista nestemäisen ja kiinteän aineen erilaisten tiheyksien vuoksi. Toinen heikkous on taipumus alijäähtymiseen, jolloin ne vaativat katalyytin kiteytymiseksi. Yleensä ne vaativat lisäaineita pitkäaikaiskestävyyden takaamiseksi.

Taulukossa 6.2 on esitetty epäorgaanisten materiaalien etuja ja haittoja.

**Taulukko 6.2.** Epäorgaanisten materiaalien edut ja haitat

<b>Edut</b>	<b>Haitat</b>
Kierrätettäviä	Korkea lämmön varastointikyky
Halpoja ja helposti saatavilla	Epästabiileja
Tarkka sulamispiste	Tarvitsevat lisäaineita
Korkea lämmönjohtavuus	Alijäähdyminen
Korkea sulamislämpö	
Tilavuudenmuutos on pieni	
Palamattomia	

### 6.4.4 Eutektiset materiaalit

Eutektiset materiaalit koostuvat useammasta aineesta, jolloin niiden ominaisuudet saadaan vastaamaan tarkoitettua käyttöä. Materiaalien ominaisuudet riippuvat niihin valittujen aineiden ominaisuuksista, joten yhtenevää kuvaavaa tekijää ei ole. Taulukossa 6.3 on esitetty eutektisten materiaalien edut ja haitat. Materiaaleissa voi olla kolme yhdistelmää:

1. Epäorgaaninen-epäorgaaninen
2. Epäorgaaninen-orgaaninen
3. Orgaaninen-orgaaninen

**Taulukko 6.3.** Eutektisten aineiden edut ja haitat

<b>Edut</b>	<b>Haitat</b>
Tarkka sulamispiste	Vain hieman tutkittua tietoa tarjolla
Orgaanisia aineita hieman parempi lämmönvarastointikyky	

Tutkimuksessa todetut tärkeimmät faasimuutosmateriaalien edut ja haitat on koottu taulukkoihin 6.1, 6.2 ja 6.3. On huomattava, että osa haitoista on eliminoitu tuotekehityksessä ja lisäaineilla, joten taulukko on vain suuntaa antava. Materiaalivalinnassa jonkinlaisesta jaottelusta on kuitenkin hyötyä.

### ***Metalliset yhdisteet***

Metalliset materiaalit ovat metallia sisältäviä eutektisia seoksia ja matalassa lämpötilassa sulavia metalleja. Metallisten PCM-materiaalien lämmönjohtavuus olisi huomattavasti suurempi muihin materiaaleihin verrattuna, mutta käyttöä rajoittaa niiden suuri massa.

## 6.5 Esimerkkejä tutkituista faasimuutosmateriaaleista

**Taulukko 6.4.** Faasimuutosmateriaaleja, joita on käytetty kapseloituna rakennusmateriaaleissa (Tyagi et al, 2011)

PCM kJ/kg	Muutospiste (°C)	Sulamislämpö
CaCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	24-29	192
CaCl · 6H <sub>2</sub> O+Nucleator+MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	23	-
Hexadecane	18	236
	18	205
Heptadecane	18	214
Octadecane	22	244
Black parafin	25-30	150
Emerest 2325 (butyl stearate+butyl palmitate 49/48)	17-21	138-140
Emerest 2326 ((butyl stearate+butyl palmitate 50/48 )	18-22	140
Butyl stearate	19	140
1-Dodecanol	26	200
Capric-lauric 45/55	21	143
Capric-lauric 61.5/38.5)	19.1	132
Capric-myristic 73.5/26.5	21.4	152
Capric-palmitate 75.2/24.8	22.1	153
Capric-stearate 86.6/13.4	26.8	160
Peg1000+Peg600	23-26	150.5
Propyl palmitate	19	186

### 6.5.1 Mikro kapselit

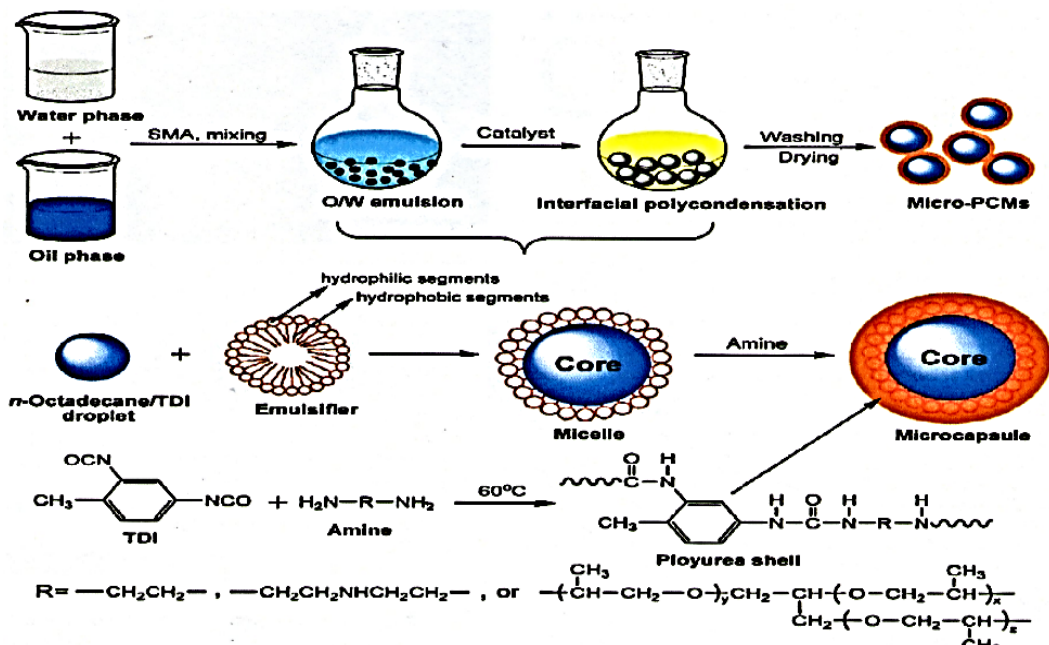
Materiaalien olomuotovaihtelusta johtuen on keksitty mikrokapselointi, joka jakaa varsinaisen faasimuutosmateriaalin pieniin osiin ja estää lämpövaihtelun aiheuttamat muutokset varsinaisessa rakenteessa. Kapselointi toimii myös suojaavana kuorena, kun faasimuutosaine on vahingollista sekä materiaaleille että ihmisille. Kapselointi myös helpottaa aineen käsittelyä ja varastointia.

Mikrokapselit voidaan myös valmistaa muotoon, joka soveltuu sekoitettavaksi suoraan rakennusaineeseen esim. sementtilaastiin tai suuremmiksi partikkeleiksi, joita voidaan säilöä erilaisiin koteloihin.

Mikrokapselimuotoina voi olla yksittäinen kuorikapseli, kuori jonka sisällä on monta kapselia(ydintä) tai matriisikapseli, jossa ydinmateriaali on jakautunut tasaisesti kuoren sisällä. Taulukossa 6.5 on erilaisia kapselien valmistustapoja ja kuvassa 6.1 on esimerkki kapselin valmistuksesta.

**Taulukko 6.5.** Kapselien valmistustapoja, (Tyagi et al., 2011)

Fyysiset metodit	Kemialliset metodit
Peltikapselointi	Rajapintapolymerointi
Sumutuskuivaus	Paikalla polymerointi
Keskipakoisvoimainen suulakepäällystys	Matriisipolymerointi
Paineilmakuoritus	



**Kuva 6.1.** Esimerkki kapselin valmistuksesta (Tyagi et al., 2011)

**Taulukko 6.6.** Yhteenveto tärkeimmistä PCM-valmistajista .(Paramehwaran,Kalaisevan et al. 2011)

Valmistajavaihtoehtoja	PCM lämpötilan vaihteluväli	Eri PCM-vaihtoehdot
Rubitherm	-3-+100	29
Cristopia	-33-+78	12
TEAP	-50-+78	22
Doerken	-22-+28	2
Mitsubishi Chemicals	+9.5-+118	6
Climator	-18-+17	9
EPS Ltd	-114-164	61

## 6.6 Rakenneratkaisut ja käyttösovellukset

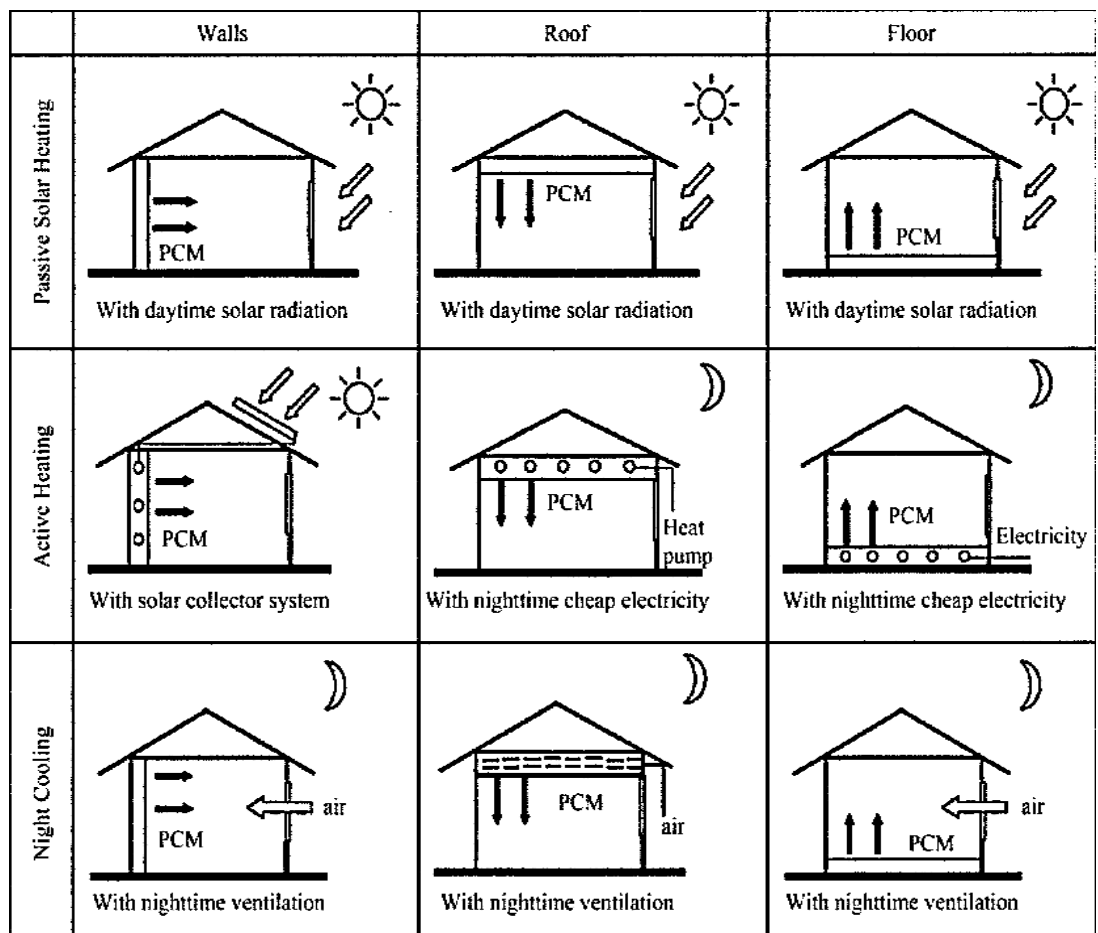
### 6.6.1 Rakenneratkaisut, yleistä

Rakennuskohteisiin on kehitetty erilaisia faasimuutosmateriaaleja sisältäviä levyjä, joihin voidaan varastoida lämpöenergiaa. Aurinkoenergiaseinä, joka imee itseensä aurinkoenergiaa pitäen sisätilan viileänä ja päinvastoin, luovuttaa energiaa tarvittaessa tilojen lämmitykseen. Kuvassa 6.2 on diffuusiotiiviiseen kuoreen pakattuja levyjä, joilla voidaan tasata huoneen lämpötilaa esimerkiksi toimistorakennuksissa.

PCM-materiaalia voidaan käyttää tasaamaan eri energiamuotojen tuottamaa lämpöä niin, että ylimääräinen lämpö voidaan varastoida ja käyttää esim. PCM-materiaalin sulattamiseen, jolloin se yöllä jäähtyessään luovuttaa lämpöä. Materiaaliin voidaan asentaa myös viilennysputkia, joilla varmistetaan PCM:n sulamis-jäähtymissykli. Kuvassa 6.3 esitetään PCM-materiaalien käyttökohteita.



**Kuva 6.2.** Delta-Cool 24, sijoitettuna kattorakenteisiin



**Kuva 6.3.** PCM:n sijoittelu (Rao et al. 2012)

Vaihtoehtona on kokeiltu PCM- kapselien suoraa sijoittamista esim. kipsilevy- tai betoniseinäin sekä seinissä käytettäviin tasoitteisiin. Sijoittelun lähtökohtana on ollut

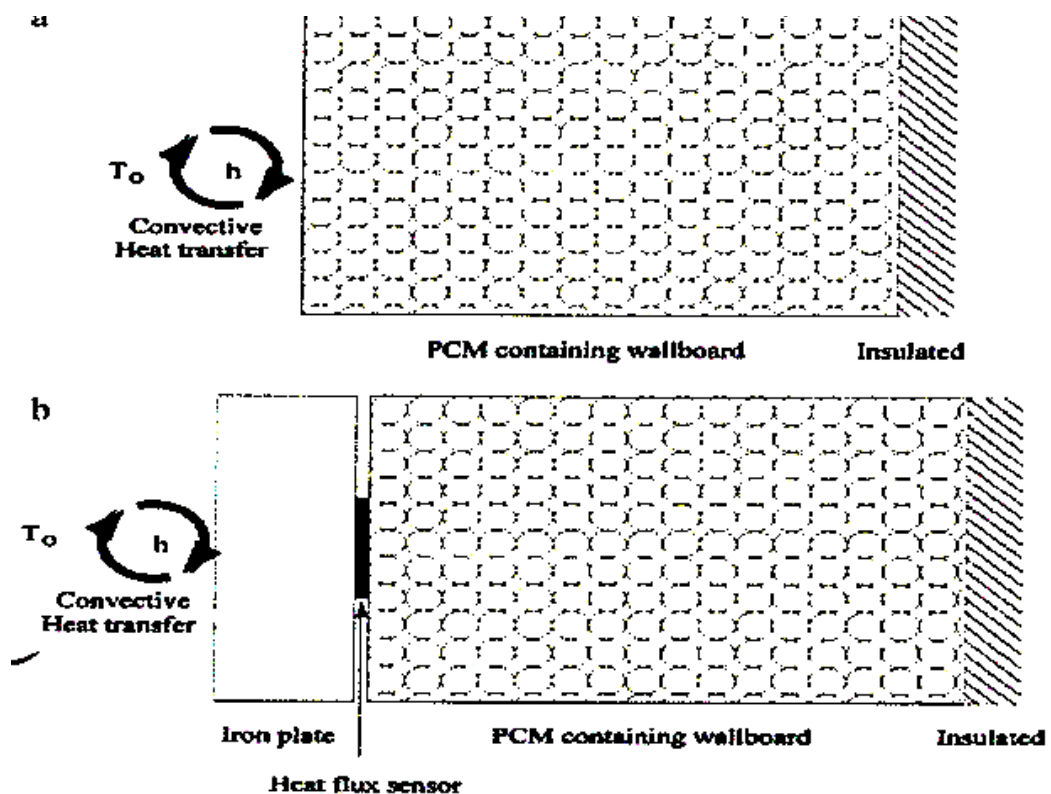
PCM- materiaalin kestävyuden varmistaminen rakennustuotteissa ja niiden sulamis-jäähdytys-syklin kestävyys.

## 6.6.2 PCM kipsilevyseinässä

Tutkimuksessa vuodelta 2001 (J.Koo et al.) koehuoneeseen asennettiin PCM-materiaalia sisältäviä kipsilevyjä.(Knauf) Lämmön siirtymisen mittaamiseen käytettiin differentiaalikalorimetriä (DSC-Q1000, TA Instrument). Lämpötilavaihtelu oli asetettu välille 243K-343K, jossa lämpötila nousi 10K/min. Kuvassa 6.4 on esitetty mittauksen suoritus. Koetilanne simuloitiin laskennallisesti saatuihin arvoihin nähden. Muissa aikaisemmissa tutkimuksissa lämmönsiirron arvoina on käytetty tyypillisesti arvoa 6-9 W/m<sup>2</sup>K, mutta tässä tutkimuksessa lämmönsiirron arvona käytettiin 12 W/m<sup>2</sup>K, koska koehuoneen lämpötilaa voitiin säädellä tehokkaasti.

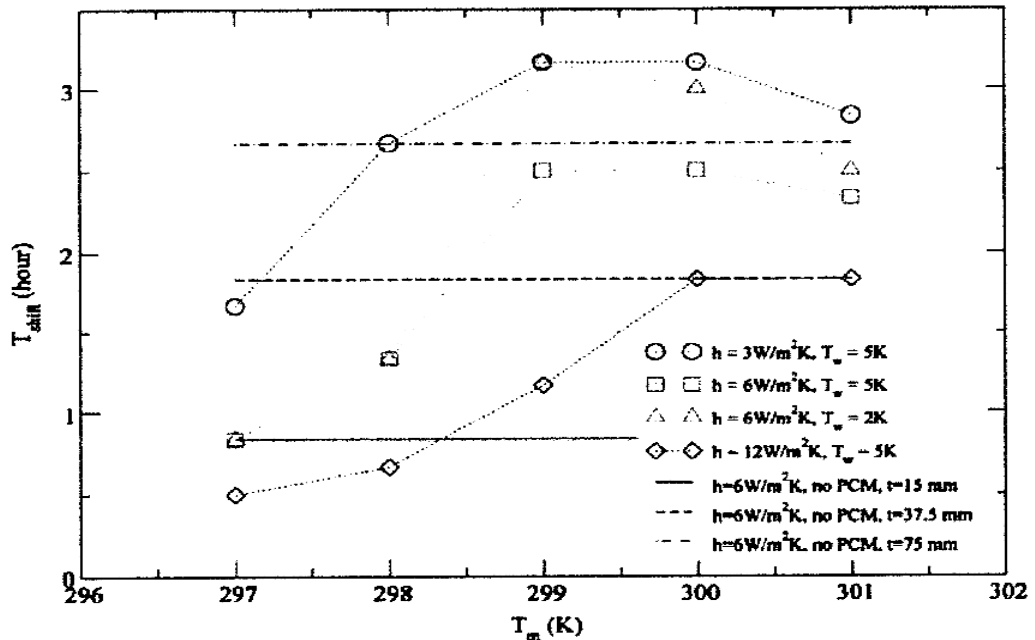
Kipsilevyn ilmoitetut ominaisuudet:

Base material:	Gypsum, PCM
Nominal phase change temperature	299K
Latent heat	28,7 kJ/kg
Specific heat	1,2 kJ/kg
Dimension(height*width*thickness	600 mm*400 mm*15 mm
Thermal conductivity	0,134W/m K



Kuva 6.4. Kipsilevyseinän mittausjärjestelyt ( J. Koo et al., 2011)

Kokeen tuloksena on todettu, että latentin lämmön varastointi seinään toteutuu tehokkaimmin silloin, kun huoneen lämpötila on suunnilleen sama, kuin PCM faasimuutoslämpötila. Kuvasta 6.5 näkee, että vertailussa 15 mm PCM-kipsilevyseinä vastaa lämmönvarastointikyvyltään 75 mm paksua seinää ilman PCM-materiaalia.



Kuva 6.5. Lämmönsiirron vaikutukset ajan funktiona (J.Koo et al, 2011)

### 6.6.3 Käyttö passiivienergiataloissa

Passiivienergiataloissa voidaan yhdistää PCM-entalpialämpö ja rakennuksen lämpöä keräävät massivirakenteet niin, että lämpö pysyy tasaisena ja aika, jolloin tarvitaan ylimääräistä energiaa viilennykseen tai lämmitykseen vähenee kolmen kohdan TES-rakenteella. (Hoes et al. 2011). Taulukossa 6.7 esitetään eri materiaalien käyttöön vaikuttavat tekijät.

Kolmen kohdan TES-rakenne,

1. Normaali energian talteenotto ja luovutus
2. Entalpia, jolloin energia varautuu PCM-materiaaliin
3. Kemikaalinen varastointi ja PCM-materiaalit ulkoisen energian varastointiin.

TES-systeemiä on kokeiltu mm. Zonne-projektissa Hollannissa.

Muita kohteita:

Town house, Stevenage (London) ClimSel

Hall in Bangalore,

Peippo, Madison, 1991

Mehling ja Hiebler, 2004, framework, International Energy Agency Program

**Taulukko 6.7.** PCM-materiaalin käyttöön vaikuttavat tekijät (Hoes et al. 2011)

Kohde	Tyyppi	Materiaali	Muutos- lämpötila	Lämmön- lähde	Muuta
Seinät	Mikrokapseli	Epäorgaaninen	$T < 21^{\circ}\text{C}$ $21^{\circ} \leq T < 24^{\circ}\text{C}$	Epäsuora aurin- kolämmitys	
Katto	Suulakepääl- lystys	Eutektinen	$24^{\circ} \leq T \leq 28^{\circ}\text{C}$	Sisälämmön tal- teenotto	Yöaikainen ilmastointi
Ikkunat	Stabiloitu		$28^{\circ} < T \leq 60^{\circ}\text{C}$	Aurinko(lämmin vesi)	Jäähdytys pattereilla
Huoneka- lut			$T > 60^{\circ}\text{C}$	Aurinkopaneeli PV/T(lämmin ilma)	Haihdotus

### 6.6.4 Tasoitteiden käyttäminen lämmityksessä ja viilennyksessä

Latent heat energy storage (LHES), sijoittamalla rakennuksen massaan sopiva materiaali energian talteenottoa varten ja lämmön tasaamiseksi säästää käytettävän suoran energian määrää.

Materiaalina voisi olla esim. lattiassa kipsi-sementti-kevytbetoni/laasti, johon on sijoitettu kierrätyslasista tehtyjä parafiinilla täytettyjä kapseleita. Laastiratkaisua voisi käyttää myös seinissä ja katossa, jolloin lämpöä varastoivia ja tasaavia pintoja olisi useita. Yleensä on valmistettu erilaisia levyjä, joihin PCM-materiaali sijoitetaan.

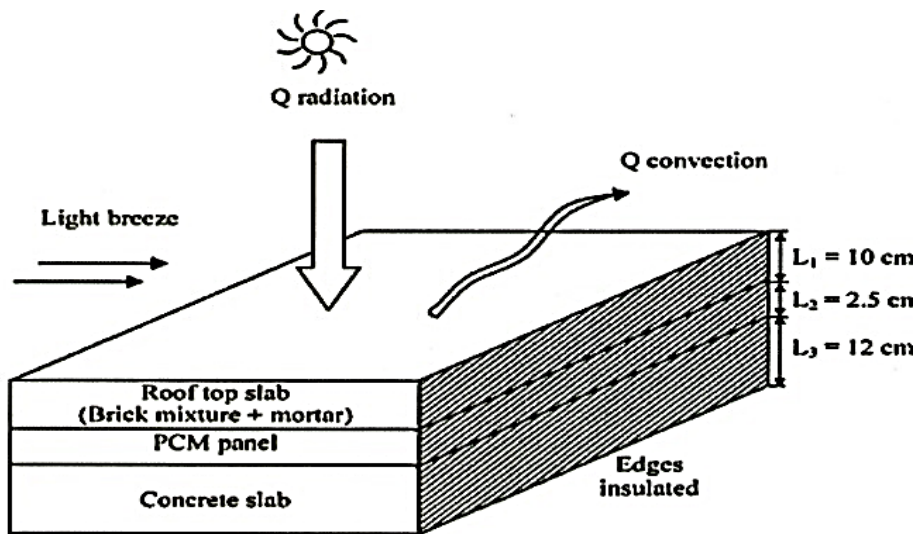
PCM-materiaalia voidaan sijoittaa suoraan materiaaliin tai kapseleina. PCM-materiaalin sijoittamista rakennuksen seinärakenteeseen (PCM integration in building walls, PCMIW) koskevat tutkimukset ovat lisääntyneet viime vuosina huomattavasti.

Rakennuksessa lämpöä voi siirtyä pinnan ja ilman välisellä konvektiolla sekä lyhyt- ja pitkäaaltoisena säteilynä. Rakenteen sisällä lämmön siirtyminen tapahtuu johtamalla, jolloin materiaalilla tulee olla hyvä lämmönjohtavuus. TES-järjestelmän tehtävä on vähentää lämpötilan vaihtelua ja viivyttää ilman lämpötilan jäähtymistä.

Lämmön säätelyssä tulee myös ottaa huomioon seinän eristeiden sijoittelu. Sisäilman lämmityksen kannalta on parempi, jos terminen massa esim. seinässä on eristeen sisäpuolella, kuin että massa sijoitetaan eristeen ulkopuolelle, jolloin lämmön siirtyminen estyy.

Rakennuksen ulkovuorauksessa käytettävä rappauslaasti voi sisältää PCM-materiaalia, jolloin rakennuksen sisäinen lämpörasitus vähenee.

Pasupathy ja Velraj (2008) tutkivat katolle rakenteiden väliin asennettuja PCM-paneeleita, joiden toiminta esitetään kuvassa 6.6. Lämpörasitus rakennuksessa väheni 39% verrattuna testirakenteeseen ilman PCM-materiaalia. (Paramehwaran, Kalaisevan etc., 2011)



**Kuva 6.6.** Kattorakenteisiin sijoitettu PCM-materiaali, Pasupathy ja Velraj (2008)

Nanoteknologian käyttö PCM- materiaaleissa käyttäen polymerisaatiotekniikkaa. (Fang etc. 2008) parantaa lämmönvarauskykyä.

PCM:n käyttöä vähentämään rakenteen jäätymisestä johtuvia vaurioita on tutkittu, jolloin PCM on sijoitettu siltojen jäätymisalttiiseen betoniin tai tasoitteeseen. Betonin puristuslujuus väheni, mutta siltojen huoltoväli saatiin pidennetyksi vähintään vuodella vähentyneiden jäätymisvaurioiden takia. ( Bentz et al 2007; Sakulich 2012)

Kaupallisia tuotteita on jo kiitettävästi markkinoilla, mutta Suomessa ne ovat vasta kehitteillä. Kuvassa 6.7 on Maxit-Weberin kehittämällä Clima 26- tasoitteella toteutettu toimistorakennus.



**Kuva 6.7.** PCM-laastilla viimeistelty toimistorakennus Saksassa ( Maxit Weber)

Levytuotteita on markkinoilla ainakin Knauffilla ja Eco Building Boards-yhtiöllä. Knauffilla PCM- materiaalia sisältävät mikrokapselit on sijoitettu suoraan kipsilevyyn. Valmistus ei paljoa eroa normaalin kipsilevyn valmistuksesta ja tutkimuksen (Koo et al. 2011 ) mukaan levyjen valmistus on kannattavaa. Kipsilevy ja tasoitelaasti ovat lähinnä niitä tuotteita, joita voidaan kehittää tarjottavaksi suoraan kuluttajille.

*A world first! – Patent applied for.*

**Eco Building Boards™ PCM STORAGE ELEMENT**  
 Dimension: 22 mm; 125,0 x 62,5 cm

**Temperature control in the winter**  
 The combination of clay and carbon technologies has revolutionised heating technology. The Eco Building Boards™ PCM Storage Element can be directly supplied with energy exactly at the time it is available by the use of photo-voltaic units or micro-turbines (solar, wind). The PCM Storage Element is self-regulating and reacts to a dropping room temperature by slowly releasing the stored thermal energy.

**Kuva 6.8.** Seinään ja kattoon sijoitetut levyt sisältävät PCM-materiaalia.

(Eco Building Boards)

## 6.7 Faasimuutosmateriaalia sisältävien rakenteiden kokeet

Taulukossa 6.8 on mainittu muutamia PCM-materiaaleilla tehtyjä kokeita. Z. Rao et al.(2012) listasivat 40 tutkimusta, joissa käsiteltiin PCM- materiaalin käyttöä rakennuksen lämmön varastoinnissa ja säätelyssä. Tutkimuksissa on pyritty selvittämään PCM-materiaalin sijoittelun vaikutusta rakennuksen energiankäyttöön ja käyttömukavuuteen. Parhaiten toimivalla PCM-seinällä on suuri lämmönjohtavuus ja rajaton latenttienergia-kapasiteetti tietyssä lämpötilassa  $T_m$ .

**Taulukko 6.8.** Eri tutkimuksissa tehtyjä havaintoja ja huomioita.

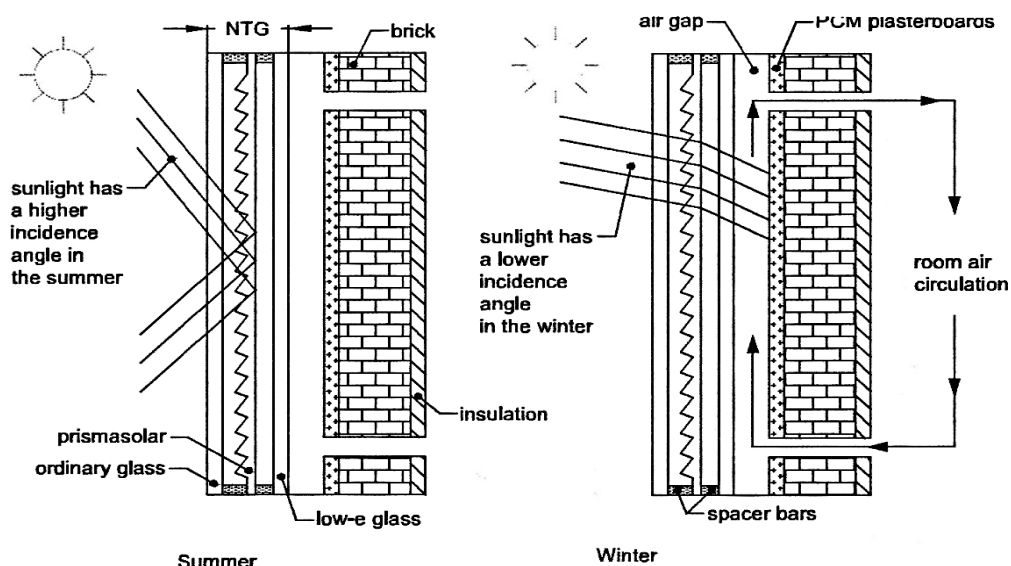
Tutkimus	Rakenne	Toiminta- alue	Johtopäätökset
Pasupathy et al, 2008	Kattora- kenne	26-28 °C	Lämpötila 4 astetta korkeampi, kuin ilman PCM-materiaalia
Nagano et al, 2006	Lattia	17-22 °C	89 % viilennystarpeesta voitiin varastoida PCM-paneeleihin
Farid M et al, 2001	Alapohja	$T_m$ n. 28 °C	Pintalämpötila pysyi tasaisena, kokonaislämpö pysyi tasaisena vain 8:n tunnin lämmityksellä
Ahmad et al, 2006	Seinä	$T_m$ 21-25 °C	Huomattava parannus sisälämpötilan vaihtelun tasaamisessa
Zhang et al, 2007	Seinä		Energiantarve viilennyksessä vähentyi 8,6 % ja 10,8 %, PCM pitoisuus 10 % ja 20 %
Zhou et al, 2007	Seinä ja katto	$T_m$ 21-25 °C	Säästi 47 % energiassa normaaliin verrattuna huippukulutuksesta ja 12 % kokonaiskulutuksesta Pekingissä
Va Sa et al , 2012	Laasti	$T_m$ 23-25 °C	Kokeet 25 % ja 50 % PCM

## 6.7.1 Trombe wall

Lämmön keräämiseen ja varastointiin ulkoseinissä on kehitelty muutamia sovelluksia. Massiivisen seinän toimintaa jäljittelevät sovellukset, kuten trombe wall ja toinen vastaavanlainen solar wall ovat yleisimmin tunnetut passiivisen lämmityksen sovellukset ulkoseinillä.

Trombe wall koostuu massiivisesta ulkoseinästä, joka voi myös sisältää PCM- materiaalia, sekä sen ulkopuolella sijaitsevasta pleksistä tai lasista. Massiiviseinä on tutkimuksissa korvattu myös lämmönvarastointiin tarkoitetuilla seinän sisään sijoitetuilla tankeilla.

Seinän ja lasituksen väliin jää noin 10 cm leveä ilmarako. Massiiviseinä absorboi auringon lämpöä ja vastaavasti lasi- tai pleksi estää jo absorboituneen lämmön siirtymistä takaisin ulkoilmaan. Rakennuksen sisäilman lämpötilan laskiessa seinässä oleva lämpö siirtyy johtumalla seinän sisäosiin, josta se siirtyy säteilemällä ja konvektiolla huoneeseen. Lämmön siirtymistä voidaan nopeuttaa kiertämällä ilmarakossa ilmaa koneellisesti. Trombe wall ei seinän eristävyys kannalta ole ilman kehitystä Suomen ilmastoon soveltuva. Kuvassa 6.9 on esitetty trombe-seinän toimintaperiaate.



**Kuva 6.9.** Trombe-seinän toimintaperiaate kesällä ja talvella. (Kara & Kurnuc 2012)

Kara & Kurnuc tutkivat taloon sijoitetun PCM- seinän toimivuutta. Tavoitteena oli kiinnittää huomiota seinän puutteisiin lämmön varastoinnissa. Testihuoneeseen käytettiin kahta sulamispisteiltään erilaista PCM- materiaalia, Rubitherm GR35 ja GR41, joiden sulamispisteen vaihteluväli oli 13-41°C ja 13-51°C. GR41 tuotti lämpimämpää ilmaa kuin GR35.

Seinässä käytettiin kolmilasista selektiivi-ikkunaa, jonka tarkoituksena oli vähentää lämpöhukkaa talvella ja pienentää auringon lämpövaikutusta kesällä. Lisäksi testihuoneet varustettiin lämmittimillä, jotka pitivät huoneen lämmön tasaisessa 20°C

lämpötilassa siinä tapauksessa, että seinän lämpötuotto ei riitä tilojen lämmittämiseen. PCM- seinä katsottiin kokeessa toissijaiseksi lämmönlähteeksi. Kyseinen järjestely voisi toimia myös Suomessa. Kuvasta 7.0 nähdään testihuoneet rakennettuna.



**Kuva 6.10.** Turkin, Erzurumin testihuoneet, joihin on asennettu kolmilasiset selektiivi-ikkunat, Kara & Kurnuc (2012)

Testihuoneen tuloksena mitattiin PCM- materiaalien tehokkuutta eri vuoden- ja vuorokaudenaikoina. Lämmitystehokkuus oli yllättävästi parempi matalammilla varastointilämpötiloilla, koska myös lämpöhukka oli silloin pienempi. Testissä kiinnitettiin huomiota myös seinän sijoitteluun ja kokoon, joka vaikuttaa energiansaantiin, myös lämmön säätely kaipasi uusia innovaatioita. Yksi hyvistä keinoista on asentaa huoneen seinän sisäpintaan ja kattoon PCM- kipsilevyt, jotka tasaavat seinästä saatavan lämmön vaihteluväliä.

### 6.7.2 Solar wall

Solar wall- periaate on kerätä seinään auringonsäteilyä lämpöenergiaa, kuitenkin niin, että lämpöhäviö ulkoilmaan takaisin rajoitetaan samoin kuin trombe wall-järjestelmässä. Auringonsäteily absorboituu perinteiseen massiiviseen tai kevyeen PCM- materiaalia sisältävään seinään. Valoa läpäisevä lämmöneriste on tehokkaampi, kuin lasitus seinän ulkopuolella. Lämpötehon ollessa riittävän suuri, kääntyy lämpövirta seinästä sisälle päin. Seinää voidaan käyttää rakennuksen passiiviseen lämmitykseen.

Aurinkoenergian ja PCM- materiaalien käyttöä lämmityksessä on arvioitu suuressa mittakaavassa kansainvälisessä kilpailussa American Solar Decathlon, jonka järjesti U.S. Department of Energy. Tapahtuma järjestettiin Washingtonissa. Kilpailussa jokainen yliopistotiimi kehitti talon, joka on helppo tuoda paikalle ja rakentuu viikossa. Sivutuotteena on kehitetty pitkälle tuotteistettuja, kevyitä taloja. Aurinkoenergian talteenottoa on tutkittu useissa tutkimuksissa. Aurinkoenergiaa voidaan tallentaa PCM- materiaaliin suoraan tai erityisesti keräämällä lämpöä ja siirtämällä sitä materiaaliin esim. putkiston

avulla. Peippo et al (1991) tutkivat ns. aurinkoenergiataloa Madisonissa, Wisconsinissa Loppupäätelmissä todettiin optimaalisen lämmön talteenoton olevan silloin, kun sulamislämpö on 1-3°C huoneenlämpöä ylempi.

Washingtonissa voi olla suuri vuorokautinen lämpötilanvaihtelu, joka tuo haastavuutta talojen lämmitykseen ja viilentämiseen.

### 6.7.3 Muut koejärjestelyt

Koerakennuksia on käytetty mm. Cabezan et al. (2007) tutkimuksessa Välimeren olosuhteissa. Tutkimuksessa käytettiin Micronal®PCM (BASF) mikrokapseleita, joiden sulamispiste on 26°C ja sulamislämpö 110 kJ/kg. Käytetyn PCM-betonin puristuslujuus on 28 vuorokauden iässä ollut 25MPa ja vetolujuus 6MPa, jotka täyttävät normaalin kantavan rakenteen lujuusarvot.

Tutkimuksessa käytettiin kahta kuution muotoista koerakennusta, joista toisessa käytettiin etelä- ja länsiseinällä sekä katossa viisiprocenttista PCM-betonia. Toinen rakennus tehtiin normaalista betonista vertailukohteeksi. Rakennukset olivat eristämättömiä ja seinän paksuus oli 120mm. Molemmissa rakennuksissa oli myös ikkunoita. Lämpötilanturit asennettiin seinien sisäpintoihin.

Tutkimuksen tulokset vahvistivat, että PCM-materiaalilla voidaan lisätä massiivisen betonirakenteen lämmönvarastointia. Rakennuksessa saatiin toimimaan lämmönsiirtoväline, joka on PCM-materiaaleille ominaista.

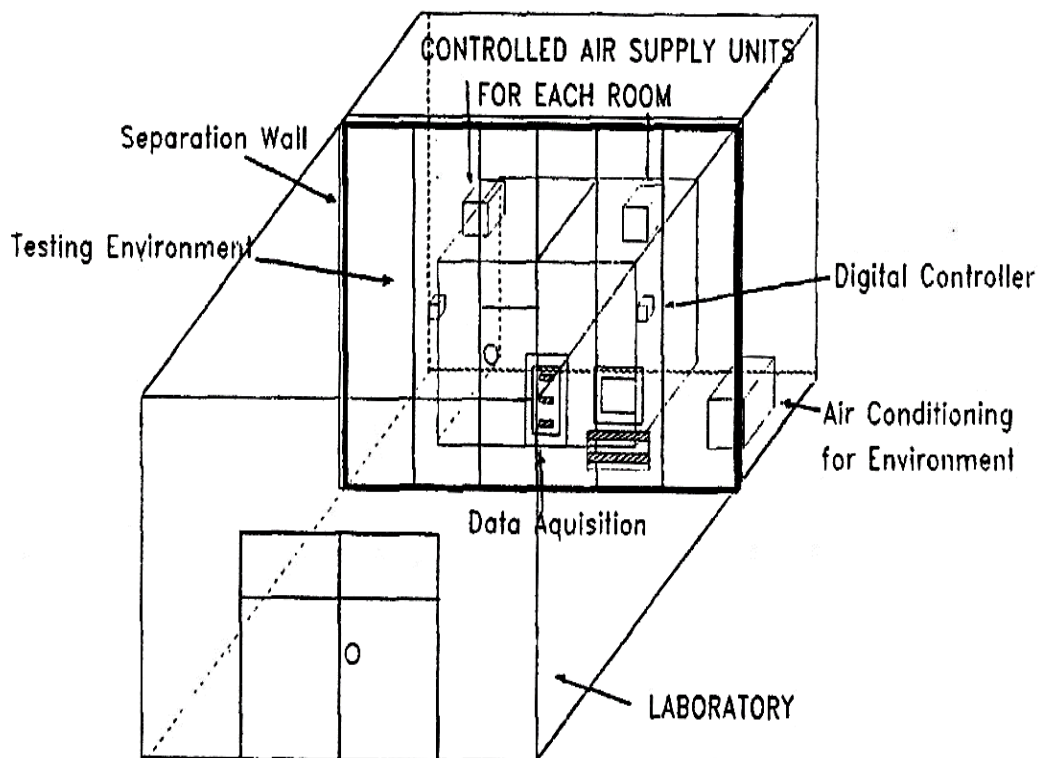
Samanlaisia tutkimuksia koetaloilla on tehty myös mm. Kanadassa ja Yhdysvalloissa.

Scalat et al. (1996) tutkivat PCM- materiaalin toimivuutta seinärakenteessa. Tutkimus toteutettiin täysimittaisilla koehuoneilla, joiden pinta-ala oli n. 5m<sup>2</sup> ja korkeus 2,45 m. Ohessa kuva 6.11 koejärjestelyistä, jossa sisäseinät ja katto tehtiin toiseen huoneeseen normaalista kipsilevystä ja toiseen huoneeseen käytettiin PCM- kipsilevyä. Seinän rakenteena oli sisäpuolella kipsilevy, sen jälkeen puurunko 38\*63 mm, ulkopuolella 12,5 mm vaneri. Lämpöeristeenä käytettiin lasivillaa.

Huoneisiin sijoitettiin ilmastointiyksiköt ja mittalaitteistot. Mittauspisteitä oli yhteensä 70, huoneiden ulko- ja sisäpinnassa sekä ulkolämpötilan mittaamiseen ja säätämiseen. Testihuoneet sijoitettiin erilliseen tilaan, jossa voitiin määritellä testauksessa käytettävät ympäröivän ilman lämpötilat.

Kahdella koehuoneella tutkittiin neljää eri ominaisuutta.

1. Latentin energian varastointia oikeassa ympäristössä
2. PCM- materiaalia sisältävän seinän termistä käyttäytymistä verrattuna tavalliseen kipsiseinään
3. PCM- seinän asentamisen vaikutukset
4. Ilmanlaatu huoneessa, jossa on PCM- seinä



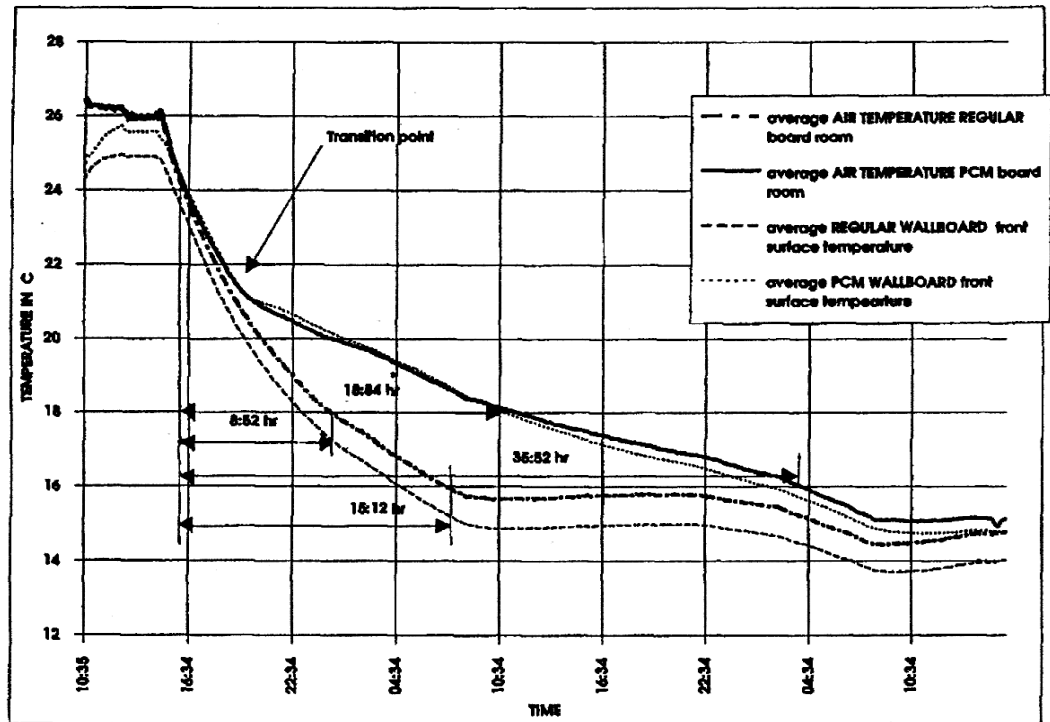
**Kuva 6.11.** Kanadan koehuone, Scalat et al. (1996)

Lämmön varastoinnilla pyritään eliminoimaan tai siirtämään ylimääräinen lämpö ajan-kohtaan, jolloin sitä todella tarvitaan. NykYTEKNIKALLA voidaan säädellä lämpötilaa ja energian käyttöä tarpeen mukaisesti. (TES)

Halvan energian varastointi voidaan toteuttaa PCM- materiaaleilla hallitusti, jolloin nekin energiamuodot, joita ei yleensä käytetä, voidaan ottaa käyttöön. Näitä ovat esim. oleskelijoista tullut lämpö sekä erilaisista koneista ja laitteista tullut lämpö. Samoin voidaan huomioida esim. prosesseista ja ilmastoinnista tullut lämpö. Koko talon kattava tutkimus on vaikea toteuttaa. Bangaloren testitalossa toteutettiin ilmastointi PCM- materiaalia sisältävillä laattarakenteilla

Kahden huoneen tutkimuksessa vertailtiin tavallisella kipsilevyllä vuorattua huonetta ja PCM- kipsilevyllä vuorattua huonetta. Pintoihin asennettiin testiantureita, joilla saatiin tietokoneen avulla analysoiduksi pintojen lämpövaihteluita. Edellisistä tutkimuksista on käynyt ilmi, että PCM: n pienempi aloitus-lopetus-sykli tuottaa paremman energiatehokkuuden.

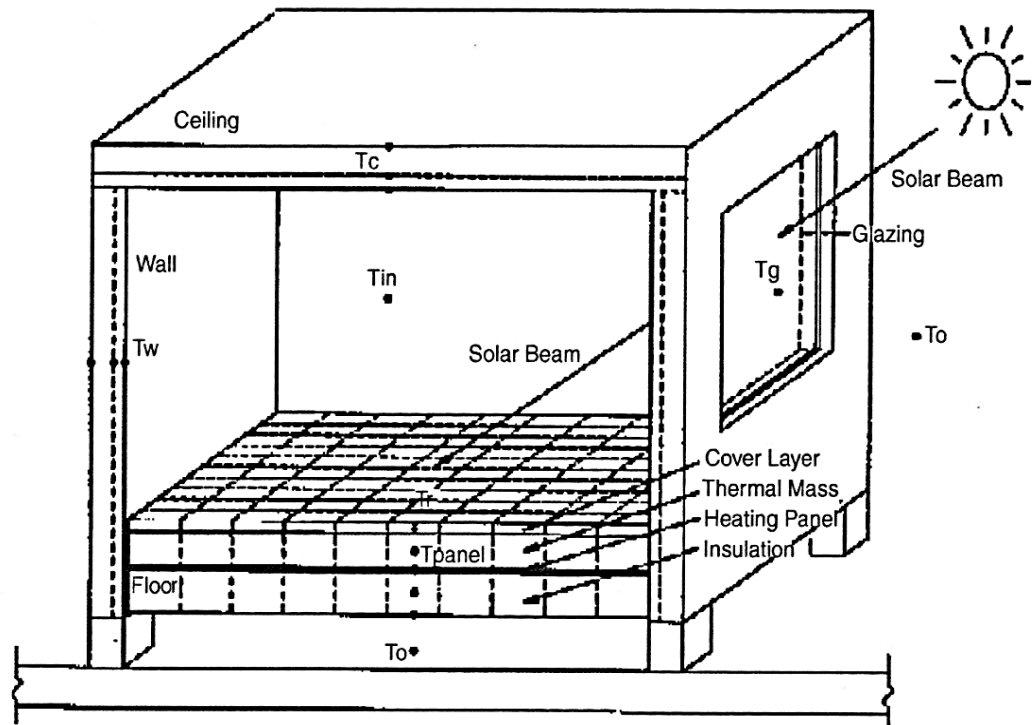
Kohteessa käytetty PCM oli butyylistearaatin (50 %) ja butyyliipalmitaatin (50 %) seos, joka valmistetaan uudistuvista materiaaleista ja jonka ominaisuudet eivät muutu kipsilevyseinässä. Kipsilevyn valmistustapa ei myöskään sanottavasti muutu PCM: n lisäämisen johdosta.



Kuva 6.12. Jäähtymisajan muutos, Scalat et al. (1996)

Kuvasta 6.12 näkyy, kuinka PCM vaikuttaa lämpötilaan jähmettyessään. PCM-materiaali pidentää jäähtymisaikaa. Huoneen lämpötilan lasku 16°C kesti normaalisella 15,1 tuntia, kun taas PCM-seinällä 35,5 tuntia. Samoin toisinpäin, huoneen lämpötilan nosto minimi 18°C:een kestää PCM-materiaalilla pidempään, kuin normaalisella.

PCM-seinälevyt testattiin myös haihtuvien orgaanisten yhdisteiden osalta. Testeissä ei näkynyt mitään muutosta normaalisena nähden. Pitoisuudet alittivat ASHRAE-vaatimukset. Testeistä selvisi, että PCM-seinä auttaa pitämään huoneen lämpötilan pidempään asetetulla minimitasolla, valmistus ei paljoa poikkea normaalista levyvalmistuksesta. Samankaltaisia testituloksia on saatu muistakin tutkimuksista (Rudd, 1993; ja Kissock et al., 1998). Lisäksi on tehty kokeellisia mittauksia tietokonepohjaisesti, joissa on mitattu seinän toimivuutta lämmönsiirtokertoimilla 5,67 ja 8,3 W/m<sup>2</sup>°C.



**Kuva 6.13.** Testihuone , Tyagi et al.(2005)

Tulosten perusteella maksimimäärä energiaa varastoituu silloin, kun huonelämpötila pysyy vaihteluvälissä ja seinän lämpötila pysyy lähellä sulamispistettä.

Samoihin johtopäätöksiin ovat päässeet tutkimuksissaan myös Benz et al.(2007) sekä ja Fang X. et al.(2005 )

Parhaiten toimivalla PCM-seinällä on suuri lämmönjohtavuus ja rajaton latenttienergiakapasiteetti tietyssä lämpötilassa  $T_m$ . Pinnan lämmönvastuksen vaikutus on suuri lämmönsiirtymisen kannalta, vaikka PCM-materiaalin lämmönjohtavuus olisikin hyvä.

Ero on suuri sinikäyräisen jatkuvan,

$$\text{kaava} \quad Q_{sin}(\max) = \frac{hPT_a}{\pi}, \quad (6.34)$$

ja suoran jatkuvan lämpötilalaskennan välillä. Suoran laskennan avulla saadaan 1,6-kertaiset arvot lämpökapasiteetille.

Numeroarvoilla: Huonelämpötilan vaihtelu on ollut 5,55 °C ja lämmön siirtyminen välillä 5,67-8,3 W/m<sup>2</sup>K.

$$\text{Kaavasta} \quad Q_{sqr}(\max) = \frac{hPT_a}{2}, \quad (6.35)$$

saadaan päivittäiseksi varastointimääräksi 633-995 kJ/m<sup>2</sup>. Arvot ovat noin kaksinkertaiset kokeissa saatuihin tuloksiin verrattuna. Sinikäyräisen laskennan tuloksena saatiin

433-633 kJ/m<sup>2</sup>. Aikaisemmissa kokeissa on seinän lämmönvarastointiarvoksi saatu n. 400 kJ/m<sup>2</sup>. (Balcomb, 1983)

Seinien luovuttama lämpömäärä riippuu seinän pintamateriaalista ja muodosta. Heijastamattomalta pinnalta voidaan saada lämmönsiirtokerroimeksi 6,1-9,3 W/m<sup>2</sup>K, kun taas yksinkertaiselta (emissiviteetti 0,9) pinnalta lämmönsiirtokerroin on noin 5,2 W/m<sup>2</sup>K. Seinien kohtaaminen kulmissa vähentää huoneeseen tulevaa lämpöä n. 25 %.

#### **6.7.4 Infrarakentamisen käyttökohteet**

PCM on sijoitettu siltojen jäätymisalttiiseen betoniin tai tasoitteeseen. Betonin puristuslujuus väheni, mutta siltojen huoltoväli saatiin pidennetyksi vähintään vuodella vähentyneiden jäätymisvaurioiden takia. (Bentz et al.,2007; Sakulich ,2012)

### **6.8 Johtopäätökset ja kehitysehdotukset**

Käytettäessä PCM-materiaalia, voidaan säädellä energian käyttöä ja varastointia tarpeen mukaisesti ja ottaa käyttöön uusia energian tuottamismuotoja.

Lattiarakenteissa voidaan korvata erilaiset kerrokselliset rakenteet PCM-valumassa, joka säätelee paremmin lattian lämpötilaa.

Akustiikan kannalta saadaan valumassalla parempi ääneneristävyys välipohjissa, massan vaikutus ääneneristävyyteen on todettu luvussa 2.4.

Puutalojen yläkerran WC- ja KPH- tiloissa on yleisesti valettu havuvanerin päälle 50 mm pintavalu, johon laitetaan lattialämmitys, vedeneristys ja pintalaatoitus. Sinne olisi kevennetty massa parempi, joka keventää välipohjan painoa.

Tutkimuksissa on ollut kumilaastin käyttökohteena talojen katot, jolloin laatan päälle tulisi lämpöä eristävä valumassa ja PCM-materiaali.

## 7 YHTEENVETO

Tässä tutkimuksessa selvitettiin kevyttäytteidien, kierrätysmateriaalien ja faasimuutosmateriaalien (PCM/ phase change materials) ominaisuuksia ja tutkimuksista saatua tietoa jatkotutkimuksia varten. Tavoitteena on saada Suomeen uusia energiaa säästäviä tuotteita, jotka ovat myöskin ekologisesti kestäväällä pohjalla. Tämä tutkimus on tehty kirjallisuus- ja aineistotutkimuksena.

Täyteaineen valinnassa painotetaan keveyttä, lämmöneristävyyttä ja lämmönvarauskykyä säästäviä eristys- ja faasimuutosmateriaaleja, jolloin PCM:n sijoittelu rakenteessa korvaa termisen massan. Sijoittamalla rakennuksen massa sopiva materiaali energian talteen ottamiseksi ja lämmön tasaamiseksi säästää käytettävän suoran energian määrää, sekä antaa mahdollisuuksia ottaa käyttöön uusia energiamuotoja. Näitä ovat esim. oleskelijoista tullut lämpö sekä erilaisista koneista ja laitteista tullut lämpö. Samoin voidaan huomioida esim. prosesseista ja ilmastoinnista tullut lämpö. Tutkimuksissa kiinnitettiin huomiota myös rakennusten ja rakennelmien huoltovälin pidentämiseen ulko- vuorauksessa käytetyn PCM- materiaalin avulla. Hyviä kokemuksia on saatu myös siltojen jäätymisvaurioiden vähentymisestä ja huoltovälien pidentymisestä

Loppupäätelmissä todettiin optimaalisen lämmön talteenoton olevan silloin, kun sulamislämpö on 1-3°C huoneenlämpöä ylempi. Seinä voi optimaalitalanteessa ottaa vastaan energiaa, aina, kun huoneen lämpötila ylittää sulamislämpötilan, samoin toisin päin. Seinä luovuttaa energiaa, kun huoneen lämpötila laskee alle sulamislämpötilan. Muutoin seinä toimii aivan normaalisti huoneen lämpötilassa. Seinä toimii siis huoneen lämpötilan vaihtelujen tahdissa esim. vuorokausirytmissä. Kylmillä ilmastoalueilla esim. Suomessa on hyvä olla lämmönkeräysjärjestelmä, joka pystytään lämmittämään korkeintaan 7 tunnissa ja joka luovuttaa lämpöä vähintään 16 tuntia. samoin viilennysjärjestelmä toimisi yöaikaan 7 tuntia ja voisi ottaa lämpöä muun päivääjän. PCM-materiaali saatiin toimimaan näillä aikajanoilla hyvin.

Kevennysmateriaalien käytettävyyttä laasteissa tutkittiin suurelta osin materiaalin kierrätettävyyden ja ekologisuuden kannalta. Yhä enenevässä määrin pyritään saamaan kaikki käytetty rakennusmateriaali uudelleen kiertoön. Ongelmana ovat olleet myös muista toiminnoista tulleet jättemateriaalit, kuten autonrenkaat ja kipsi. Autonrenkaista ja muusta kumimateriaalista on tehty kumirouhetta.

Koska kumirouhelaasteilla ei ole lujuutta, niitä voidaan käyttää paikoissa missä ei vaadita kantavuutta ja kestävyttä suurille kuormille. Todennäköiset käyttökohteet olisivatkin esim. yläpohjat, joissa ne myös ovat joustavia ja lämpöä eristäviä. Samasta syystä sopivia kohteita ovat myös kellarien alapohjat. Kumirouhelaastia voi myös käyttää vanhojen perustusten tukemiseen, jolloin laastin joustavuus antaa tilaa rakentamisessa tapahtuville muutoksille.

## LÄHDELUETTELO

- Albano C., Camacho N., Hernandez M., Matheus A., Gutierrez A. (2009)  
Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios  
Waste Management 29 (2009) s. 2707-2716
- Akcaozoglu, S., Atis, C.D., Akcaozoglu, K. (2010)  
An Investigation on the use of shredded pet WASTE bottles as aggregate in light-weight concrete  
Waste Manage 32 (2007) s. 285-90
- Babu, D.S., Babu, K.G., Tiong-Huan, Wee (2006)  
Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete  
Cement and Concrete Composites 28, (2006), s.520-527
- Balcomb J. D. (1983)  
Heat storage and distribution inside passive solar buildings  
Second International PLEA Conference  
Passive and Low Energy Architecture (1983) s. 547-561
- Bentz, D.P., Turpin, R. (2007)  
Potential applications of phase change materials in concrete technology  
Cement & Concrete Composite 29 (2007) s. 527-532
- Cadea, J., Rodriguez, A., Campos, P.L., Garabito, J., Calderón, V., (2010)  
Lightweight mortar made with recycled polyurethane foam  
Cement & Concrete Composites 32 (2010), s. 672-677
- Choi, Y. W., Moon, D. J., Kim, Y. J., Lachemi, M., (2008)  
Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles  
Construction and Building Materials 23 (2009) s. 2829-2835

Coatanlem,P., Jauberthie,R., Rendell, F., (2004)

Lightweight wood chipping concrete durability

Construction and Building Materials 20 (2006), s. 776-781

Cobeza L., Castellon C., Nogues M. Medrano M. Leppers R. (2007)

Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings

Energy and Buildings 2 (2007) s. 113-119

Fang, X., Zhang Z. (2005)

Novel Montmorillonite-Based composite Phase Change Material and Its Applications in Thermal Storage Building Materials.

Energy and Buildings 38 (2006) s. 377-380

Fraj A., Kismi M., Mounanga P. (2010)

Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight aggregate concrete

Construction and Building Materials 6 (2010) s. 1069-1077

Frigione Mariaenrica (2010)

Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete

Waste Management 30 (2010) s. 1101-1106

Gutiérrez-González, S., Gadea, J., Rodríguez, A., Blanco-Varela, M.T., Calderon, V. (2011)

Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties

Construction and Building Materials 34 (2012) s. 179-185

Hannawi, K, Kamali-Bernard, S, Prince, W (2010)

Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates

Waste Manage 30 (2010) s. 2312-20

Hoes,P.Trcka, M.,Hensen,J.L.M., Hoekstra Bonnema, B.,(2011)

Investigating the potential of novel low-energy house concept with hybrid adaptable thermal storage

Energy Conversion and Management 52 (2011), s. 2442-2447

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 & Concrete Composites 31 (2009) s. 731-743

Kalliorinne K., Sinivuori E., Kankaanperä A., Kivinen A. (1990)  
Fysikaalinen kemia 2: Termodynamiikka  
Tammi ISBN 951-26-3274-8

Kan, A, Demirboga, R (2009)  
A novel material for lightweight concrete production  
Cement and Concrete Composites 31 (2009) s. 489-95

Kara, Y. A., Kurnuc, A., (2011)  
Performance of coupled novel triple glass and phase change material wall in  
the heating season: An experimental study  
Solar Energy 86 (2012) s. 2432-2442

Kivitaloinfo

Saatavuus: <https://kivitaloinfo.fi/rappaus/rappausten-historia/>

Koleva, Milena

Morphology of polyvinylchloride containing sucrose palmitate as bio-plasticizer  
International Scientific Conference Unitech 2016, Gabrovo, Bulgaria, Volume 1

Koo, J., So, H., Hong, S. W., (2011)  
Effects of wallboard design parameters on the thermal storage in buildings  
Energy and Buildings 8 (2011) s. 1947-1951

Kou, S. C., Lee, G., Poon, C. S., Lai, W. L. (2009)  
Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived  
from scraped PVC pipes.  
Waste Manage 29 (2009) s. 621-8

Kuznik, F., David, D., Johannes, K., Roux, J. (2010)  
A review on phase change materials integrated in building walls  
Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011), s. 379-391

Kuznik, F. , Virgone,J., Johannes, K. (2010)

In-Situ study of thermal comfort enhancement in a renovated building equipped with phase change material wallboard

Renewable Energy 36 (2011) s. 1458-1462

Li, Min , Wu, Zhishen , Tan, Jinmiao, (2012)

Heat storage properties of the cement mortar incorporated with composite phase change material

Applied Energy (2013)s. 393-399

MaalausRYL 2012

Rakennustieto 2012, Kirja, e-kirja-PDF

Saatavuus: <https://www.rakennustietokauppa.fi>

Marzouk, O.Y., Dheilly, R.M., Queneudec, M. (2007)

Valorisation of post-consumer plastic waste in cementitious concrete composites.

Waste Manage 27 (2007) s. 310

Maxit Weber

[https:// www.maxit.de](https://www.maxit.de)

Meshgin, P., Xi, Y., Li Yue (2010)

Utilization of phase change materials and rubber particles to improve thermal and mechanical properties of mortar

Construction and Building Materials 28 (2012) s. 713-721

Miled, K., Le Roy, R., Sab, K., Boulay, C. (2003)

Compressive behavior of an idealized EPS lightweight concrete: size effects and failure mode

Mechanics and Materials 36 (2004) s. 1031-1046

Mounanga,P.,Gbondon ,W. Poullain, P., Turcry, P. (2008)

Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes

Cement and Concrete Composites 30 (2008) s. 806

Parameshwaran,R., Kalaiselvam, S., Harikrishnan, S.,Elayaperumal, A., (2012)  
Sustainable thermal energy storage technologies for buildings: A review  
Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, (2012), s.2394-2433

Panyakapo P., Panyakapo M. (2008)  
Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete  
Waste Management 28 (2008) s. 1581-1588

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, (2008), s.39-64

Peippo K., Kauranen P. , Lund P. (1991)  
A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating  
Energy and Buildings 17 (1991) s. 259-270

Pentti Matti ja Kylliäinen Mikko (2005)  
Eristysrakenteet luentomoniste  
Tampereen teknillinen yliopisto

Rao, Z., Wang, S., Zhang, Z., (2011)  
Energy saving latent heat storage and environmental friendly humidity-controlled  
materials for indoor climate.  
Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) s. 3136-3145

del Rio Merino,M., Santa Cruz Astorqui, J.,Cortina, M. G.,(2006)  
Viability analysis and constructive applications of lightened mortar  
( rubber cement mortar)  
Construction and Building Materials 21 (2007), s. 1785-1791

Remadnia, A., Dheilily, R.M., Laidoudi, B. Quéneudec, M. (2009)  
Use of animal proteins as foaming agent in cementitious concrete composites manu-  
factured with recycled PET aggregates.  
Construction and Building Materials 23 (2009), s. 3118-23

Saikia,N., de Brito, J., (2011)

Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation:  
A review.

Construction and Building Materials 34 (2012), s. 385-401

Sakulich,A. R.,Bentz, D. P.,(2012)

Incorporation of phase change materials in cementitious systems via fine  
lightweight aggregate

Construction and Building Materials 35 (2012), s. 483-490

Scalat,S., Banu, D., Hawes,D., Paris,J., Haghghata, F., Feldham, D., (1995)

Full scale thermal testing of latent heat storage in wallboard

Solar Energy Materials and Solar Cells

Sengul,O., Azizi,S., Karaosmanoglu, F.,Tasdemir,Mehmet A., (2010)

Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity  
of lightweight concrete

Energy and Buildings 43 (2011), s.671-676

Shafigh,P., Bin Mahmud,H., Julmaat, M.Z., (2011)

Oil palm shell lightweight concrete as a ductile material

Materials and Design 36 (2012), s. 650-654

Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R., Buddhi, D. (2009)

Review on thermal energy storage with phase change materials  
and applications

Energy Reviews 13 (2009) s. 318-345

Siddique R. , Khatib J., Kaur I. (2008)

Use of recycled plastic in concrete: A review

Waste Management 28 (2008) s. 1835-1852

SisäRYL 2000

Saatavuus:<https://www.rakennustietokauppa.fi>

SFS-EN ISO 10456

SFS Suomen Standardit ry

Standardien käsitteet

Saatavilla: <https://sfs.fi>

Takala Joose (2013)

Suomalaisten asuinhuoneiden ääniolosuhteet ja ääneneristävyyden mittaustapa  
Tampereen teknillinen yliopisto, rakennesuunnittelu

Tamba, S. , Jauberthie, R. , Lanos, C. , Rendell, F. (2001)

Lightweight wood fibre concrete.

Concrete Sci 3 (2001) s. 53

Tyagi, V.V. , Buddhi, D. (2005)

PCM thermal storage in buildings: A state of art

Renewable and Sustainable Energy Reviews 11, (2007) s. 1146-1166

Tyagi, V.V. , Kaushik, S.C. , Tyagi, S.K. , Akiyama, T. (2010)

Development of phase change materials based microencapsulated  
technology for buildings: A review

Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, (2011), s. 1373-1391

Vastavalo Media

Siilinjärven kuva

Saatavuus; [https:// www.vastavalo.net/index.php](https://www.vastavalo.net/index.php)

Vinha Juha (2009), Rakennusfysiikka luentomoniste

Tampereen teknillinen yliopisto 2009

Vinha Juha (2014)

Rakennusfysiikka 1, rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset

Suomen Rakennusinsinöörin liitto RIL ry Nro 255-1 2014

Weber-opas (2021)

Weber rakennusmateriaalien tietopaketti

Saatavissa: <https://www.fi.weber/weber-opas>

YLE 2013

Itämeren valuma-alueen lannoitetehtaat, joissa on kipsivuori

Saatavuus: <https://yle.fi/a/3-6691475>