

Antti Peltola

FAASIMUUTOSMATERIAALIT RAKEN- NUKSEN ENERGIATEHOKKUUDEN PARANTAMISESSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
5/2020

TIIVISTELMÄ

Antti Peltola: Faasimuutosmateriaalit rakennuksen energiatehokkuuden parantamisessa
(Phase change material applications to increase energy efficiency in buildings)

Tekniikan kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Ympäristö- ja energiatekniikan tutkinto-ohjelma

Toukokuu 2020

Faasimuutoksessa sitoutuu tai vapautuu suuri määrä energiaa. Tämän työn tarkoituksena on tutkia faasimuutosmateriaaleja hyödyntäviä keinoja rakennusten energiatehokkuuden parantamiseksi. Työssä esitellään, minkälaisia materiaaleja ja ominaisuuksia faasimuutosmateriaaleilla tulee olla toimiakseen lämpövarastoina ja kuinka niitä voidaan hyödyntää rakennuksissa.

Faasimuutosmateriaalien toiminnan taustalla on olomuodon muutokseen sitoutunut tai siinä vapautunut lämpöenergia. Suuri kyky sitoa energiaa olomuotoa muuttaessa luo edellytyksen toimia lämpö- tai kylmävarastona. Jotta aine voi toimia faasimuutosmateriaalina, tulee sillä olla suuri latenttilämpö ja pieni tilavuuden muutos faasimuutoksen yhteydessä. Rakennukseen yhdistettäviltä faasimuutosmateriaaleilta vaaditaan yhteensopivuutta muiden rakennusmateriaalien kanssa. Niiden tulee myös olla turvallisia rakennuksen käyttäjille. Tärkein ominaisuus sopivaa faasimuutosmateriaalia valittaessa on sen sulamislämpötila.

Faasimuutosmateriaalit voidaan jakaa kolmeen luokkaan: orgaanisiin, epäorgaanisiin sekä eutektisiin seoksiin, joissa yhdistetään kahta faasimuutosmateriaalia. Orgaanisiin materiaaleihin kuuluvat parafiinit ja ei-parafiinit. Parafiinit on helppo muokata sopiviksi eri sovelluskohteisiin. Ei-parafiineihin kuuluvat muun muassa rasvahapot, alkoholit ja glykolit. Kaikilla ei-parafiineilla on erilaiset ominaisuutensa ja ne ovat suurin ryhmä faasimuutosmateriaaleissa. Epäorgaaniset materiaalit koostuvat suolahydraateista ja metalleista. Suolahydraatit muodostavat veden kanssa kidemaisen rakenteen ja niiden sulaminen tapahtuu kuivumalla. Suurin ongelma on suolahydraattien faasisegregaatio ja nestemäinen alijäähtyminen. Metalleilla taas on suuri kyky sitoa lämpöä, mutta usein suuri massa ja korkea sulamislämpötila aiheuttaa ongelmia sovelluskohteissa. Eutektiset seokset ovat kahden aineen seoksia, jolloin niiden sulamislämpötila laskee. Esimerkiksi metalleihin voidaan sekoittaa jotain orgaanista ainetta, jolloin ne ovat soveliaampia erilaisiin sovelluskohteisiin.

Faasimuutosmateriaaleja voidaan yhdistää tavallisiin rakennusmateriaaleihin jo valmistusvaiheessa tai upottamalla rakennusmateriaalit sulaan faasimuutosmateriaaliin, jolloin onkalot ja huokokset täyttyvät kapillaari-ilmion vuoksi. Yleisin tapa on kapselointi. Kapseleiden sisällä faasimuutosmateriaali sulaa ja jähmettyy, mikä estää vuodot. Makrokapseloinnissa faasimuutosmateriaalia laitetaan suureen astiaan, joka yksistään muodostaa paneelin. Mikrokapseloinnissa faasimuutosmateriaali kapseloidaan useaan pieneen palloon, jotka upotetaan rakennusmateriaaliin, kuten betoniin. Kapseloinnista on kehitetty myös muotoon stabiloitu parafiini ja polyeteenin seos, jossa on parempi lämmönjohtavuus, kuin kapseloinnissa. Vuotojen mahdollisuus on myös minimoitu.

Rakentamisessa faasimuutosmateriaaleilla saadaan tasattua lämmönvaihtelua yön ja päivän välillä, jolloin saadaan minimoitua öisin lämmitystarve ja päivisin viilennystarve. Passiivisilla keinoilla tasataan päiväkohtaista lämpötilaeroa ilman sähkölaitteita, esimerkiksi liittämällä faasimuutosmateriaaleja rakenteisiin tai materiaaleihin kuten kipsilevyihin. Aktiivisissa keinoissa faasimuutosmateriaaleja hyödynnetään lämpövarastona muiden systeemien yhteydessä. Esimerkiksi aurinkopaneeleilla voidaan tuottaa lämpöenergiaa, joka varastoidaan lämpövarastoon ja hyödynnetään yöaikaan, kun huoneilma viilenee. Faasimuutosmateriaaleja voidaan hyödyntää lämpövarastoina lämpöpumppujen yhteydessä tai huoneilman hukkalämmön talteenotossa.

Vapaassa jäähdytyksessä rakennus viilennetään öisin viileällä ulkoilmalla ja samalla varataan faasimuutosmateriaalista tehty kylmävarasto, joka päivän lämmitessä viilentää huoneilmaa. Päivittäinen sähkönkulutuspiikki on korkea, kun lämmintä ilmaa poistetaan koneellisesti samaan aikaan laitteiden ja valojen ollessa päällä. Tätä piikkiä voidaan muuttaa huippukuorman siirrolla, missä käytetään yön halvimpia sähkönkulutustunteja varaamaan faasimuutosmateriaalin kylmävarasto. Kylmävarasto viilentää huonetta päiväsaikaan samalla, kun rakennuksen sähkönkulutuspiikki pienenee.

Avainsanat: Faasimuutosmateriaali, rakennuksen energiatehokkuus, lämpövarasto

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkistettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. FAASIMUUTOS	3
2.1 Aineen rakenne ja vuorovaikutus faasimuutoksessa	3
2.2 Lämpöenergian varastoituminen	5
2.3 Lämmön vapautuminen	7
3. FAASIMUUTOSMATERIAALIT	9
3.1 Faasimuutosmateriaalien luokittelu ja ominaisuudet	9
3.2 Orgaaniset faasimuutosmateriaalit	10
3.3 Epäorgaaniset faasimuutosmateriaalit	11
3.4 Eutektiset faasimuutosmateriaalit	12
4. SOVELLUSKOHTEET RAKENTAMISESSA	14
4.1 Faasimuutosmateriaalien yhdistäminen rakennusmateriaaleihin	14
4.2 Passiiviset sovelluskohteet	16
4.3 Aktiiviset sovelluskohteet	19
4.4 Vapaa jäädytys	21
4.5 Huippukuorman siirto	22
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	25
LÄHTEET	28

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CC	engl. Cooled ceiling, kattoviilennys
DSC	engl. Differential Scanning Calorimeter, Differentiaalinen pyyhkäisykalorimetri
DTA	engl. Differential Thermal Analysis, Differentiaalinen lämpöanalyysi
HDPE	engl. High-density polyethylene, suuren tiheyden omaava polyeteeni
PCM	engl. Phase Change Material, faasimuutosmateriaali
<i>a</i>	kiihtyvyys
<i>C</i>	lämpökapasiteetti
<i>c</i>	ominaislämpökapasiteetti
<i>c_p</i>	ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa
<i>F</i>	voima
<i>m</i>	massa
<i>V</i>	Tilavuus
<i>Q</i>	lämpömäärä
ΔT	Lämpötilan muutos
ρ	Tiheys
<i>V</i>	Tilavuus

1. JOHDANTO

Kaupungistuminen on ollut nousussa jo useamman vuosikymmenen ajan. Vuonna 2010 maapallon väestön kaupungistuneisuus oli 51,6 prosenttia (Kohlhase 2013) ja sen on ennustettu vain kasvavan tulevaisuudessa. Kaupunkien väkiluvun kasvaessa myös asuntojen tarve kaupungeissa kasvaa ja sitä myötä energiankulutus kasvaa. Asunnoissa eniten energiaa kuluu asuintilojen viilennykseen ja lämmittämiseen. Energiaa kuluu myös ruuanlaitossa, valaistuksessa ja muissa sähkölaitteissa.

Nykypäivän trendinä on energiatehokkuus ja uusiutuvat energialähteet, joilla pyritään saamaan rakennusten hukkaenergia sekä lämmitys-, viilennys- ja ilmanvaihtokustannukset mahdollisimman pieniksi. Uusiutuvien energialähteiden käytöstä ja sähkökustannusten pienentämisestä herää ajatuksena monelle aurinkokennojen ja maalämpöpumppujen hyödyntäminen. Kuitenkin jo monen vuosikymmenen ajan on tutkittu faasimuutosmateriaaleja ja niiden hyödyntämistä rakennusten energiatehokkuuden parantamisessa. Faasimuutosmateriaalien käyttö perustuu lämpöenergian varastointiin aineen olomuodon muutoksen yhteyteen.

Faasimuutosmateriaalien keksijänä on pidetty Stanford Ovshinskyä (1922—2012), mutta kuitenkin jo 1900 -luvun alussa Alan Waterman (1892—1967) teki ensimmäiset havainnot faasimuutosmateriaaleista. Waterman havaitsi muiden tutkimuksien ohessa erään suolan sähkönjohtavuudelle erityispiirteitä, joiden pohjalta alkoi tutkimaan asiaa tarkemmin. Suolan sähkönjohtavuus ei noudattanut Ohmin lakia, joten hän pystyi tutkimuksillaan osoittamaan, että suolassa esiintyi kahta eri faasia. Faasimuutosmateriaalien ensimmäiset sovelluskohteet ovat tietokoneiden muisteissa. (Raoux & Wuttig 2009, s. 1—14)

Lämpöenergia voidaan varastoida tuntuvana energiana, kuten lämminvesivaraajassa, tai latenttilämpönä eli hyödyntämällä faasimuutoksen yhteydessä vapautuvaa tai sitoutuvaa energiaa. Energiaa voidaan varastoida useilla muillakin eri tavoilla, kuten maakaasuna tai öljynä eli orgaanisena polttoaineena, massan korkeuserona vesivoimassa eli potentiaalienergiana tai paristoihin sähköenergiana. Sähköinen varastointi tarkoittaa energian varastoimista sähköenergiana kuten akkujen varaaminen. Potentiaalienergian varastoinnissa aineeseen sitoutuu potentiaalienergiaa, kun sen sijainti nostetaan alkuperäistä sijaintia korkeammalle. Hyvä esimerkki tällaisesta aineesta on vesi,

jonka potentiaalienergia voidaan muuttaa sähköenergiaksi. (Huggins 2010 s. 21-27,49,55)

Opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia faasimuutosmateriaalien käyttömahdollisuuksia rakennuksien energiatehokkuuden parantamisen näkökulmasta. Luvussa 2 esitellään mitä faasimuutoksella tarkoitetaan sekä sen toimintaperiaate. Itse faasimuutosmateriaaleista ja niiden luokittelusta sekä ominaisuuksista kerrotaan luvussa 3. Rakennuksien sovelluskohteita ja keinoja hyödyntää faasimuutosmateriaaleja esitellään luvussa 4. Johtopäätökset ovat luvussa 5.

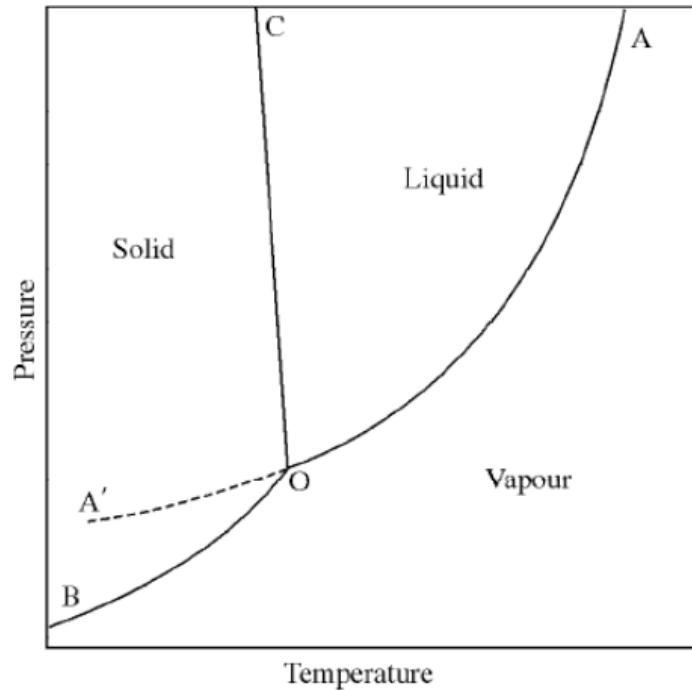
2. FAASIMUUTOS

Faasimuutoksessa lämpöä siirtyy aineen ja ympäristön välillä. Tämä lämmön siirtyminen mahdollistaa lämmön varastoimisen aineeseen. Tässä luvussa esitellään mitä faasimuutoksella tarkoitetaan ja mitä aineen rakenteessa tapahtuu olomuodon muutoksessa. Luvussa käydään myös läpi, kuinka lämpöä varastoidaan ja vapautetaan aineesta.

2.1 Aineen rakenne ja vuorovaikutus faasimuutoksessa

Faasi eli aineen olomuoto tarkoittaa aineella olevaa homogeenistä osa-aluetta, jolla on yhtäläiset fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet. Jokaisella puhtaalla materiaalilla on yhteensä kolme erilaista olomuotoa: kiinteä, neste ja kaasu. Samassa systeemissä voi olla useampaa faasia samanaikaisesti. Jos näin on, on jokaisella faasilla erilaiset kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet, joiden välillä on jyrkkä rajapinta. Mikäli systeemissä on vain yhtä faasia, on systeemi homogeeninen. Useampifaasisista systeemiä kutsutaan heterogeeniseksi. (Callister & Rethwisch 2011, s.284)

Aineen faasimuutoksia voidaan kuvata faasimuutosdiagrammilla, jossa pystyakselilla on paine ja vaaka-akselilla on lämpötila. Kuvassa 1 on veden faasidiagrammi, josta havaitaan sulamiskäyrältä veden sulamislämpötilan muuttuminen paineen muuttuessa. Sulamiskäyrä on nesteen ja kiinteän faasin välillä kulkeva käyrä. Faasidiagrammissa on kolme stabiilia käyrää (BO, OA ja OC), yksi metastabiili käyrä (A'O) ja kolmoispiste (O). Stabiileilla käyrillä olomuoto muuttuu ja kolmoispisteessä voi havaita jokaista kolmea aineen faasia. Metastabiililla käyrällä aineessa voi havaita alijäähtymistä, jos aineen painetta ja lämpötilaa lasketaan nopeasti kiehumiskäyrää (OA) pitkin alle kolmoispisteen. (Singh et al. 2000, s. 201—202)



Kuva 1 Veden faasimuutosdiagrammi (Singh et al. 2000 s. 201)

Kiinteässä faasissa olevan materiaalin molekyylit ovat erittäin lähellä toisiaan ja molekyylien välillä vaikuttaa vetovoima. Vetovoima pitää molekyylit paikallaan aineelle ominaisessa kolmiulotteisessa kiderakenteessa. Molekyylien liikehdintä on vähäistä, kun ainetta ympäröivän ympäristön lämpötila on matala. Lämpötilan kasvaessa alkaa molekyylienkin liike kasvamaan kiderakenteessa. Ympäristön lämpötilan ohittaessa faasimuutoslämpötilan alkavat kiderakenteessa olevien molekyylien väliset vuorovaikutusvoimat pienentyä. Tämä aiheuttaa kiderakenteeseen selkeän muodon muuttumisen, sulamisen, missä molekyylit ovat kiinni toisissaan. Molekyyleillä on kuitenkin mahdollisuus vapaasti liikkua ja pyöriä aineessa. Toisin kuin kiinteässä ja sulassa faasissa kaasufaasissa aineella ei ole selkeitä rajoja, vaan molekyylit sinkoilevat sattumanvaraisesti aineen astian koko tilavuudessa seiniä ja toisiaan vasten. Kaasufaasin molekyyleillä on erittäin pienet vuorovaikutusvoimat keskenään, mikä aiheuttaa molekyylien pitkät välimatkat aineen sisällä. (Çengel & Boles 2011, s.112—113)

Faasin muutoksella tarkoitetaan aineen olomuodon muuttumista ympäröivän lämpötilan muuttuessa paineen pysyessä vakiona. Kiinteä faasi muuttuu nestemäiseksi faasiksi eli sulaa, kun ympäristön lämpötila nousee sulamispisteen lämpötilaa korkeampaan lämpötilaan. Lämpötilan nousun jatkuminen saa sulan aineen höyrystymään, eli faasi muuttuu kaasuksi lämpötilan noustessa tarpeeksi korkeaksi. Lämpötilaa, jossa höyrys-

tyminen tapahtuu, kutsutaan kiehumispisteeksi. Kun kaasun lämpötila laskee alle kiehumispisteen lämpötilan, kaasu tiivistyy takaisin sulaan faasiin. Sula faasi taas jähmettyy kiinteäksi, kun ympäröivä lämpötila laskee alle sulamislämpötilan.

2.2 Lämpöenergian varastoituminen

Lämpöenergiaa voidaan varastoida monilla tavoin. Useimmiten varastointi tapahtuu hyödyntämällä joko tuntuvaa lämpöä, kuten kuumavesivaraajissa, tai latenttilämpöä, kuten faasimuutosmateriaaleissa. Tuntuvan lämmön varastointi on lämmön varastointia materiaaliin sen lämpötilaa nostamalla. Latenttilämmön varastoinnilla tarkoitetaan lämpöenergian varastoimista materiaalin faasimuutokseen. Tämä tapahtuu tyypillisesti va-kiolämpötilassa (Rosen 2012, s. 21—22).

Tuntuvaa lämpöä voidaan varastoida aineeseen lämmittämällä sitä, jolloin sen tuntuva lämpö eli lämpötila nousee. Mitä lämpimämpi materiaali on, sitä enemmän siihen on sitoutunut lämpöenergiaa. Materiaalista saadaan lämpöenergia uudelleen käyttöön viilentämällä materiaalia, jolloin lämpöenergia poistuu aineesta. (Dincer & Rosen 2010, s. 211—230) Materiaaliin varastoitavan lämpöenergian määrä suhteessa massaan ja lämpötilaan eli lämpökapasiteetti C voidaan laskea kaavalla

$$C = cm, \quad (1)$$

jossa c on materiaalille ominainen ominaislämpökapasiteetti ja m on materiaalin massa (Çengel & Boles 2011 s. 275).

Tuntuvan lämmön varastoinnissa materiaalien lämpötila ei nouse yli faasimuutoslämpötilan. Kun tiedetään lämpötilan muutos, voidaan kappaleeseen varastoitavan lämmön määrä Q laskea kaavalla

$$Q = mc_p\Delta T = \rho c_p V\Delta T, \quad (2)$$

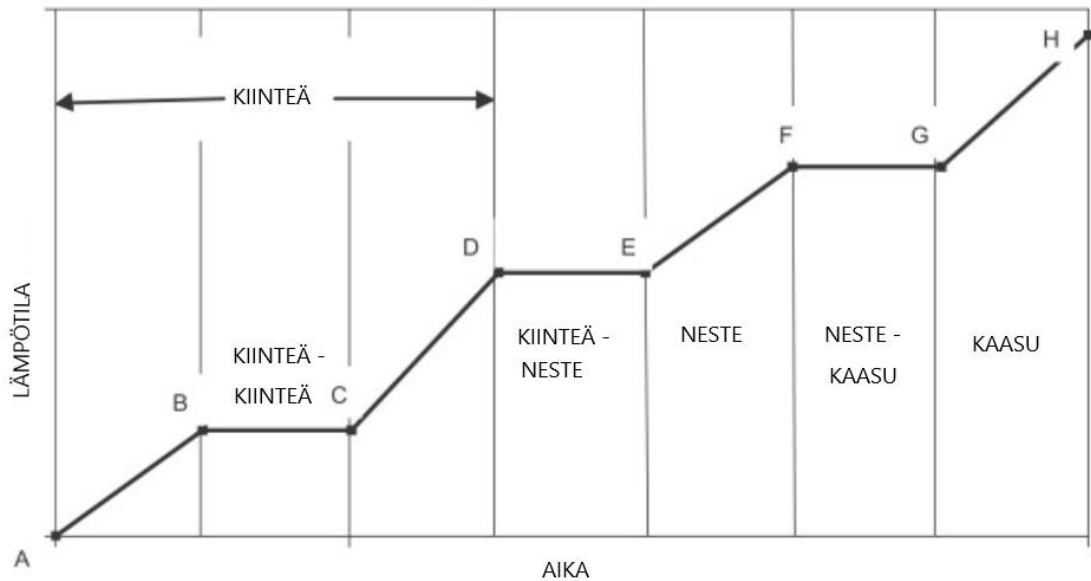
jossa c_p on ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa, ΔT on lämpötilan muutos, ρ on kappaleen tiheys ja V on kappaleen tilavuus. (Dincer & Rosen 2010, s.109—110) Lämmön varastointiin tuntuvana lämpönä vaikuttaa suuresti materiaalin lämpökapasiteetti sekä tiheys. Esimerkiksi vedellä on suuri tiheys ja ominaislämpökapasiteetti, mikä tekee siitä erinomaisen tuntuvan lämmön varastointiin. Huonona puolena tuntuvan lämmön varastoinnissa on sen suuri riippuvuus myös materiaalin massasta ja lämpötilaerosta, mitkä luovat omat haasteensa materiaalin säilytyksessä ja sovelluskohteissa. Materiaalien käytössä tulee kiinnittää huomiota astiaan, jotta häviöt ja käyttökustannukset ovat

pieniä. Nestemäisissä tuntuva lämmön varastoissa tulee ottaa huomioon astian parempi laatu verrattuna kiinteän tuntuva lämmön varastoinnin astioissa (Dincer & Rosen 2010, s.110).

Latenttilämmöllä eli faasimuutoslämmöllä tarkoitetaan sitä lämpöenergiaa, jonka varastoinnin kohteena oleva aine sitoo itseensä faasimuutoksen yhteydessä. Faasimuutoksessa lämpötila ja paine pysyvät vakioina. Latenttilämmön faasimuutoksena käytetään usein vain kiinteän muutosta sulaksi, sillä nestefaasi on helpompi hallita kuin kaasufaasi. (Dincer & Rosen 2010, s. 84) Materiaalin kiinteän ja sulan faasimuutokseen varastoitavan lämmön määrä voidaan laskea kaavalla

$$Q = m \left[\int_{T_A}^{T_D} C_{ps}(T) dT + L + \int_{T_E}^{T_F} C_{pl}(T) dT \right], \quad (3)$$

jossa Q on lämmön määrä faasimuutosmateriaalissa, C_{ps} on lämpökapasiteetti materiaalin ollessa kiinteää ja C_{pl} on lämpökapasiteetti materiaalin ollessa sulaa. Ensimmäisen integraalin lämpötilan, T , muutoksessa huomioidaan materiaalin lämpötila, T_A , kun lämmitys aloitetaan, sekä materiaalin sulamislämpötila, T_D . Toisessa integraalissa lasketaan sulan materiaalin tuntuva entalpia lämpötilasta, T_E , joka on hetki sulan materiaalin lämpötilan noususta lämpötilaan T_F , joka on lämpötila lämmityksen päätyttyä. Kaavassa lämpöä lisää L , joka on materiaalin sulamiseen kulunut lämpö (Regin et al. 2008). Faasin muutokseen tarvitaan suuri määrä energiaa ilman suuria lämpötilaeroja. Tämä mahdollistaa faasimuutoksen hyödyntämisen tehokkaampana lämpövarastona kuin pelkän tuntuva lämmön varastointi. Kuvassa 2 on havainnollistettu faasimuutoksen kulkua vaikealämpötilan nousulla. Kaavassa (3) on otettu huomioon faasimuutosmateriaaleille tyyppinen kiinteän ja nesteen välinen faasimuutos, mikä vastaa kuvassa 2 vaiheita CD—EF.



Kuva 2 Faasimuutoksen kulku vakiolämpötilan nousussa (mukailten Regin et al. 2008).

Latenttilämmön määrää voidaan mitata kahdella tavalla, differentiaalisella lämpöanalyysillä (Differential Thermal Analysis, DTA) tai differentiaalisella pyyhkäisykalorimetriellä (Differential Scanning Calorimeter, DSC). DSC:llä ja DTA:lla pystytään myös määrittämään aineen sulamislämpötila. Molemmilla tekniikoilla sekä tutkittavaa materiaalinäytettä että referenssimateriaalia lämmitetään vakiolämmöllä, jolloin materiaalien lämpötilaeron perusteella laitteet muodostavat DSC-käyrän. Käyrästä on mahdollista laskea sulamiseen tarvittava lämpömäärä sekä arvioida sulamislämpötila. Alumiinioksidia (Al_2O_3) suositellaan käytettävän laitteiden referenssiaineena. (Buddhi et al. 1987, Sharma et al. 2009 mukaan)

2.3 Lämmön vapautuminen

Termodynamiikan sääntöjen mukaan energia siirtyy lämpönä aina kuumasta kylmään. Systemi pyrkii aina pääsemään termiseen tasapainotilaan, mikä tarkoittaa lämpötilan tasaantumista systeemissä. (Çengel & Boles 2011, s. 60) Materiaaliin varastoitu tuntuva lämpö saadaan hyödynnettyä viilentämällä materiaalia. Latentti lämpö vapautuu materiaalista vastakkaisen faasimuutoksen avulla. Esimerkiksi kun nestefaasi muutetaan takaisin kiinteäksi.

Materiaalin jäähdytyksestä vapautuva lämpö on yhtä suuri kuin sulamiseen tarvittava lämpö. Samalla tavalla höyrystymisessä varastoitu lämpö on yhtä suuri kuin

tiivistymisessä vapautuva lämpö. (Çengel & Boles 2011, s.116) Materiaalissa ei siis itsessään synny häviöitä. Kaavalla 3 voidaan laskea nesteen jähmettymisessä vapauttaman lämpöenergian suuruus. Tällöin lämmön suunta on vain eri, mistä johtuu laskuissa lämmön määrälle tuleva miinusmerkki.

3. FAASIMUUTOSMATERIAALIT

Faasimuutosmateriaalit (phase change material, PCM) voidaan jakaa kolmeen luokkaan valmistusmateriaalien mukaan: orgaanisiin, epäorgaanisiin ja eutektisiin materiaaleihin. Luvussa esitellään faasimuutosmateriaaleille tyypillisiä ominaisuuksia ja luokittelua sekä pohditaan niiden hyviä ja huonoja puolia.

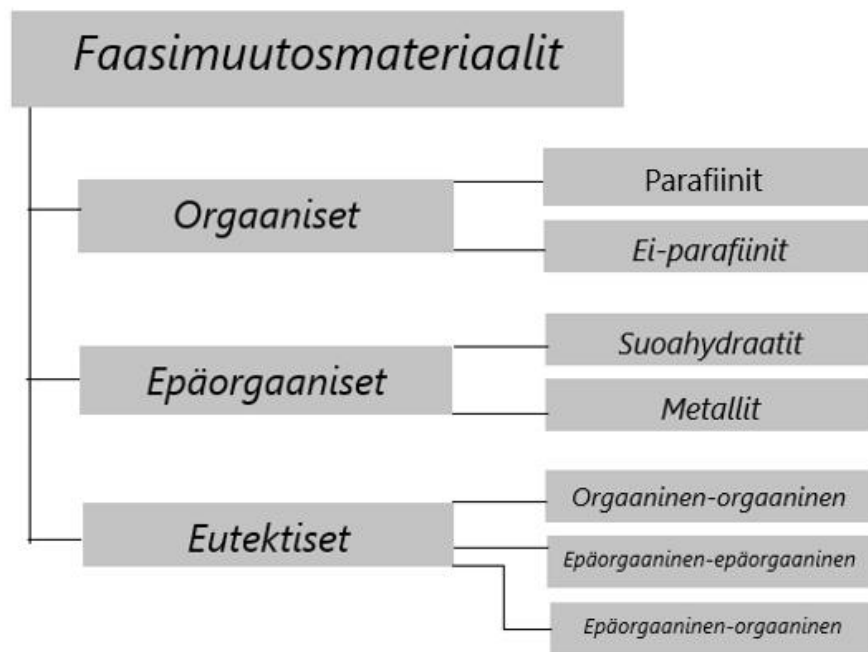
3.1 Faasimuutosmateriaalien luokittelu ja ominaisuudet

Faasimuutosmateriaaleilla on suuri kyky säilöä, vastaanottaa ja luovuttaa lämpöenergiaa. Materiaaliin varastoituu lämpöenergiaa, kun faasimuutosmateriaali sulaa tai höyrystyy ja jähmettyessä tai tiivistyessä se luovuttaa varastoimansa energian. Nämä ominaisuudet omaavaa materiaalia voitaisiin siis hyödyntää lämpövarastona eli käyttää faasimuutosmateriaalina. Faasimuutosmateriaalien hyödyntäminen energiavarastona perustuu latentti- eli faasimuutoslämpöön. Latenttilämpöön perustuvan lämpöenergian varastointikyky materiaalin määrää kohden on 5–14 kertaa suurempi kuin tuntuvaan lämpöön perustuva varastointi. (Faraj et al. 2020) Lämpövarastosta saadaan moninkertaisesti pienempi kooltaan, jos se valmistetaan latenttilämpöön perustuvalla tavalla, kuin hyödyntämällä tuntuva lämpöä.

Materiaalit vaativat tietynlaisia ominaisuuksia toimiakseen faasimuutosmateriaaleina ja lämpövarastoina. Kuten yllä mainittiin, tulee faasimuutosmateriaalilla olla suuri latenttilämpö. Tämän lisäksi tarvitaan sovelluskohteeseen soveltuva faasimuutoslämpötila ja hyvä lämmönjohtuminen. Fysikaalisesti on tärkeää, että faasin muuttuessa aineen tilavuus muuttuu mahdollisimman vähän tai parhaimmillaan se ei muutu ollenkaan. Materiaalin tulee olla turvallinen, ilman pelkoa myrkyllisyydestä tai paloturvallisuusriskeistä. Pitkäaikaisessa käytössä, kuten rakennuksissa, tulee varmistaa, että materiaali on pitkällä aikavälillä kemiallisesti stabiili ja käytettävyydeltään yhteensopiva erilaisten rakennusmateriaalien kanssa. (Guyer 1989, s. 2) Faasimuutosmateriaalien yhteensopimattomuus muiden rakennusmateriaalien kanssa, saattaa aiheuttaa materiaalien välisiä odottamattomia reaktioita tai rakennusmateriaalien ominaisuudet saattavat heiketä. Sopiva faasimuutosmateriaali valitaan sovelluskohteeseen sen ominaisuuksien perusteella. Sovelluskohteen tiedot, ympäristö ja materiaalit kertovat, minkälaisia ominaisuuksia faasimuutosmateriaalilta tarvitaan. Esimerkiksi, jos käyttökohteessa on erittäin pieni tila faasin muutokselle, valitaan sellainen faasimuutosmateriaali, jossa on likimain olematon tilavuudenmuutos. Kuitenkin yksi tärkeimpiä ominaisuuksia sopivaa materiaalia valittaessa on haluttu lämpötila, jossa faasin muutos tapahtuu. Erittäin tärkeää on myös

faasimuutosmateriaalin yhteensopivuussopivuus käyttökohteen muiden materiaalien kanssa.

Faasimuutosmateriaalit voidaan jakaa kolmeen luokkaan kuvan 3 mukaisesti: orgaaniset, epäorgaaniset ja eutektiset faasimuutosmateriaalit. Nämä kategoriat voidaan jakaa edelleen alaluokkiin. Orgaaniset materiaalit jaotellaan parafiinisiin ja ei-parafiinisiin aineisiin. Epäorgaaniset materiaalit luokitellaan suoloihin ja metalleihin. Eutektiset faasimuutosmateriaalit jaotellaan orgaanisiin ja epäorgaanisiin seoksiin sekä orgaanisten ja epäorgaanisten aineiden välisiin seoksiin. (Faraj et al. 2020)



Kuva 3. Faasimuutosmateriaalien luokittelu (mukaillen Sharma 2009)

3.2 Orgaaniset faasimuutosmateriaalit

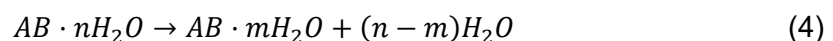
Orgaaniset faasimuutosmateriaalit jakautuvat parafiineihin ja ei-parafiineihin. Kaikilla parafiineilla on yhteneväiset sulamis- ja jäätymistavat. Parafiinit koostuvat pääasiallisesti suorista hiilivetyketjuista, jotka luovuttavat suuren määrän lämpöä sulaessaan. Materiaalina parafiinit ovat turvallisia ja ennalta-arvattavia. Sulamispistettä ja luovutettavan lämmön määrää voidaan säädellä muuttamalla hiilivetyketjun pituutta, jolloin pystytään valmistamaan sopiva materiaali eri käyttökohteille. Pidemmällä hiilivetyketjulla on vahvempi kiderakenne, jolloin se vaatii suuremman lämpötilan sulaakseen neste-mäiseksi. Sen lisäksi, että parafiinit ovat luotettavia, edullisia eivätkä aiheuta korroosiota,

niiden tilavuus ei juurikaan muutu faasimuutoksen yhteydessä ja sulan materiaalin höyrynpaine on pieni. Parafiinien huonoja puolia ovat yhteensopimattomuus muovin kanssa sekä huono lämmönjohtavuus, jolloin energian luovutus ja absorbointi on hidas prosessi. Parafiinit ovat myös kohtalaisen helposti syttyviä. (Sharma et al. 2009) Parafiinit sopivat moniin sovelluskohteisiin niiden luotettavuuden ja helpon muokattavuuden vuoksi. Huonon lämmönjohtavuuden vuoksi parafiineilla on hidaskykli sulamisen ja jähmettymisen välillä. Joissain sovelluskohteissa tästä voi olla myös hyötyä.

Määrällisesti suurin osuus faasimuutosmateriaaleista on ei-parafiinisia materiaaleja. Nämä ovat jaoteltu rasvahappoihin ja muihin ei-parafiinisiin materiaaleihin. Jokaisella niistä on omat erilaiset ominaisuudet. Ei-parafiineista lämpövarastoksi sopivia materiaaleja ovat esimerkiksi esterit, rasvahapot, alkoholi sekä glykoli. Ei-parafiinit materiaalit ovat herkkiä syttymään, joten niitä ei saa altistaa korkeille lämpötiloille tai hapettaville aineille. (Sharma et al. 2009) Rasvahapot ovat soveltuvampia faasimuutosmateriaaleiksi kuin muut ei-parafiinit, sillä rasvahapoilla on hyvä kemiallinen stabiilius ja ne ovat myrkyttömiä. Parafiineihin verrattuna rasvahapoilla on suurempi ominaislämpö ja parempi yhteensopivuus metallien kanssa. Tämä johtuu rasvahappojen happoluonteesta. (Fauzi et al. 2014) Rasvahappojen yleisestä kemiallisesta kaavasta, $CH_3(CH_2)_{2n} \cdot COOH$, jossa n kokonaisluku, huomataan sen sisältävän hiilivetyketjun lisäksi karboksyylihapon. Karboksyylihappo kasvattaa rasvahappojen molekyyliarakenteen vahvuutta, jolloin rasvahappojen latenttilämpö on suurempi kuin parafiinien. Rasvahappojen suosiota kuitenkin laskee niiden kallis hinta, joka on 2–2,5-kertainen parafiineihin verrattuna. (Sharma et al. 2009)

3.3 Epäorgaaniset faasimuutosmateriaalit

Epäorgaaniset materiaalit luokitellaan kahteen alaluokkaan, jotka ovat suolahydraatit ja metallit. Suolahydraatit ovat epäorgaanisia kiinteitä suoloja, jotka veden kanssa muodostavat tyypillisesti kiinteän kidemaisen rakenteen, jonka kemiallinen kaava on $AB \cdot nH_2O$. Suolahydraateilla sulaminen kiinteästä nesteeksi tapahtuu kuivumalla, muodostaen uuden suolahydraatin, jossa on vain vähemmän vesimolekyylejä kaavan



mukaisesti. Kaavassa AB on suola, johon vesimolekyyli on kiinnittynyt, n on vesimolekyylien lukumäärä suolahydraatissa ja m on vesimolekyylien määrä kuivuneessa suolakiteessä. (Sharma et al. 2009) Vedettömänä suolahydraateilla on suurempi energiasäilytys ja ne voidaan varastoida stabiilisti ympäröivään lämpötilaan pitkiksi ajoiksi. Lämpöenergiaa tarvittaessa, vesihöyry johdetaan suolaan, jolloin varastoitu energia saadaan

vapautettua. Suolahydraatit ovat soveltuvia faasimuutosmateriaaliksi, sillä niillä on suuri lämmön varastointikapasiteetti ja lämmönjohtavuus sekä huokeat hinnat. Suolahydraattien ongelmia faasimuutosmateriaalien sovelluksissa on nestemäinen alijäähtyminen ja faasisegregaatio, mikä tarkoittaa ytimen vaillinaista kiteytymistä tai sulamista. (Balasubramanian et al. 2010) Näitä ongelmakohtia pystytään parantamaan oikeanlaisilla saostusaineilla. Kuitenkin syklien myötä suolahydraattien ominaisuudet heikkenevät merkittävästi. (Tang et al. 2011) Suolahydraatit vaativat monipuolisen järjestelmän sovelluskohteissaan, jossa tulee viedä ja poistaa vettä faasimuutosmateriaalista. Tämä rajoittaa suolahydraattien käyttöä rakennuksissa.

Faasimuutosmateriaaleiksi soveltuvia metalleja ovat metallit, joiden sulamislämpötila on alhainen, useimmiten 30—125 asteen välillä, tai eutektiset metallit. Eutektinen metalli sisältää jotain muuta orgaanista tai epäorgaanista ainesta siten, että metallin ominaisuudet muuttuvat. Metallit olisivat suuria lämpövarastoja tilavuuteensa nähden. Tämän lisäksi niiden lämmönjohtavuus on hyvä. Kuitenkin metallien käytön haittana on metallien suuri massa, mikä asettaa paljon rajoitteita metallien käytölle faasimuutosmateriaalina. (Sharma et al. 2009)

3.4 Eutektiset faasimuutosmateriaalit

Eutektiset materiaalit ovat useamman komponentin muodostamia yhdisteitä, missä kaikki komponentit sulavat ja jähmettyvät samassa lämpötilassa. Tätä lämpötilaa kutsutaan eutektiseksi pisteeksi, mikä on alempi kuin yksittäisen komponentin sulamistai jähmettymislämpötila. (Cao et al. 2015) Materiaalin sulaessa ja jähmettyessä komponentit sekoittuvat seoksessa, ilman minkäänlaista erkaantumista. Eutektiset materiaalit voidaan valmistaa joko orgaanisista tai epäorgaanisista komponenteista, ja ne voivat olla myös sekoitus näistä kahdesta. (Sharma et al. 2009)

Faasimuutosmateriaalina voidaan käyttää rasvahappoja, mutta yksistään yhden rasvahapon faasimuutoslämpötila on liian korkea rakentamisen sovelluskohteisiin. Yhdistämällä rasvahappo toisen orgaanisen tai epäorgaanisen aineen kanssa eutektiseksi seokseksi saadaan faasimuutospistettä madallettua sopivaksi. (Cao et al. 2015) Sarin (2005) tekemässä tutkimuksessa selvitettiin muun muassa lauriinihapon ja myristiinihapon eutektista seosta. Lauriinihapon sulamispiste on 42,6 °C ja myristiinihapon sulamispiste on 52,3 °C. Näiden happojen eutektisen seoksen sulamispiste on 34,2 °C, kun lauriinihapon osuus seoksesta on 66 % ja myristiinihapon osuus on 34 %. Mikäli seostussuhde on jokin muu, ei sulaminen tapahdu yhtenäisesti tässä tietyssä lämpötilassa vaan jollakin lämpötilavälillä. Tutkimuksessa todettiin latenttilämmön laskevan seok-

sessä, kun taas rasvahappojen ollessa erillään latenttilämpö pysyi korkeampana. Latenttilämpö seoksessa oli kuitenkin sen verran korkea, että sitä voidaan verrata muihin faasimuutosmateriaaleihin. Tutkimuksessa havaittiin, että jähmettymisen ja sulamisen sykleissä lauriini- ja myrityinihapon seoksen sulamislämpötila ja latenttilämmön määrä laskee verrattain samaan tahtiin kuin muiden faasimuutosmateriaalienkin.

4. SOVELLUSKOHTEET RAKENTAMISESSA

Faasimuutosmateriaaleja voidaan hyödyntää monilla eri teollisuuden aloilla. Rakentamisessa faasimuutosmateriaalien sovellukset voidaan jakaa neljään kategoriaan. Näistä kaksi perustuu lämpöenergian varastointiin passiivisilla tai aktiivisilla keinoilla. Kolmas keino on vapaa jäähdytys. Neljännellä keinolla, huippukuorman siirrolla, pystytään siirtämään sähkönkulutuksen huippukuormaa halvemman sähkön tunneille. (Zhu et al. 2009)

Tässä luvussa esitellään, minkälaisilla keinoilla faasimuutosmateriaaleja voidaan hyödyntää rakentamisessa. Ennen sitä esitellään, miten faasimuutosmateriaaleja saadaan yhdistettyä tavallisiin rakennusmateriaaleihin.

4.1 Faasimuutosmateriaalien yhdistäminen rakennusmateriaaleihin

Faasimuutosmateriaalien käyttöä erilaisissa sovelluskohteissa perusteellaan niin energiatehokkuuden kuin taloudenkin näkökulmasta. Energiatehokkuudella tarkoitetaan kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistä tavoitellen energiakustannusten minimointia, resurssitehokkuutta sekä ympäristön- ja ilmansuojelua (Työ- ja elinkeinoministeriö). Mikäli tuotteiden ja palveluiden energiatehokkuutta saadaan parannettua, näkyy se usein myös taloudellisina säästöinä.

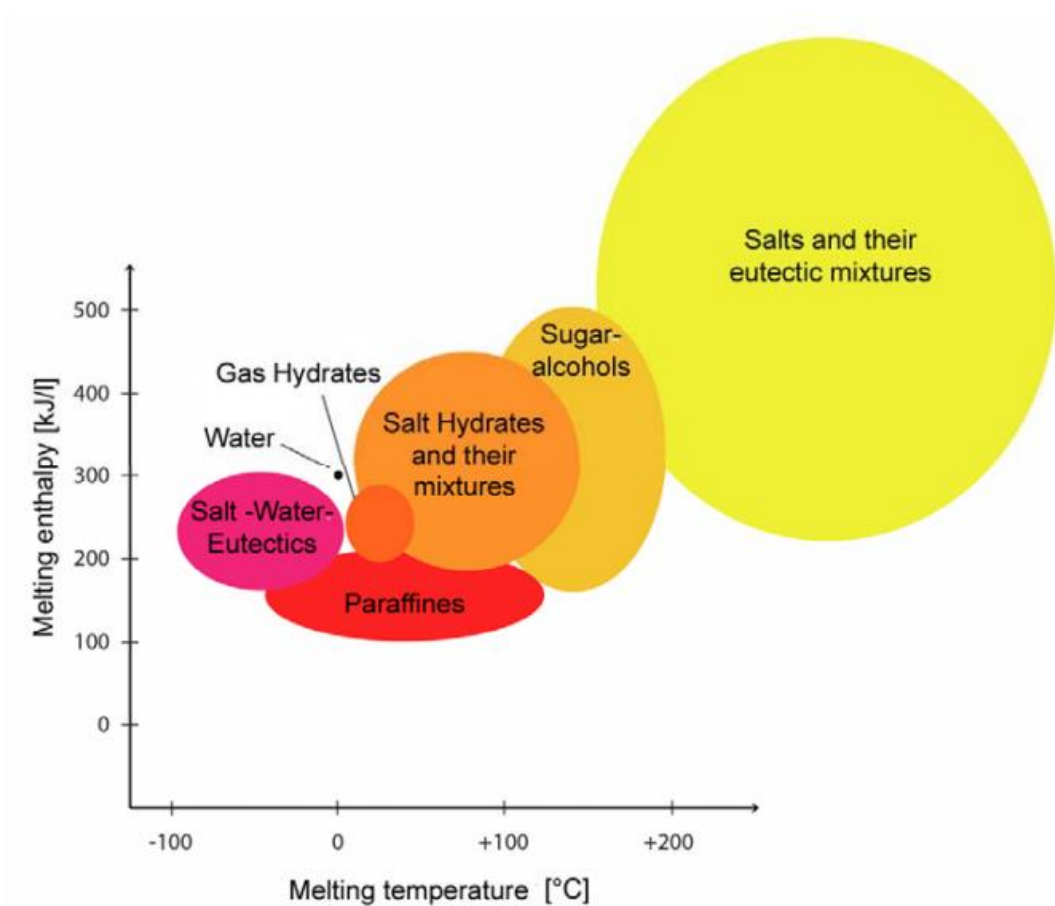
Faasimuutosaineen yhdistäminen rakennusmateriaalin kanssa toteutetaan useimmiten jollakin kolmesta seuraavasta tavasta. Rakenteisiin tai materiaaleihin, kuten kipsilevyihin tai betoniin, voidaan suoraan sekoittaa faasimuutosainetta sellaisenaan, jolloin erillisiä lämpöä ohjaavia laitteistoja ei tarvita. Ongelmana on kuitenkin mahdollisuus faasimuutosaineen vuotoihin sen vaihtaessa faasia tai sen yhteensopimattomuus rakennusmateriaalin kanssa, jolloin rakennusmateriaalin ominaisuudet saattavat heiketä. Toinen vaihtoehto on rakennusmateriaalien, kuten tiilien tai kipsilevyjen, upottaminen nestemäiseen faasimuutosaineeseen. Upotuksessa kapillaari-ilmiö saa aikaan sen, että materiaalin pienet kolot ja huokokset täyttyvät faasimuutosaineella ja lisäävät rakennusmateriaalin lämmön varastointikykyä. Tässä ongelmana on pitkällä aikavälillä tapahtuvat sulan faasin aiheuttamat mahdolliset vuodot. Kolmas vaihtoehto on faasimuutosaineen kapselointi. Kapselointia on kahdenlaista. Makrokapseloinnissa faasimuutosaineella täytetään suurempi astia, kuten rakennukseen asennettava erillinen paneeli. Mikrokapseloinnissa täytetään useita pieniä kapseleita, jotka voidaan upottaa rakennusmateriaalien

sisälle, kuten betoniin. (Zhou et al. 2012) Faasimuutosaineiden kapselointi ennen yhdistämistä rakennusmateriaaleihin on tällä hetkellä pitkäikäisimpiä keinoja. Lisäksi kapselointi varmistaa, että materiaalin ominaisuudet ovat tiedossa, sillä faasimuutosaineet eivät pääse poistumaan materiaalista.

Faasimuutosmateriaalien kapselit hyödynnettäessä tulee niiden olla käyttökohteeseensa tarpeeksi vahvoja ja joustavia sekä vastustaa korroosiota. Kapselit erottavat faasimuutosaineen ympäröivästä materiaalista sekä ympäristöstä suojaen ainetta ja sen faasin muutosta ympäristön haitallisilta aineilta. Kapselit ovat kuitenkin lämmön kulureitti materiaalin ja ympäristön välillä, joten sen täytyy kuitenkin pystyä siirtämään lämpöä tehokkaasti kapselin seinämän läpi. Materiaalina käytetään usein muovista, tinalla päällystetystä metallista tai vähähiilisestä teräksestä valmistettua kapselia. (Regin et al. 2008)

Kapseloinnin puutteita korjaamaan kehitettiin muotoon stabiloitu (shape-stabilized) parafiini. Etuina tällä kapselointiin verrattuna on kapselittomuus, mikä parantaa lämmön johtavuutta sekä poistaa vuotojen mahdollisuudet. Faasimuutosaine on sulaessaan nestemäistä, jolloin se tarvitsee ympärilleen astian. Muotoon stabiloidussa parafiinissa faasimuutosaineesta tehdään tukiaineen kanssa sekoite, joka ei sulaessaan muutu nesteeksi. Muotoon stabiloitu faasimuutosmateriaali koostuu parafiinista, jota tukemassa on suuren tiheyden omaava polyeteenimateriaali (HDPE, high-density polyethylene). (Inaba & Tu 1997) Muotoon stabiloidussa materiaalissa faasimuutosaineen osuus saa olla enintään 77 %. Mikäli parafiinin osuus on suurempi, kappaleen mekaaniset ominaisuudet heikkenevät. Tukimateriaalin heikkenemisen myötä lämpötilan nousu kappaleessa saa aikaan vuotoja faasimuutosmateriaalin sulaessa. (Ahmet 2004) Faasimuutosmateriaalia ei voi yksinään käyttää rakennusmateriaalina faasimuutoksen vuoksi. Se tarvitsee aina jonkin astian ympärilleen tai siihen tulee yhdistää jotain tukeaa materiaalia tai ainetta.

Eri faasimuutosmateriaaleilla on hyvin erilaiset sovelluskohteet. Rakentamisessa faasimuutosmateriaalien tärkein ominaisuus on sisätiloihin sopiva faasimuutoslämpötila. Rakennusten huoneistojen sisäilman lämpötila vaihtelee riippuen rakennuksen käyttötarkoituksesta, mutta tyypillisesti se on 20—25 °C. Kuvasta 4 huomataan, että sopivimmat faasimuutosmateriaalit näille lämpötiloille ovat parafiinit ja hydraatit (Kalnæs & Jelle 2015).



Kuva 4 Eri faasimuutosmateriaalien faasimuutoslämpötilat ja sulamisentalpiat (Dieckmann 2006)

Rakentamisessa faasimuutosmateriaaleja käytetään tasaamaan lämmönvaihte-
luja, jolloin huonelämpötilan vuorokauden maksimi- tai minimiarvoja saadaan muutettua
lähemmäs huoneen keskimääräistä lämpötilaa. Vuorokauden maksimilämpötilan lasku
vähentää tilan viilennystarvetta päivisin ja minimilämpötilan nostaminen vähentää tilan
ilman lämmityksen tarvetta yöaikaan. Vähentynyt lämmitys- ja viilennystarve näkyy suo-
raan pienentyneenä sähköenergian kulutuksena. Faasimuutosmateriaaleja hyödyntä-
mällä voidaan saada aikaan taloudellisia säästöjä jo suunnitteluvaiheen valinnoilla. Esi-
merkiksi suunnitteilla olevaan tilaan voitaisiin mitoittaa teholtaan pienempi viilennys- tai
lämmitysjärjestelmä, kun tilassa olevilla faasimuutosmateriaaleilla voidaan absorboida
tai emittoida tarvittava ylimääräinen lämpöenergia. (Dincer & Rosen 2010, s. 211—215)

4.2 Passiiviset sovelluskohteet

Rakennuksen termisen massan hyödyntämistä lämpövarastona kutsutaan passiiviseksi sovelluskeinoksi. Tällä tarkoitetaan sitä, että päivän aikana rakennukseen ulko-

lämpötilan vuoksi tullut ja huoneessa muodostunut lämpö varastoidaan rakennuksen rakenteisiin tai rakennusmateriaaleihin. Faasimuutosmateriaaleilla saadaan lisättyä termistä massaa tehokkaasti suhteessa faasimuutosmateriaalin omaan massaansa. Passiiviset keinot sopivat erityisen hyvin ilmastoon, jossa päivän ja yön väliset lämpötilaerot ovat suuret. Mikäli yöaikaan ilman lämpötila on liian lämmin, ei faasimuutosmateriaalit ehdi kiinteytyä kunnolla. Tällöin faasimuutosmateriaalin päivittäinen viillennys eli niin sanottu kylmävarasto ei ole niin tehokas. Talviaikaan passiiviset sovellukset toimivat toisinpäin, jolloin päivän aikana kertynyt lämpö varastoituu rakenteisiin ja vapautuu yöaikaan. (Kalnæs & Jelle 2015)

Ennen rakennusten energiatehokkuutta parannettiin tekemällä seinistä mahdollisimman paksut, toivoen sen eristävän lämmön rakennuksen sisälle ja kylmyyden jäävän ulkopuolelle. Eristemateriaalien kehittymisen myötä seinien paksuus pieneni. Laittamalla eristekerroksia päällekkäin saadaan pienemmät lämpöhäviöt, mutta seinien paksuus kasvaa eristekerroksien myötä. Seinämateriaalin eristävä vaikutus kasvaa materiaalin määrän myötä, mutta samalla kasvavat rakennuksen kustannukset sekä massa. Passiiviset keinot ovat tehokkaita kevytrakenteisiin rakennuksiin, joiden terminen massa on pieni (Kalnæs & Jelle 2015).

Yleisin materiaali rakennuksissa on betoni. Sitä käytetään niin perustuksissa kuin kantavissa rakenteissa. Betoni on kestävä, helposti muokattavaa sekä käyttäjälle turvallista. Nämä vain vahvistavat sen yleisyyttä rakennusmateriaalina. Betonia voidaan myös hyödyntää passiivisena keinona energiatehokkuuden parantamisessa. Eräässä tutkimuksessa (Cabeza et al. 2007) betonielementin joukkoon sekoitettiin faasimuutosmateriaalilla täytettyjä kapsseleita, ja sitä verrattiin saman muotoiseen ja kokoiseen betonielementtiin, missä ei ollut faasimuutosmateriaalia. Tutkimuksessa todettiin faasimuutosmateriaalia sisältävällä betonilla olevan eristävä vaikutus, jolloin lämmin ulkoilma ei vaikuttanut niin vahvasti rakennuksen sisäilmaan. Tämä todettiin, kun elementin pintalämpötila normaalissa betonielementissä mitattiin muutaman asteen korkeammaksi kuin faasimuutosmateriaalia sisältävässä betonissa. Jo kahden viikon mittausten jälkeen pystyttiin toteamaan, että faasimuutosmateriaaleja hyödyntämällä voidaan pienentää energiankulutusta. Huoneilman maksimilämpötila päivällä saatiin laskemaan yhdellä asteella ja yön minimilämpötila oli kaksi astetta lämpimämpi, kun betonissa hyödynnettiin faasimuutosmateriaalia. Päiväkohtaisen maksimilämpötilan ajankohta siirtyi kahdella tunnilla myöhemmäksi faasimuutosmateriaalia hyödyntävässä mittaushuoneessa. Faasimuutosmateriaalina käytettiin kaupallisessa käytössä olevaa Micronal®-nimistä materiaalia, jonka sulamispiste on 26 °C.

Faasimuutosmateriaalien käyttöä rakennusten energiatehokkuuden parantamisessa on tutkittu useiden vuosikymmenien ajan. Montrealissa, Kanadassa, on Athienitisin et al. (1997) tutkimuksessa tutkittu faasimuutosmateriaalien käyttöä kipsilevyissä rakennuksen sisäseinissä. Tällöin havaittiin, että faasimuutosmateriaalien käytöllä saatiin aurinkoisena päivänä jopa 6 °C matalampi seinän pintalämpötila verrattuna seinään, jossa ei käytetty faasimuutosmateriaaleja. Kipsiseinästä neljäsosa oli faasimuutosmateriaalina käytettyä butyylistearaattia. Huoneilmasta saatiin 10 MJ lämpöä varastoitua faasimuutosmateriaalilliseen kipsiin, jota testihuoneessa oli yhteensä 20 m². Myöhemmin tehdyssä tutkimuksessa (Shilei et al. 2006) faasimuutosmateriaaliin upotetulla kipsilevyllä havaittiin vastaavanlaisia tuloksia. Testihuoneessa tehdyissä mittauksissa todettiin faasimuutosmateriaalien ja kipsin yhdisteellä olevan myös eristäviä vaikutuksia. Tiili-seinän läpi johtuva lämpövirta saatiin pieneneväksi keskimäärin jopa 8 W/m². Lämpötilavaihtelua testihuoneessa saatiin vähennettyä yli asteella. Tutkimuksessa kipsilevyn huokosiin absorboitui faasimuutosmateriaalia 26 % levyn omasta painosta. Tutkimus tehtiin talviaikaan Koillis-Kiinassa. Kipsilevyissä käytettiin faasimuutosmateriaalina lauriini- ja kapriinihapon eutektista seosta.

Faasimuutosmateriaaleja voitaisiin asentaa erillisinä levyinä rakennuksen sisäseiniin. Ranskassa tehdyssä tutkimuksessa (Kuznik et al. 2008) todettiin, että sisäseiniin erikseen asennetuilla faasimuutosmateriaalista tehdyillä levyillä saadaan myös hyviä tuloksia. Levyjen paksuus oli 5 mm ja niiden massasta 60 % oli mikrokapseloitua faasimuutosmateriaalia. Faasimuutosmateriaalilevyillä pystyttiin pienentämään maksimi- ja minimilämpötilojen vaihteluväliä 4,7 °C.

Rakennuksissa ikkunoiden kautta lämpöä katoaa ja tulee lisää huomattavasti enemmän kuin seinien kautta, johtuen lasin paremmasta lämmönjohtavuudesta. Lasi on siis huonompi eriste kuin seinä. Esimerkiksi auringon valo lämmittää rakennuksen huoneilmaa, kun valo pääsee ikkunoista sisään. Kesäaikaan tästä saattaa aiheutua lisääntyvää viilennystarvetta rakennuksissa. Lokesh & Sharma (2009) päätyivät tutkimukseensa lopputulokseen, että faasimuutosmateriaaleja voitaisiin käyttää myös ikkunoissa tuomaan lisäeristystä. Tutkimuksessa mitattiin faasimuutosmateriaalin auringonvalon läpäisykykyä, jonka todettiin olevan parempi kuin vedellä. Faasimuutosmateriaali estää kuitenkin lämmön pääsyn huoneeseen sitomalla lämpöenergiaa auringonvalosta itseensä. Suuren latenttilämmön ja heikon lämmönjohtavuuden ansiosta faasimuutosmateriaali sopisi hyvin eristemateriaaliksi, esimerkiksi ikkunoihin. Kahden ikkunalasin välissä toimivana eristemateriaalina kuitenkin faasimuutosmateriaalia paremmin toimisi erilaiset lämpöä absorboivat kaasut (Ismail et al. 2008).

Latenttilämpöä voidaan hyödyntää seinien ja ikkunoiden lisäksi muun muassa lattiaissa. Lattiaan yhdistetyt faasimuutosmateriaalit toimivat passiivisissa keinoissa samalla periaatteella kuin seinissäkin. Tavoitteena tässäkin on huoneilman lämmönvaihtelun pienentäminen. Eräessä kiinalaisessa yliopistossa tehdyssä tutkimuksessa (Xu et al. 2005) tutkittiin faasimuutosmateriaaleilta vaadittavia ominaisuuksia, kun niitä hyödynnetään lattioissa. Tutkimuksessa lattiakerroksen alle asennettiin muotoon stabiloitu faasimuutosmateriaalikerros. Kerroksen latenttilämpöön vaikuttaa suuresti lattiakerroksen ja faasimuutosmateriaalikerroksen väliin jäävä ilmarako. Ilmatasku heikentää lämmön johtumista faasimuutosmateriaaliin luoden eristävän kerroksen, mikä heikentää latenttilämmön hyödyntämistä. Lämmön johtumisen ja faasimuutosmateriaalin tehokkaan hyödyntämisen puolesta metalli- ja laattalattia toimivat paremmin kuin puulattia. Tutkimuksen tuloksissa havaittiin, että lattiaan sopivan faasimuutosmateriaalin minimiarvo latenttilämmölle on 120 kJ/kg ja lämmönjohtavuudelle 0,5 W/(m·K), jotta huoneilman lämpötilavaihtelua saadaan pienennettyä. Lämpötilan vaihteluun vaikuttaa suuresti latenttilämmön suuruuden lisäksi materiaalin määrä, eli tässä tapauksessa muotoon stabiloidun faasimuutosmateriaalikerroksen paksuus. Tutkimuksessa todettiin, että paksuuden kasvattamisen hyöty putoaa merkittävästi, kun faasimuutosmateriaalikerroksen paksuus ylittää 20 mm. Faasimuutosmateriaalista 70 % oli parafiinia ja sitä tukemassa oli 15 % polyeteeniä ja 15 % styreenibutadieenikumia.

4.3 Aktiiviset sovelluskohteet

Aktiivisissa sovelluskohteissa energiaa siirretään mekaanisesti faasimuutosmateriaalista valmistettuun lämpö- tai kylmävarastoon (Ahmad et al. 2006). Tällaisia sovelluskohteita ovat esimerkiksi aurinkopaneeliin yhdistetty faasimuutosmateriaalia hyödynnettävä lämmön talteenottojärjestelmä tai lattialämmitys. (Zhu et al. 2009)

Aurinkopaneelit ovat yleisimmin käytettyjä apuvälineitä, kun puhutaan rakennusten aktiivisista sovelluskohteista. Aurinkoenergiaa on saatavilla paljon enemmän kuin mitä tällä hetkellä aurinkopaneeleilla ja -kennoilla hyödynnetään. Aurinko lämmittää rakennusta päivällä aiheuttaen lisääntyviä viilennyskustannuksia. Faasimuutosmateriaalia voidaan käyttää lämpövarastona, johon auringosta saatu ylimääräinen lämpöenergia johdetaan. Tällä järjestelyllä saadaan vähennettyä auringon lämmön päätymistä rakennuksiin, mikä vähentää viilennykseen kuluvan energian määrää. Lämpövarastoa pystytään hyödyntämään yöaikaan rakennuksen tilojen lämmittämiseen.

Turkissa tehdyssä tutkimuksessa (Kaygusuz & Ayhan 1999) aurinkopaneelit yhdistettiin siirtämään kerätty lämpöenergia metalliseen tankkiin, jossa on faasimuutosma-

terialla täytettyjä muoviputkiloita. Putkiloilla täytettyä tankkia voitiin käyttää tutkimuksessa lämpöpumpun lämpövarastona, tarkoituksena oli lämmitellä sähkömoottorilla varustetulla pumpulla 75 m² kokoista rakennusta. Tankin sisältämänä faasimuutosmateriaalina käytettiin kalsiumkloridiheksahydraattia ($CaCl_2 \cdot 6H_2O$) sen edullisuuden ja hyvän termisen stabiiliuden takia. Kalsiumkloridiheksahydraatin sulamispiste on 28°C. Tutkimuksessa aurinkoenergiaa hyödyntävällä lämpöpumpulla oli kolmeen mahdollista käyttötapaan lämpöpumpun lämmön lähteeseen perustuen. Lämmön lähteenä voidaan käyttää ulkoilmaa, jolloin saman aikaisesti aurinkoenergia johdetaan suoraan lämpövarastotankkiin. Tällöin lämpövarastoa täytetään rinnakkain lämpöpumpun kanssa. Lämmön lähteenä voidaan myös käyttää suoraan aurinkoenergiaa. Lämpövarastoon menee lämpöenergiaa vain, jos sitä jää yli lämpöpumpun tarpeen. Tällöin aurinkokeräimiä ja lämpöpumppua käytetään sarjassa. Lämpövarastoa ja ulkoilman lämpöä voidaan myös käyttää samanaikaisesti, jolloin lämpöpumppu ottaa lämmön siitä lähteestä, missä on suurempi lämpöeroin. Tutkimuksen järjestelyillä, voitiin säästää lämmitysenergiaa 9 390–12 056 kW verran riippuen systeemin käytötavasta.

Aktiivisissa keinoissa käytetään hyväksi lämpövarastoja. Samaan tapaan voidaan hyödyntää niin sanottuja kylmävarastoja, joissa on lämpö johdettu pois faasimuutosmateriaalista. Tämä mahdollistaa sen, että kylmävarasto sitoo itseensä lämmön viilentäen huoneilmaa. Tyagi et al. (2012) muutti lämpövarastosta kylmävaraston ikkunaan asennettavalla ilmanvaihtokoneella. Lämpövarastossa oli yhteensä 255 kg Kloridiheksahydraattia faasimuutosmateriaalina. Sen sulamispiste on 24 °C ja jäähmetympiste 29 °C. Ikkunaan asennetulla ilmanvaihtokoneella kesti 5 tuntia viilentää faasimuutosmateriaali jäähmetympisteestä sulamispisteeseen. Kylmävaraston tarkoitus oli viilentää testihuonetta, jota lämmitettiin erikokoisilla lämmittimillä. Ilman kylmävarastoa testihuoneen lämmitys 22 asteesta 29:ään asteeseen vei 20 minuuttia 1 kW kokoiselta lämmittimeltä. Kylmävaraston avulla huonelämpötilan nostoon lämmittimellä kesti jopa 9 tuntia. Lämmittimen tehoa nostamalla lämpötilan muutokseen kulunut aika pieneni. Kylmävarastolla oli mahdollista hidastaa 3 kW kokoisella lämmittimellä lämmitetyn huoneen lämpötilannousua yli 2 tuntia. Ilman faasimuutosvarastoa lämpötilan muutokseen meni 5 minuuttia, kun kylmävarastolla aika oli 2 h ja 30 min. Voidaan siis havaita, että kylmävaraston avulla on mahdollista vähentää viilennystarvetta asunnoissa useamman tunnin, ellei jopa koko päivän ajan.

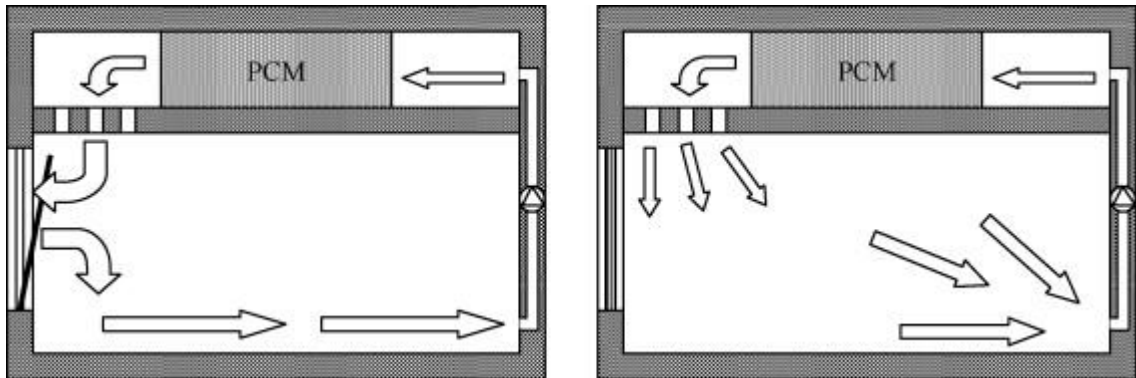
Rakennusten huoneilmaa viilennetään koneellisesti. Viileää ilmaa johdetaan huoneilmaan ja lämmin ilma poistetaan huoneesta. Huoneistoon menevä tuloilma viilennetään ilmanvaihtokoneistolla ennen huoneeseen ohjausta. Ilmanvaihtokoneistolla lämmin

ilma korvataan viileällä ja lämmin ilma ohjataan usein ulos rakennuksesta. Tätä hukkalämpöä voidaan käyttää hyväksi muualla rakennuksessa. Eräässä tutkimuksessa (Zhang et al. 2011) ilmastoinnin hukkalämpöä hyödynnettiin käyttöveden lämmittämiseen. Vettä ei käytetä säännöllisesti, joten hukkalämpö voidaan varastoida faasimuutosmateriaaliin. Kun lämmintä vettä tarvitaan, johdetaan se faasimuutosmateriaalin läpi, jolloin materiaali luovuttaa veteen siihen ohjatun ilmanvaihdon hukkalämmön. Tutkimuksessa saatiin parannettua kondenssilämpötilaa ja sitä myötä ilmastoinnin viilennyskapasiteettia ja kompressorin tehoa. Tämä tarkoittaa pienentyneitä kustannuksia huoneiston viilennyksessä ja käyttöveden lämmityksessä.

4.4 Vapaa jäähdytys

Rakennuksia voidaan viilentää vapaalla jäähdytyksellä joko veden tai ilman avulla. Veden avulla viilennys tapahtuu usein haihdutusjäähdytintorneilla, joihin lämpö siirtyy suoraan huoneilmasta. Tornissa vedestä haihtuu lämpö, joka johdetaan ulos rakennuksesta. Ilman vapaassa jäähdytyksessä huoneilmaa kierrätetään ja yöaikaan ilma vaihdetaan raikkaaseen ulkoilmaan. Faasimuutosmateriaalilla voidaan siis viilentää huoneilman lämpötilaa hyödyntäen yöajan viileitä lämpötiloja rakennuksen ulkopuolelta. Niimestään huolimatta jäähdytyksessä ilma tai vesi ei kulje vapaasti vaan molempien aineiden suunta on pakotettu tiettyyn suuntaan. Koneellisen ilmanvaihdon avulla ulkoa saatu lämmin ilma johdetaan yöllä viilennettyjen faasimuutosmateriaalikapseleiden lävitse. (Zhu et al. 2009) Vapaa jäähdytys vähentää jäähdytysenergian tarvetta, sillä faasimuutosmateriaalin avulla saadaan pitkitettyä viilennystarpeen aloittamista.

Vapaassa jäähdytyksessä faasimuutosmateriaali sijoitetaan joko ikkunan tai seinätuulettimien mukaan tai asennetaan huoneiston keskusilmanvaihdon yhteyteen. Kuvassa 5 on havainnollistettu faasimuutosmateriaalin hyödyntäminen vapaassa jäähdytyksessä. Yöaikaan huoneisto sekä faasimuutosmateriaali jäähdytetään viileällä ulkoilmalla haluttuun lämpötilaan. Päiväsaikaan huoneen lämpötila nousee ulkolämpötilan, huoneisto olevien ihmisten ja laitteiden käytön vuoksi. Lämmennyt huoneilma ohjataan ilmanvaihdon avulla faasimuutosmateriaalien lävitse, jolloin ilma luovuttaa lämpöenergiaa faasimuutosmateriaalille ja ilman lämpötila laskee. Viileä ilma ohjataan takaisin huoneistoon. (Butala & Stritih 2009) Vapaan jäähdytyksen toiminnan tehokkuuteen vaikuttaa enemmän yön ja päivän välinen lämpötilaero kuin päivän keskilämpötila (Takeda et al. 2004).



Kuva 5 Havainnekuva vapaasta jäädytyksestä. Kuvassa vasemmalla huoneistoa ja faasimuutosmateriaalia jäädytetään yöaikaan. Kuvassa oikealla huoneistoa viilennetään päiväsaikaan. (Butala & Stritih 2009)

Viikon mittaisessa tutkimuksessa havaittiin, että vapaalla jäädytyksellä voidaan varastoida viilennykseen tarvittavaa energiaa faasimuutosmateriaaliin. Tutkimuksessa käytetty faasimuutosmateriaali oli parafiini RUBITHERM® RT 20, jonka sulamislämpötila on 22 °C ja latenttilämpö on 172 kJ/kg. Yhteensä viilennykseen käytettävää energiaa saatiin varastoitua 743,9 kJ:a, josta 732,6 kJ varastoitui 3,6 kg faasimuutosmateriaalia. (Butala & Stritih 2009)

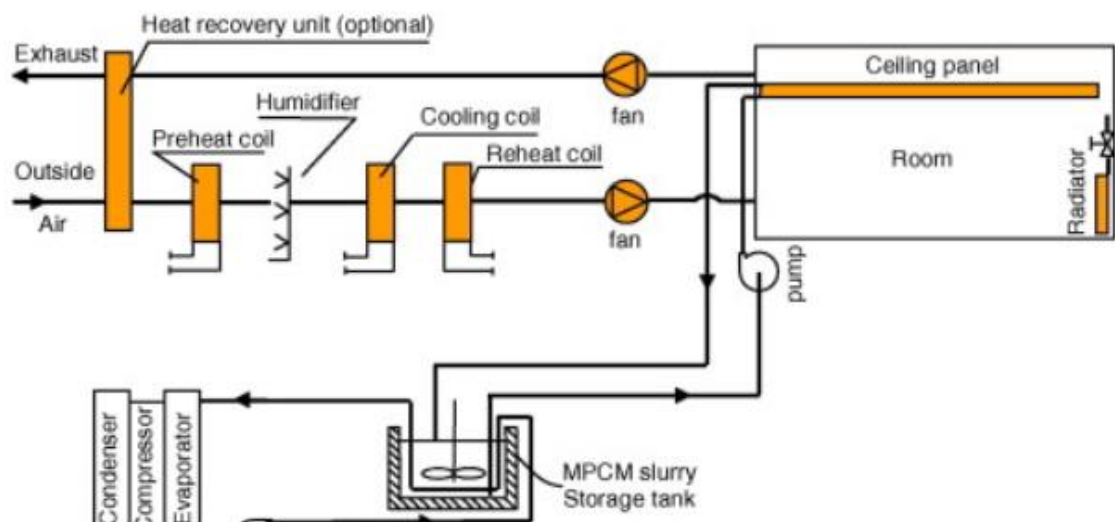
4.5 Huippukuorman siirto

Sähköä kulutetaan enemmän päiväsaikaan verrattuna yöaikaan. Päiväsaikaan suuri osa ihmisistä työskentelee, valmistaa ruokaa ja käyttää sähkölaitteitaan. Tämä johtaa sähköhuippukulutuksen piikin muodostumiseen päivällä. Monien rakennuksien päiväsaikainen viilennys ja ilmanvaihto kuluttaa energiaa. Yöaikaan sähkölaitteiden käyttö on vähäisempää, ja rakennusten ilmanvaihdon tarve on pienempi johtuen pienemmästä ihmismäärästä. Öisin saattaa olla jopa ylitarjontaa sähköstä. Monissa maissa on suuren tarjonnan takia suuriakin eroja sähköjen hinnoissa yö- ja päiväsaikaan.

Huippukuorman siirto (engl. peak load shifting) perustuu siihen, että siirretään sähkönkulutusta pois kalliimmilta tunneilta. Kalliimmilla tunneilla monet muutkin kuluttavat sähköä, jolloin sähkön kysyntä on suurempaa. Kulutusta pyritään siirtämään niille vuorokauden tunneille, joilla sähkön hinta on halvempaa ja kulutus pienempää, eli useimmiten yöaikaan. Huippukuorman ajankohtaa voidaan siirtää tuottamalla lämpöenergiaa sähköllä ja johtamalla se lämpövarastoon, josta lämpöenergia voidaan hyödyntää yöaikaan esimerkiksi talvella rakennuksen lämmittämiseen. Huippukuormaa voidaan kesäaikaan myös siirtää yöllä ulkoilmasta saatavalla viilennykseen tarkoitetulla energialla.

(Zhu et al. 2009) Madisonin kaupungissa Wisconsinissa, Yhdysvalloissa (Peippo et al. 1991, Khudhair & Farid 2004 mukaan) pystyttiin faasimuutosmateriaalien avulla siirtämään energiankulutusta jopa 4 GJ verran halvemman sähkön tunneille vuodessa. Tämä tarkoittaa tutkimuksessa käytetyille 120 m² kokoiselle talolle 15 % vuotuista säästöä energiakustannuksissa.

Päiväsaikaan huoneilma lämpenee ihmisten tuottaman lämmön, koneiden jäähdytyksen ja ulkoilman korkean lämpötilan vuoksi. Lämmin ilma nousee ylöspäin, jolloin on loogista poistaa se rakennuksesta katon kautta rakennusta viilennettäessä. Tätä kutsutaan kattoviilennykseksi (cooled ceiling, CC), jossa korvaava jäähdytetty ilma tuodaan huoneeseen seinän alaosasta. Hong Kongissa toteutetussa tutkimuksessa (Wang & Niu 2009) tähän yhdistettiin mikrokapseloidusta faasimuutosmateriaalista tehty massa, jota hyödynnettiin lämpövarastona. Kapselit upotettiin nesteeseen, joka ei muuta faasiaan. Testihuoneen kattoon asennettiin kattopaneelit, joissa hyödynnetään vettä lämmön johdinaineena. Kattopaneeleista johdetaan huoneen ylimääräinen lämpö faasimuutosmateriaalimassan avulla lämpövarastoon eli tankkiin, jossa on suurempi määrä edellä mainittua massaa. Tankissa oleva sekoitin sekoittaa lämmön tankissa tasaisesti, jolloin tankista pumpataan viileämpi massa takaisin kattopaneeleihin kuvan 6 mukaisesti. Tankissa oleva massa viilennetään yöaikaan sähköisesti. Tutkimuksessa havaittiin, että testikohteessa sähkönkulutus päiväsaikaan väheni yli 30 %. Yösähkön hinta on usein puolet tai kolmasosa päiväsähkön hinnasta, joten taloudellinen säästö on merkittävä.



Kuva 6 Kattoviilennyksen ja faasimuutosmateriaalista valmistetun massan yhteiskäyttö rakennuksen viilennyksessä (Wang & Niu 2009).

Huoneiden kattojen lisäksi faasimuutosmateriaalia voidaan hyödyntää myös lattioissa. Talviaikaan rakennuksia saatetaan lämmittää osittain tai kokonaan sähköllä, joka

saattaa olla ympäristöystävällisempää kuin öljy- tai kaukolämmitys riippuen sähkön tuotantomuodosta. Lämpövastuksia voidaan asentaa lattioihin, joista lämpö saadaan johdettua huoneilmaan. Muotoon stabiloituja faasimuutosmateriaalilaattoja voidaan hyödyntää lämpövarastona lämpövastuksien ja lattian välissä. Eräässä Kiinassa tehdyssä tutkimuksessa (Lin et al. 2007) saatiin tällä tavalla siirrettyä kevytrakenteisen testihuoneen sähkönkulutuspiikki kokonaan halvempaan yösähköaikaan. Testihuoneessa lattian eristyksen päälle laitettiin lämmittimet, jotka lämmittivät 15 mm paksuista muotoon stabiloitua faasimuutosmateriaalikerrosta. Faasikerros koostui 75 % parafiinista ja 25 % polyeteenistä. Yöllä faasimuutosmateriaali lämmitettiin lämmittimellä ennalta määrättyyn lämpötilaan. Kun päivällä huoneilman lämpötila laski, saatiin lattian ja faasimuutosmateriaalin välissä olevasta 50 mm paksuisesta ilmaraosta konvektion avulla tarvittava lämpö lämpövarastosta huoneeseen. Tutkimuksessa tekniikka havaittiin käyttökelpoiseksi tavallisiin rakennuksiin ja erilaisiin ilmastoihin valitsemalla oikea sulamispiste faasimuutosmateriaalille sekä sopiva ilman nopeus lämmön kuljetukseen.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin faasimuutosmateriaalien käyttöä erilaisissa rakentamisen sovelluskohteissa. Tavoitteena materiaalien käytöllä on parantaa rakennuksen energiatehokkuutta. Samalla perehdyttiin faasimuutosmateriaalin toiminnan taustoihin, itse faasimuutokseen ja lämmön varastointiin sekä faasimuutosmateriaalin ainesosiin.

Energian varastointi lämpönä perustuu materiaalin tai aineen sitomaan lämpöenergiaan. Lämmön varastointi latenttilämpönä on moninkertaisesti tehokkaampaa aineen massa- ja tilavuuteen nähden, kuin lämmön varastointi tuntuvana lämpönä. Latenttilämmön varastoinnissa voidaan varastoida suuri määrä energiaa pieneen massaan ilman suuria lämpötilaeroja. Olomuotoa muuttaessa kappale sitoo tai vapauttaa paljon energiaa. Tätä energiaa faasimuutosmateriaaleissa hyödynnetään. Faasimuutosmateriaaleja voidaan siis käyttää tehokkaina lämpö- tai kylmävarastoina. Materiaaliin sidotaan energiaa nostamalla sitä ympäröivä lämpötila korkeammaksi kuin materiaalin sulamispiste.

Faasimuutosmateriaaleille sovelluskohteiden kannalta hyviä ominaisuuksia ovat suuri latenttilämpö ja kemiallinen stabiilius. Kemiallisesti stabiileilla faasimuutosmateriaaleilla on usein myös pidempi käyttöikä. Lämmönjohtavuus on erilainen eri faasimuutosmateriaaleilla. Joissain sovelluskohteissa tarvitaan hyvää lämmönjohtavuutta, jolloin energia varastoituu faasimuutosmateriaaliin tai vapautuu siitä nopeasti. Huono lämmönjohtavuus saattaa olla hyväkin asia, sillä se mahdollistaa pidemmän sulamisen ja jäähmettymisen syklin. Pidempi sykli mahdollistaa hitaan lämmön vapautumisen, mikä voi olla joissakin sovelluskohteissa hyödyllisempää. Faasimuutosmateriaaleista tekee tehokkaan niiden pienempi massan tarve lämpöenergiaa varastoitaessa. Niillä kuitenkin tulee olla likimain olematon tilavuuden muutos faasimuutoksessa. Sovelluskohteeseen valittaessa faasimuutosmateriaalin tärkein verrattava ominaisuus on niiden sulamislämpötila. Sulamislämpötilan ollessa oikeanlainen saadaan faasimuutosmateriaalista suurin hyöty.

Faasimuutosmateriaalit voidaan jakaa kolmeen luokkaan: Orgaanisiin, epäorgaanisiin ja eutektisiin seoksiin. Orgaaniset materiaalit koostuvat parafiineista ja ei-parafiineista materiaaleista. Parafiinit ovat suosittuja erilaisissa rakennuskohteissa, sillä ne ovat luotettavia ja ennalta-arvattavia. Parafiinit on helppo muokata sovelluskohteisiin sopiviksi, ja kaiken lisäksi ne ovat edullisia. Parafiineilla on myös huono lämmönjohtavuus.

Tästä syystä ne ovat suosittuja rakennusten sovelluksista, sillä esimerkiksi lämpöä tarvitaan yöllä pieni määrä pidemmän aikaa. Ei-parafiineilla materiaaleilla on kaksi ryhmää: rasvahapot ja muut ei-parafiinit. Rasvahapot soveltuvat faasimuutosmateriaaleiksi paremmin kuin muut ei-parafiinit, sillä rasvahapot ovat kemiallisesti stabiileja ja myrkyttömiä. Rasvahappojen happoluonteen takia niillä on suurempi latenttilämpö kuin parafiineilla. Parafiineja suositaan kuitenkin enemmän, sillä ne ovat huomattavasti edullisempia kuin rasvahapot.

Epäorgaanisiin faasimuutosmateriaaleihin kuuluvat metallit ja suolahydraatit. Suolahydraatit muodostavat veden kanssa kidemäisen rakenteen, jossa sulaminen tapahtuu kuivumalla. Suolahydraattien hyviä puolia ovat edullisuus, hyvä lämmönjohtavuus sekä suuri kapasiteetti varastoida lämpöä. Niitä on kuitenkin vaikeampia käyttää rakennuksissa, sillä ne tarvitsevat vettä jähmettyäkseen. Suolahydraattien ongelmana on myös nestemäinen alijäähtyminen ja faasisegregaatio eli ytimen vaillinainen kiteytyminen tai sulaminen. Metalleilla on suuri kyky varastoida lämpöä, mutta niiden käyttöä hankaloittaa korkeat sulamislämpötilat ja suuri massa.

Eutektiset faasimuutosmateriaalit ovat seoksia, joissa on useampaa, usein kahta, muuta faasimuutosmateriaalia. Seoksen sulamislämpötila on matalampi, kuin seokseen sekoitetuilla materiaaleilla. Näin voidaan madaltaa esimerkiksi metallien sulamislämpötiloja. Eutektisen seoksen komponenttien suhde on tärkeä, sillä vain tietyllä suhteella saadaan molemmat aineet sulamaan samassa lämpötilassa.

Faasimuutosmateriaaleja voidaan hyödyntää passiivisilla keinoilla lisäämällä rakennuksen termistä massaa. Tämä tarkoittaa faasimuutosmateriaalien yhdistämistä esimerkiksi kipsilevyyn tai betoniin. Jopa ikkunoihin voitaisiin käyttää faasimuutosmateriaaleja. Yhdistettynä muihin rakennusmateriaaleihin faasimuutosmateriaali ei vie ylimääräistä tilaa asunnon sisätiloista tai lisää paksuutta ulkoseiniin. Seinien tai kattorakenteiden massakaan ei nouse merkittävästi, jos niiden omasta painosta osa korvataan faasimuutosmateriaalilla. Passiivisten keinojen on todettu toimivan parhaiten, kun yön ja päivän välinen lämpötilaero on tarpeeksi suuri. Aktiivisissa keinoissa hyödynnetään faasimuutosmateriaaleja mekaanisessa lämmönsiirrossa. Aurinkopaneelien yhteyteen asennettuun faasimuutosmateriaalista tehtyyn lämpövarastoon voidaan johtaa aurinkopaneelien lämpöenergiaa. Tätä lämpöenergiaa voidaan hyödyntää rakennuksissa yöaikana tapahtuvaan lämmitykseen. Samalla periaatteella voidaan faasimuutosmateriaaleja hyödyntää lämpöpumppujen lämpövarastona. Huoneilman lämpötilan noustessa päivällä, voidaan siitä saatua hukkalämpöä varata lämpövarastoon. Tällä lämpövarastolla voidaan lämmittää esimerkiksi käyttövettä, kun sitä tarvitaan.

Faasimuutosmateriaalin hyödyntäminen vapaassa jäähdytyksessä perustuu viileän yöilman varastointiin materiaaliin kylmävarastoksi, josta huoneilmaa viilennetään päiväsaikaan. Viileän ilman varastoinnilla saatetaan saada poistettua kokonaan viilennystarve päivisin tai siirrettyä viilennystarpeen aloitusta myöhemmäksi. Huippukuorman siirrossa sähkön kulutus siirretään halvimmille tunneille, jolloin koneellisesti tuotetaan lämpöä tai kylmää varastoon faasimuutosmateriaaliin. Lämpö- tai kylmävarastoja voidaan hyödyntää katto- tai lattiarakenteissa.

LÄHTEET

- AHMAD, M., BONTEMPS, A., SALLÉE, H. and QUENARD, D., 2006. Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material. *Energy and Buildings*, **38**(6), pp. 673-681.
- ATHIENITIS, A.K., LIU, C., HAWES, D., BANU, D. and FELDMAN, D., 1997. Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage. *Building and Environment*, **32**(5), pp. 405-410.
- BALASUBRAMANIAN, G., GHOMMEM, M., HAJJ, M.R., WONG, W.P., TOMLIN, J.A. and PURI, I.K., 2010. Modeling of thermochemical energy storage by salt hydrates. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **53**(25), pp. 5700-5706.
- BUDDHI, D., SAWHNEY, P., SEGHAL, N. and BANSAL, A., 1987. A simplification of the differential thermal analysis method to determine the latent heat of fusion of phase change materials, pp. 1601-1605.
- BUTALA, V. and STRITIH, U., 2009. Experimental investigation of PCM cold storage. *Energy and Buildings*, **41**(3), pp. 354-359.
- CABEZA, L.F., CASTELLÓN, C., NOGUÉS, M., MEDRANO, M., LEPPERS, R. and ZUBILLAGA, O., 2007. Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. *Energy and Buildings*, **39**(2), pp. 113-119.
- CALLISTER WILLIAM and RETHWISCH DAVID, 2011. *Materials Science and Engineering*. Eighth edition edn. Asia: John Wiley & Sons Inc.
- CAO, L., TANG, Y. and FANG, G., 2015. Preparation and properties of shape-stabilized phase change materials based on fatty acid eutectics and cellulose composites for thermal energy storage. *Energy*, **80**, pp. 98-103.
- ÇENGEL YUNUS and BOLES MICHAEL, 2011. *An Engineering Approach*. 7th Edition in SI Units edn. Singapore: McGraw-Hill.
- DIECKMANN JENS, 2006-last update, Latent heat storage in concrete. Available: http://www.eurosolar.org/new/pdfs_neu/Thermal/IRES2006_Dieckmann.pdf, Accessed: [26.4., 2020].
- DINCER IBRAHIM and ROSEN MARC, 2010. *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*. John Wiley & Sons.
- FARAJ, K., KHALED, M., FARAJ, J., HACHEM, F. and CASTELAIN, C., 2020. Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **119**, pp. 109579.
- FAUZI, H., METSELAAR, H.S.C., MAHLIA, T.M.I. and SILAKHORI, M., 2014. Sodium laurate enhancements the thermal properties and thermal conductivity of eutectic fatty acid as phase change material (PCM). *Solar Energy*, **102**, pp. 333-337.
- GUYER ERIC, 1989. *Handbook of Applied Thermal Design*. United states of America: McGraw-Hill. Section 6, chapter 1, p. 2.
- HUGGINS, R., 2010. *Energy Storage*. 1 edn. New York, NY: Springer US.

- INABA, H. and TU, P., Evaluation of thermophysical characteristics on shape-stabilized paraffin as a solid-liquid phase change material. *Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Okayama University*.
- ISMAIL, K.A.R., SALINAS, C.T. and HENRIQUEZ, J.R., 2008. Comparison between PCM filled glass windows and absorbing gas filled windows. *Energy and Buildings*, **40**(5), pp. 710-719.
- KALNÆS, S.E. and JELLE, B.P., 2015. Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Energy and Buildings*, **94**, pp. 150-176.
- KAYGUSUZ, K. and AYHAN, T., 1999. Experimental and theoretical investigation of combined solar heat pump system for residential heating. *Energy Conversion and Management*, **40**(13), pp. 1377-1396.
- KHUDHAIR, A.M. and FARID, M.M., 2004. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. *Energy Conversion and Management*, **45**(2), pp. 263-275.
- KOHLHASE, J.E., 2013. The new urban world 2050: perspectives, prospects and problems. *Regional Science Policy & Practice*, **5**(2), pp. 153-165.
- KUZNIK, F., VIRGONE, J. and ROUX, J., 2008. Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation. *Energy and Buildings*, **40**(2), pp. 148-156.
- LIN, K., ZHANG, Y., DI, H. and YANG, R., 2007. Study of an electrical heating system with ductless air supply and shape-stabilized PCM for thermal storage. *Energy Conversion and Management*, **48**(7), pp. 2016-2024.
- LOKESH JAIN and SHARMA, S.D., 2009. Phase change materials for day lighting and glazed insulation in buildings. *Journal of Engineering Science and Technology*, pp. 322-327.
- PEIPPO, K., KAURANEN, P. and LUND, P.D., 1991. A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating. *Energy and Buildings*, **17**(4), pp. 259-270.
- RAJ, V.A.A. and VELRAJ, R., 2010. Review on free cooling of buildings using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(9), pp. 2819-2829.
- RAOUX, S. and WUTTIG, M., 2009. *Phase Change Materials Science and Applications*. 1 edn. New York, NY: Springer US.
- REGIN, A.F., SOLANKI, S.C. and SAINI, J.S., 2008. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **12**(9), pp. 2438-2458.
- ROSEN, M., 2012. *Energy Storage*. New York: Nova Science Publishers, Inc.
- SARI, A., 2006. Eutectic mixtures of some fatty acids for latent heat storage: Thermal properties and thermal reliability with respect to thermal cycling. *Energy Conversion and Management*, **47**(9), pp. 1207-1221.
- SHARMA, A., TYAGI, V.V., CHEN, C.R. and BUDDHI, D., 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**(2), pp. 318-345.
- SHILEI, L., NENG, Z. and GUOHUI, F., 2006. Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter. *Energy and Buildings*, **38**(1), pp. 18-24.

- SINGH, N.B., DAS, S.S. and SINGH, A.K., 2000. *Physical Chemistry, Volume 2*. Dar-yaganj: New Age International Ltd.
- TAKEDA, S., NAGANO, K., MOCHIDA, T. and SHIMAKURA, K., 2004. Development of a ventilation system utilizing thermal energy storage for granules containing phase change material. *Solar Energy*, **77**(3), pp. 329-338.
- TANG YANRONG, GAO DAOLING, GUO YAFEI, WANG SHIQIANG and DENG TIAN-LONG, 2011. *Applied Mechanics and Materials*. Switzerland: Trans Tech Publications.
- TYAGI, V.V., BUDDHI, D., KOTHARI, R. and TYAGI, S.K., 2012. Phase change material (PCM) based thermal management system for cool energy storage application in building: An experimental study. *Energy and Buildings*, **51**, pp. 248-254.
- TYÖ- JA ELINKEINOMINISTERIÖ, Energiategokkuus viitattu, [20.2., 2020], saatavilla <https://tem.fi/energiategokkuus> .
- WANG, X. and NIU, J., 2009. Performance of cooled-ceiling operating with MPCM slurry. *Energy Conversion and Management*, **50**(3), pp. 583-591.
- XU, X., ZHANG, Y., LIN, K., DI, H. and YANG, R., 2005. Modeling and simulation on the thermal performance of shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings. *Energy and Buildings*, **37**(10), pp. 1084-1091.
- ZHANG, X., YU, S., YU, M. and LIN, Y., 2011. Experimental research on condensing heat recovery using phase change material. *Applied Thermal Engineering*, **31**(17), pp. 3736-3740.
- ZHOU, D., ZHAO, C.Y. and TIAN, Y., 2012. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, **92**, pp. 593-605.
- ZHU, N., MA, Z. and WANG, S., 2009. Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: A review. *Energy Conversion and Management*, **50**(12), pp. 3169-3181.