



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Siiri Lapila

# Lämpöenergian varastointi rakennuk- sissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

22.4.2020

Tekijä Otsikko	Siiri Lapila Lämpöenergian varastointi rakennuksissa
Sivumäärä Aika	34 sivua 22.4.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine	energiantuotantomenetelmät
Ohjaajat	lehtori Hannu Turunen kehityspäällikkö Olli Nummelin
<p>Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia olemassa olevia ja kehitteillä olevia lämpöenergian varastointitekniikoita rakennuksiin sekä arvioida niiden soveltuvuutta ja valmiusastetta käyttöönottoa varten. Työn alussa tutustuttiin lämpöenergian varastointityyppeihin, minkä jälkeen käytiin läpi opinnäytetyöhön valitut varastointitekniikat ja vertailtiin niiden ominaisuuksia keskenään. Työn lopussa tarkasteltiin vielä lämpöenergian varastoinnin merkitystä ilmastotavoitteiden saavuttamisessa. Työssä perehdyttiin lämpöenergian varastointia koskevaan kirjallisuuteen sekä internetistä löytyvään aineistoon. Opinnäytetyö tehtiin yhteistyössä Caverion Suomi Oy:n kanssa.</p> <p>Opinnäytetyön perusteella voitiin todeta, että lämpöenergian varastointia faasimuutosmateriaaleihin pidetään tällä hetkellä kiinnostavimpana varastointiratkaisuna rakennuksissa. Faasimuutosmateriaaleja sekä niistä kehiteltyjä tuotteita on myös kaupallisesti saatavilla. Haasteita faasimuutosmateriaalien käytössä kuitenkin ilmenee ja siksi tutkimusten tulisi keskittyä erityisesti lämmönsiirtonopeuksien kasvattamiseen ja materiaalien pitkän ajan stabiiliuteen sekä investointikustannusten laskemiseen. Faasimuutosmateriaalien käyttö soveltuu sekä asuinrakennuksiin että toimisto- ja liikerakennuksiin.</p> <p>Tulevaisuuden kannalta lämpöenergian varastointi tulee olemaan merkittävässä roolissa energiajärjestelmien tasapainon hallinnassa, etenkin kun uusiutuvan energian käyttöä tullaan lisäämään. Tämän lisäksi lämpöenergian varastointi parantaa olemassa olevan rakennuskannan energiatehokkuutta ja tukee samalla ilmastotavoitteiden saavuttamista.</p>	
Avainsanat	lämpöenergian varastointi, rakennukset, uusiutuva energia, faasimuutosmateriaalit

Author Title	Siiri Lapila Thermal Energy Storage for Buildings
Number of Pages Date	34 pages 22 April 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Energy and Environmental Engineering
Professional Major	Energy Production Technology
Instructors	Hannu Turunen, Senior Lecturer Olli Nummelin, Development Manager
<p>The aim of this thesis was to study the existing thermal energy storage systems for buildings and those currently being developed and evaluate their feasibility for different building types. The thesis focused on sensible, latent and thermochemical storage systems. Environmental and climate impacts of a thermal energy storage were also analyzed. At the end of the thesis, five thermal energy storage technologies were introduced, and their characteristics were compared to one another. The thesis was produced in collaboration with Caverion Suomi Oy.</p> <p>On the basis of the results, the most promising storage technologies for buildings are phase change materials. Currently, there are several commercially available products both for residential and commercial building applications. Although, phase change materials possess multiple advantages for building use, there are still a few challenges to overcome. Therefore, further research is required to increase heat transfer rates, to develop the long-term stability of the materials and to reduce investment costs.</p> <p>Thermal energy storage plays a key role in energy management, especially when the utilization of renewable energy is increasing in the future. Furthermore, thermal energy storage improves energy efficiency of the existing buildings stock and simultaneously it supports environmental, energy and climate targets.</p>	
Keywords	thermal energy storage, buildings, renewable energy sources, phase change materials

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Työn tausta	1
1.2	Työn tavoite ja rajaus	2
1.3	Työn menetelmä ja rakenne	2
2	Lämpöenergian varastointi	3
2.1	Tuntuvan lämpöenergian varastointi	4
2.2	Latentin lämpöenergian varastointi	5
2.2.1	Orgaaniset materiaalit	6
2.2.2	Epäorgaaniset materiaalit	7
2.2.3	Eutektiset seokset	7
2.3	Termokemiallisen lämpöenergian varastointi	8
3	Lämpöenergian varastointi rakennuksissa	9
3.1	Aktiiviset ja passiiviset varastointijärjestelmät	9
3.2	Varastointitekniikan valintaperusteet	10
4	Varastointitekniikoiden soveltaminen rakennuksissa	13
4.1	Lämpöenergian varastointi talon rakenteisiin	13
4.2	Lämpöenergian varastointi veteen	15
4.3	Termoaktivoidut rakennusjärjestelmät	17
4.4	Faasimuutosmateriaaleihin varastointi	19
4.5	Termokemiallisiin materiaaleihin varastointi	21
5	Varastointitekniikoiden vertailu ja päätelmät	23
6	Lämpöenergian varastoinnin vaikutus ilmastotavoitteisiin	26
7	Yhteenveto	28
	Lähteet	29

## Lyhenteet

J	Joule. Energian yksikkö.
K	Kelvin. Lämpötilan yksikkö.
LHS	Latent heat storage. Latentin lämmön varastointi.
LVI	Lämpö, vesi ja ilma. LVI-järjestelmillä tarkoitetaan kiinteistön ja siihen liittyvien tilojen teknisten järjestelmien ja laitteiden muodostamaa kokonaisuutta.
PCM	Phase change material. Faasimuutosmateriaali.
SHS	Sensible heat storage. Tuntuvan lämmön varastointi.
TABS	Thermally activated building systems. Termoaktivoidut rakennusjärjestelmät.
TES	Thermal energy storage. Lämpöenergian varastointi.
TESS	Thermal energy storage systems. Lämpöenergian varastointijärjestelmät.
THS	Thermochemical heat storage. Termokemiallisen lämmön varastointi.

# 1 Johdanto

## 1.1 Työn tausta

Energiankulutuksen nopea kasvu on herättänyt huolta ilmastonmuutoksesta ja luonnonvarojen riittävydestä. Rakennusten ja rakentamisen osuus energiankulutuksesta on huomattava. Kansainvälisen energijärjestön (International Energy Agency) mukaan rakennussektori on suurin energiankuluttaja ja sen osuus maailman primäärienergian kokonaiskulutuksesta on noin 40 % ja kokonaishiilidioksidipäästöistä 24 % [1, s. 1].

Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi ja päästöjen vähentämiseksi tarvitaan kestäviä ratkaisuja ja muutoksia koko energijärjestelmään. Erityisesti olemassa olevan rakennuskannan energiatehokkuudella on suuri merkitys näiden tavoitteiden saavuttamisessa. Matkalla kohti kestävää, ympäristöystävällistä ja vähähiilistä rakennussektoria, lämpöenergian varastointi tarjoaa laajan valikoiman mahdollisuuksia ja hyötyjä energiankulutuksen sekä kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi. [2; 3.]

Opinnäytetyö tehdään toimeksiantona Caverion Suomi Oy:lle. Yritys on kiinnostunut lähitulevaisuudessa hyödynnettävissä olevista rakennuksiin soveltuvista energian varastointitekniikoista. Lämpöenergian varastointi tarjoaa ratkaisuja moniin haasteisiin, joita energianmurros tuo mukanaan.

Caverion suunnittelee, toteuttaa, huoltaa ja ylläpitää käyttäjäystävällisiä ja energiatehokkaita teknisiä ratkaisuja kiinteistöille, teollisuudelle ja infrastruktuurille Pohjois-, Keski- ja Itä-Euroopassa. Caverion muotoutui vuonna 2013 itsenäiseksi konsernikseen kiinteistötekniisten ja teollisuuden palveluiden irtautuessa YIT-konsernista. [4.] Caverion jakautuu kahteen liiketoimintayksikköön: Palveluihin ja Projekteihin. Palvelut koostuvat teknisestä huollosta, kunnossapidosta, kiinteistöjohtamisesta, älykkäistä ratkaisuista sekä energia- ja asiantuntijapalveluista. Projekteihin sen sijaan kuuluu talotekniikkaprojektit peruskorjattavista kiinteistöistä aina uusiin kiinteistöihin. Kokonaisuudessaan Caverionilla työskentelee noin 16 000 henkilöä 11 eri maassa. Yrityksen pääkonttori sijaitsee Vantaalla. [5.]

## 1.2 Työn tavoite ja rajaus

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää rakennuksiin soveltuvia jo olemassa olevia sekä kehitteillä olevia lämpöenergian varastointitekniikoita ostetulle energialle sekä rakennuksen mahdolliselle omalle ylituotannolle. Tarkoituksena on myös arvioida näiden tekniikoiden soveltuvuutta ja valmiusastetta käyttöönottoa varten. Työssä keskitytään lämpöenergian varastointiin rakennuksissa, joten varastointitekniikoiden syvällisemmässä tarkastelussa ulkopuolelle jätetään rakennusten välittömässä läheisyydessä olevat lämpövarastot.

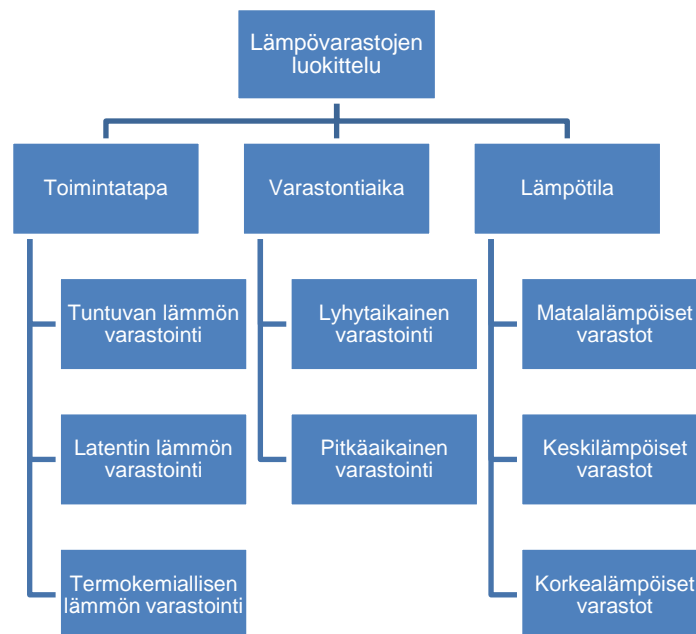
## 1.3 Työn menetelmä ja rakenne

Opinnäytetyö tehdään selvitystyönä. Työssä perehdytään lämpöenergian varastointia koskevaan kirjallisuuteen sekä internetistä löytyvään aineistoon. Luvussa kaksi esitellään lämpöenergian varastoinnin luokittelu eri ominaisuuksien mukaan sekä tutustutaan tuntuvan, latentin ja termokemiallisen varastoinnin toimintaperiaatteisiin. Kolmas luku johdattelee lämpöenergian varastointiin rakennuksissa ja neljännessä luvussa käydään läpi opinnäytetyöhön valitut varastointitekniikat. Viidennessä luvussa vertaillaan ja arvioidaan läpikäytyjä tekniikoita. Vielä ennen yhteenvetoa tarkastellaan lämpöenergian varastoinnin vaikutuksia ympäristö- ja ilmastotavoitteiden saavuttamisessa.

## 2 Lämpöenergian varastointi

Lämpöenergian varastointi on yksi perinteisimmistä energian varastointitavoista. Lämpöenergian varastointia on tutkittu jo kauan, mutta uusia menetelmiä tutkitaan ja kehitetään koko ajan lisää. Syynä tälle on lisääntyvä varastointitarve. [6, s. 11.] Energian varastointi tarkoittaa energian ottamista talteen myöhempää käyttöä varten ja varastointisykli koostuu energian lataamisesta, varastoimisesta ja purkamisesta [7, s. 1].

Lämpöenergian varastointi (Thermal energy storage eli TES) jaetaan toimintatavan mukaan kolmeen eri tyyppiin: tuntuvan lämmön, latentin lämmön ja termokemiallisen lämmön varastointiin. Varastointitekniikat perustuvat erilaisten kemiallisten ja fysikaalisten ilmiöiden hyödyntämiseen. Lämpöenergian varastointi voidaan myös jakaa varastointiajan mukaan, joko lyhyt- tai pitkäaikaisiin varastoihin. Lyhyen ajan lämpövarastoja käytetään muutamista tunneista päivän pituisten huippukuormien hallintaan ja hyödyntämään eri vuorokaudenaikojen energiakustannusten hintaeroja. Pitkän ajan varastoja eli kausivarastoja käytetään hukkalämmön ja vuodenaikojen aiheuttaman kuormanvaihtelun hallintaan. Toimintatavan ja varastointiajan lisäksi lämpövarastot voidaan luokitella myös lämpötilan mukaan matala-, keski- ja korkealämpöisiin varastoihin. [6, s. 11–12; 7, s. 1–3; 8.] Lämpövarastojen luokittelu on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Lämpövarastojen luokittelu toimintatavan, varastointiajan ja lämpötilan mukaan.

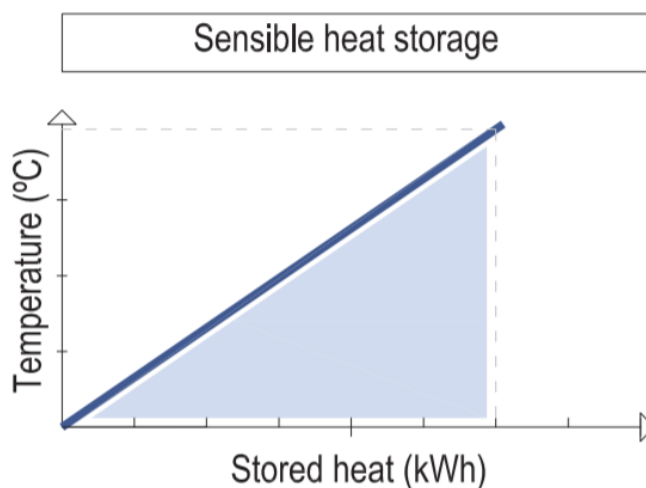
## 2.1 Tuntuvan lämpöenergian varastointi

Tuntuvan lämpöenergian varastointi (Sensible heat storage eli SHS) perustuu varastomateriaalin lämpötilan muutokseen [9]. Yhtälön 1 avulla voidaan laskea varastoidun energian määrä. Yhtälöstä voidaan myös havaita, että tapahtuva lämmönsiirto on suoraan verrannollinen lämpötilaeroon [10].

$$Q = mc_p\Delta T \quad (1)$$

$Q$  (J) on varastoidun energian määrä,  $m$  (kg) on varastomateriaalin massa,  $c_p$  (J/kg×K) on varastomateriaalin ominaislämpökapasiteetti ja  $\Delta T$  (K) lämpötilan muutos.

Kuvasta 2 nähdään tuntuvan lämmön varastoinnin toimintaperiaate. Varastomateriaalin lämpötila nousee, kun energiaa sitoutuu ja lämpötila laskee, kun energiaa poistuu. Tuntuvan lämmön varastoinnissa ei tapahdu faasimuutosta.



Kuva 2. Tuntuvan lämmön varastoinnin toimintaperiaate [11].

Materiaalin kyky varastoida lämpöenergiaa riippuu merkittävästi sen energiatiheudesta, tämän vuoksi varastomateriaalille halutaan korkeita tiheys- ja lämpökapasiteettiarvoja [7, s. 24]. Lämpökapasiteetti kertoo, kuinka paljon lämpöenergiaa kappaleeseen sitoutuu tai kappaleesta vapautuu lämpötilaeroa kohti [9]. Edellä mainittujen ominaisuuksien lisäksi hyvä lämmönjohtavuus ja edullisuus ovat tärkeitä kriteereitä materiaalia valittaessa. Tuntuvan lämmön varastomateriaalien energiatiheys on yleensä noin 100 MJ/m<sup>3</sup>. Varastomateriaalit ovat usein joko kiinteitä tai nestemäisiä. Varastoinnissa voidaan hyödyntää

esimerkiksi betonia, tiiltä, öljyä, vettä tai suoloja. Veden käyttö on yleisin vaihtoehto, koska vedellä on korkea energian varastointitiheys ( $250 \text{ MJ/m}^3$ ) sekä painon että tilavuuden suhteen. Vesi on myös materiaalina turvallinen, edullinen ja kaiken lisäksi helppo käsitellä. [3; 7, s. 24–31].

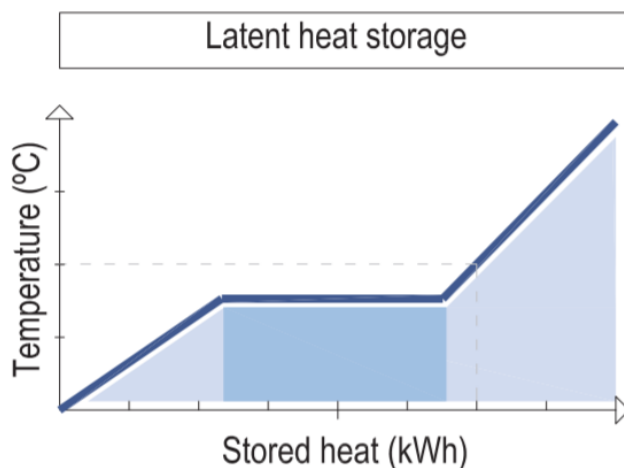
## 2.2 Latentin lämpöenergian varastointi

Latentin lämpöenergian varastointi (Latent heat storage eli LHS) perustuu faasimuutoksessa vapautuvaan tai sitoutuvaan energiaan [12, s. 6]. Yhtälön 2 avulla voidaan laskea varastoidun energian määrä.

$$Q = m\Delta h \quad (2)$$

$Q$  (J) on varastoidun energian määrä,  $m$  (kg) on varastomateriaalin massa ja  $\Delta h$  (J/kg) on faasimuutoksen entalpia.

Entalpia muuttuu faasimuutoksen yhteydessä materiaalin lämpötilan muuttuessa vähän tai pysyessä lähes vakiona [12, s. 7]. Tämä toimintaperiaate nähdään kuvasta 3, jossa vaakatasossa oleva viiva kuvaa latentin lämmön varastoitumista.



Kuva 3. Latentin lämmön varastoinnin toimintaperiaate [11].

Latentin lämmön varastoinnissa faasimuutos tapahtuu useimmiten kiinteän ja nesteen välillä, sulattamalla ja jäähdyttämällä materiaalia. Sulaessa lämpöä siirtyy materiaaliin ja lämpöä vapautuu, kun materiaali jäähmettyy. Edellä mainitun lisäksi faasimuutos voi tapahtua kiinteän ja kiinteän tai kiinteän ja kaasun välillä. Faasimuutosta kiinteän ja

nesteen välillä suositaan, koska sillä ei ole merkittävää tilavuuden muutosta faasimuutoksen aikana. [13; 14, s. 2.]

Materiaaleja, joita käytetään latentin lämmön varastointiin, kutsutaan faasimuutosmateriaaleiksi (Phase change material eli PCM). Faasimuutosmateriaalien energiatiheys on noin 300–500 MJ/m<sup>3</sup>. Faasimuutosmateriaalit jaetaan orgaanisiin ja epäorgaanisiin materiaaleihin sekä eutektisiin seoksiin [3; 12, s. 12]. Materiaalien haluttuihin ominaisuuksiin kuuluvat

- sulamislämpötila sopivalla lämpötila-alueella
- sopiva entalpia
- korkea lämmönjohtavuus
- hyvä terminen ja kemiallinen stabiilius
- ei alijäähtymistä
- pieni tilavuuden muutos faasimuutoksessa
- syttymättömyys, myrkyttömyys, syöpymättömyys
- alhainen hinta. [12, s. 2.]

Materiaalin valinta on hyvin keskeinen osa latentin lämmön varastointia, ja siksi on tärkeää löytää käyttökohteeseen ja olosuhteisiin nähden sopiva materiaali. Jos materiaalin varastointiominaisuudet eivät kohtaa käyttöolosuhteiden kanssa, varasto ei tule toimimaan halutulla tavalla.

### 2.2.1 Orgaaniset materiaalit

Orgaaniset faasimuutosmateriaalit jaetaan parafiineihin ja ei-parafiineihin. Parafiinit ovat tyydyttyneitä hiilivetyjä. Niillä on useita rakennuksiin sopivia ominaisuuksia, kuten olematon alijäähtyminen, syöpymättömyys, kemiallinen stabiilius ja edullisuus. Ne eivät myöskään kärsi faasierkautumisesta. Toisaalta niiden lämmönjohtavuus on melko alhainen ja ne ovat kohtuullisen helposti syttyviä. [12, s. 9–10; 15.]

Ei-parafiineihin kuuluvat rasvahapot, rasvahappojen esterit, alkoholit ja glykolit. Rasvahapot sopivat rakennuksiin toimintalämpötilojensa, myrkyttömyyden, vähäisen alijäähtymisen sekä hyvän termisen ja kemiallisen stabiiliutensa takia. Haastetta niiden käytössä kuitenkin aiheuttaa parafiinien tavoin huono lämmönjohtavuus ja se, että ne ovat helposti syttyviä. [12, s. 10; 15.]

Orgaanisilla materiaaleilla on paljon sopivia ominaisuuksia rakennuksissa tapahtuvaan lämpöenergian varastointiin, eivätkä ne kärsi juuri ollenkaan faasierkautumisesta tai alijäähtymisestä. Suuria ongelmia kuitenkin aiheuttaa se, että ne ovat helposti syttyviä, minkä takia niiden käyttöä rakennuksissa on harkittava tarkkaan. [12, s. 11.]

### 2.2.2 Epäorgaaniset materiaalit

Epäorgaanisiin faasimuutosmateriaaleihin kuuluvat suolahydraatit ja metallisuolat. Suolahydraatit koostuvat epäorgaanisten suolojen ja veden seoksesta. Suolahydraateilla on suuri määrä rakennusten lämmön varastointiin sopivia ominaisuuksia, kuten suuri varastointikapasiteetti ja hyvä lämmönjohtavuus. Niiden lämmönjohtavuus on lähes kaksinkertainen verrattaessa orgaanisiin materiaaleihin. Suolahydraatit ovat halvempia, eivätkä ne ole yhtä helposti syttyviä kuin parafiinit. Haasteita suolahydraattien käytössä kuitenkin aiheuttaa epäyhdenmukainen sulaminen ja alijäähtyminen. Suolahydraatit kärsivät myös ajan myötä tapahtuvasta lämmön varastointikapasiteetin heikkenemisestä ja niistä tulee kemiallisesti epästabiileja korkeissa lämpötiloissa. Metallisuolat eivät sovellu rakennuksiin raskaan painonsa ja epäsopevan toimintalämpötila-alueensa takia. [3; 12, s. 11.]

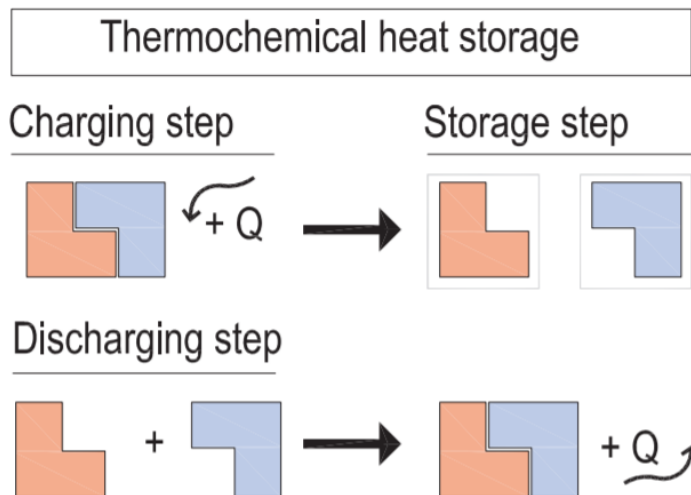
### 2.2.3 Eutektiset seokset

Eutektiset seokset ovat epäorgaanisten ja/tai orgaanisten faasimuutosmateriaalien yhdistelmiä. Kyse on kahden tai useamman komponentin sulamiskokonaisuudesta, jokainen komponentti sulaa ja jähmettyy yhdenmukaisesti. Eutektisten seosten etuina on niiden kyky saada materiaalien halutuimpia ominaisuuksia, kuten tietty sulamispiste tai suurempi lämmön varastointikapasiteetti tilavuusyksikköä kohden. Lisäksi niillä on korkea entalpia. Eutektiset seokset ovat kuitenkin huomattavasti kalliimpia kuin orgaaniset tai epäorgaaniset materiaalit. Tämän lisäksi niiden termofysikaaliset ominaisuudet ovat rajalliset ja ne ovat voimakkaan hajuisia. Orgaanisista eutektisistä seoksista yleisimmin testatut materiaalit koostuvat rasvahapoista ja epäorgaaniset eutektiset seokset koostuvat erilaisista suolahydraateista. [12, s. 12; 14, s. 3.]

### 2.3 Termokemiallisen lämpöenergian varastointi

Termokemiallisessa varastoinnissa (Thermochemical heat storage eli THS) lämpöenergiaa varastoidaan hyödyntämällä palautuvia reaktioita, jotka perustuvat sorptio-prosessiin tai kemiallisiin reaktioihin. Kemialliselle reaktiolle on ominaista muutos reaktioon osallistuvien yhdisteiden kemiallisissa sidoksissa. Sorptiossa ei tätä muutosta tapahdu. Molemmissa varastointitavoissa hyödynnetään kaksiosaista työparia, joista toinen on neste tai kiinteä ja toinen on kaasu tai vesihöyry. [16, s. 2.]

Kuvasta 4 nähdään termokemiallisen lämpöenergian varastoinnin toimintaperiaate. Termokemiallisen materiaalin latausvaiheessa hyödynnetään endotermistä reaktiota, jossa työparit erotellaan toisistaan. Tämän jälkeen ne varastoidaan erikseen. Kun lämpöenergiaa tarvitaan, yhdistetään työpari uudelleen, mikä johtaa eksotermiseen reaktioon ja lämmön vapautumiseen. [16, s. 2.] Varastointisyklin jälkeen varastointimateriaali regeneroidaan eli reaktiossa käytetty materiaali tehdään uudelleen käyttökelpoiseksi seuraavaa varastointisykliä varten [1, s. 2].



Kuva 4. Termokemiallisen varastoinnin toimintaperiaate [11].

Varastointimateriaalit ryhmitellään käytetyn prosessin mukaan fysikaaliseen adsorptioon (zeoliitit ja silikageelit), nesteiden absorptioon tai kemiallisiin reaktioihin. Erillinen luokka koostuu vielä komposiittimateriaaleista. Termokemiallisilta varastointimateriaaleilta odotetaan termistä luotettavuutta, pitkäaikaista stabiiliutta ja edullista hintaa.

Termokemiallisten varastointijärjestelmien energiatiheys on noin  $1000 \text{ MJ/m}^3$ , mikä on 8–10 kertaa suurempi kuin tuntevan lämmön varastointimateriaaleilla ja kaksi kertaa suurempi kuin latenttilämpöön perustuvilla faasimuutosmateriaaleilla. [3; 17.]

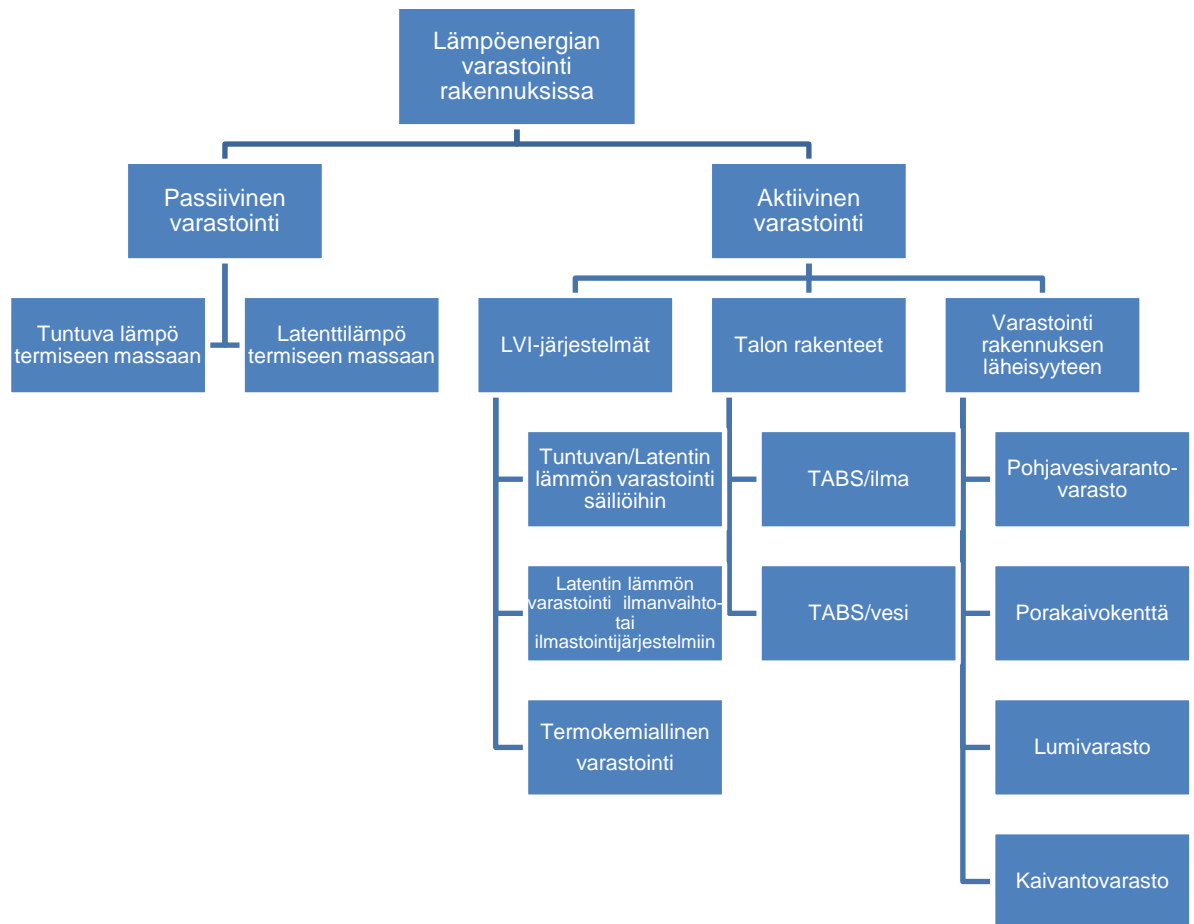
### 3 Lämpöenergian varastointi rakennuksissa

#### 3.1 Aktiiviset ja passiiviset varastointijärjestelmät

Lämpöenergian varastointitekniikat perustuvat joko tuntevan lämmön, latentin lämmön tai termokemiallisen lämmön varastointiin. Niin kuin muussakin lämmön varastoinnissa, myös rakennuksissa varastointi voidaan toteuttaa passiivisten ja aktiivisten järjestelmien avulla. Passiivisen varaston toiminta perustuu luonnolliseen konvektioon tai lämpötilaeroon. Passiivista varastointia käytettäessä sisälämpötilan on annettava vaihdella, jotta mahdollistetaan lämmön varastointi ja myöhemmin sen purkautuminen. Aktiivisessa varastoinnissa hyödynnetään mekaanisen järjestelmän avulla toteutettua pakotettua konvektiota tai massan siirtoa. Tämä voi tarkoittaa esimerkiksi sähköllä toimivien pumppujen ja puhaltimien käyttöä. [11; 18.]

Passiiviset lämpöenergian varastointijärjestelmät parantavat termistä mukavuutta tasamalla rakennuksen huippulämpötiloja sekä vähentämällä jäähdytys- ja lämmitysjärjestelmien tarvittavaa kapasiteettia huippukuormitus tarpeisiin. Aktiivisissa järjestelmissä lämpöenergian varastointi vähentää laitteiden tarvitsemää tehoa ja parantaa järjestelmien tehokkuutta säätämällä niiden toiminta-aluetta. [11.]

Rakennusten lämpöenergian varastointijärjestelmien jaottelu niiden aktiivisuuden ja passiivisuuden mukaan voidaan nähdä kuvasta 5. Passiivinen varastointi tapahtuu termiseen massaan joko tuntevan lämmön tai latentin lämmön avulla. Aktiivinen lämpöenergian varastointi jakautuu LVI-järjestelmiin, talon rakenteisiin ja rakennuksen läheisyydessä tapahtuvaan varastointiin.



Kuva 5. Lämpöenergian varastointijärjestelmien jaottelu rakennuksissa [18].

### 3.2 Varastointitekniikan valintaperusteet

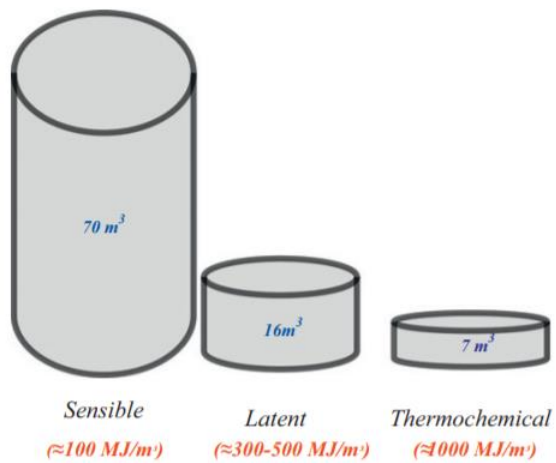
Kohteeseen sopivaa varastointitekniikkaa pohdittaessa valinta passiivisen ja aktiivisen järjestelmän välillä korostuu. Myös rakennuksen käyttöprofiiliin ja varastointiin käytettävän tila merkitys nousevat keskeiseen rooliin. On löydettävä ratkaisu, joka palvelee rakennuksen käyttötarkoitusta.

Lämpöenergian varastoinnilla on monia tarkoituksia, mutta usein asuin-, toimisto- ja lii-kerakennusten näkökulmasta tärkeintä on se, että lämpövarastoa käytetään sisälämpötilan säilyttämiseen määritellyissä rajoissa [18]. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että asuinrakennuksissa sekä toimisto- ja lii-kerakennuksissa energiankäyttökohteet olisivat samanlaiset, vaikka varastointijärjestelmän käyttötarkoitus olisikin sama.

Suurin osa asuinrakennusten energiankulutuksesta käytetään tilojen ja lämpimänkäyttöveden lämmitykseen [7, s. 441]. Toimisto- ja liikerakennuksissa energiankäyttö painottuu taas enemmän jäähdytykseen päivittäisen suuren käyttöasteen vuoksi. Toimisto- ja liikerakennuksilla on usein suuret sisäiset lämpökuormat ihmisistä, laitteista ja valaistuksesta. Näissä rakennuksissa halutaan erityisesti panostaa hyvään sisäilman laatuun, koska sisäilma vaikuttaa ihmisten tuottavuuteen ja täten myös tehtyyn työhön. Tämän takia sisälämpötilojen raja-arvot ovat tiukemmat, eikä niistä juuri jousteta. [18.]

Toimisto- ja liikerakennuksissa esimerkiksi faasimuutosmateriaalit mahdollistavat varastoinnin pienellä lämpötilavälillä. Haasteita kuitenkin ilmenee, jos rakennus on myös yöaikaan käytössä. Rakennuksen sisälämpötila ei välttämättä ehdi laskea tarpeeksi alas, mikä mahdollistaisi faasimuutosmateriaalin jäähdyttymisen ilman aktiivista jäähdytystä. Toiminnan kannalta on kuitenkin oleellista, että materiaali jäähdytyy yön aikana toimiakseen seuraavana päivänä halutulla tavalla. Tällaiset rakennusten käyttöprofiiliin sidotut ominaisuudet voivat rajoittaa passiivisten varastointijärjestelmien käyttöä. [18.]

Käyttöprofiilin lisäksi varaston tarvitsema tila on otettava huomioon. Lämmön varastoinnin yksi suurimmista haasteista onkin varastointijärjestelmien kompaktius. Erityisesti asuinrakennuksissa varastointijärjestelmät vaativat järjestelmän käyttämän tilan minimoimista. [19, s. 5.] Termokemiallisilla energian varastointijärjestelmillä on huomattavasti korkeampi energian varastointitiheys kuin tuntuvan lämmön tai latentin lämmön varastoilla, mikä tekee termokemiallisista varastoista kompaktimpia [20, s. 6]. Tilankäytön optimointi on hyödyllistä kohteissa, joissa säilytystilaa on rajallisesti tai se on kallista. Kuvassa 6 nähdään eri varastointityyppien koot suhteessa toisiinsa. Kuvassa suhteutetaan energiatehokkaan passiivitalon vuotuisen varastointitarpeen kattamiseen tarvittava energiamäärä (6 480 MJ) varastointityypeittäin. Vertailun perusteella voidaan huomata suuret tilavuuserot eri varastointityyppien välillä. [15.]



Kuva 6. Tuntuvan, latentin ja termokemiallisen lämpövaraston koot suhteessa toisiinsa [15].

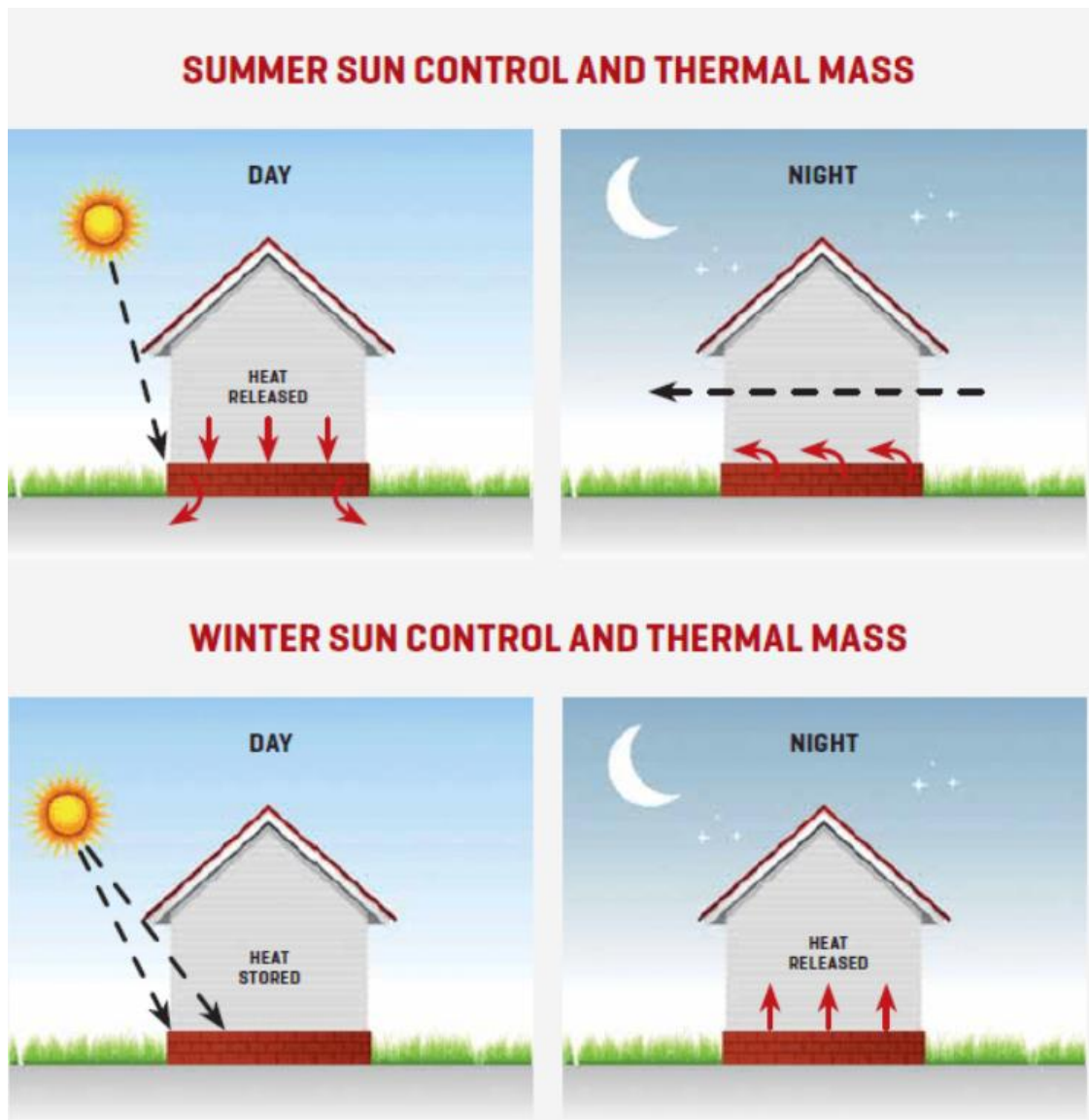
Yllä mainittujen kriteereiden lisäksi varastointijärjestelmien valinta riippuu myös hyvin vahvasti vaaditusta taloudellisesta kannattavuudesta ja varastointiajasta. Tällä hetkellä tarjolla on laaja valikoima sekä saatavilla olevia että kehitteillä olevia lämpöenergian varastointiin tarkoitettuja tekniikoita. Tuntuvan lämmön varastointia on hyödynnetty jo pitkään, mutta tutkimukset ovat erityisesti painottuneet faasimuutosmateriaaleihin ja termokemialliseen varastointiin.

## 4 Varastointitekniikoiden soveltaminen rakennuksissa

### 4.1 Lämpöenergian varastointi talon rakenteisiin

Energian varastointi talon rakenteisiin perustuu lämpökapasiteettiin ja lämmön sopivaan johtumiseen massiivisissa rakenteissa [21]. Lämpöä varaavat rakenteet eli terminen massa kuvaa rakennusmateriaalin kykyä varastoida lämpöenergiaa sekä sitä, kuinka tämä ominaisuus vähentää rakennuksen sisälämpötilan vaihteluita, parantaen sisäilman laatua ja asumismukavuutta. Varastointikapasiteetti on yhteydessä tilavuuskohtaiseen lämpökapasiteettiin ja rakennuksen vaipassa käytettyihin materiaaleihin ja niiden määrään. Massiivisen rakennuksen massa on vähintään  $500 \text{ kg/m}^2$ . [7, s. 450; 22; 23, s. 7.]

Termistä massaa voidaan hyödyntää lämmityksessä sekä jäädytyksessä. Lämpöä hyvin sitovista materiaaleista tehdyt rakenteet varastoivat lämmön päivällä ja luovuttavat sitä yöllä huoneiden käyttöön, kun ulkolämpötila laskee. Jäädytyksessä rakennuksen terminen massa varastoi sisäisiä lämpökuormia, tasoittaen lämpötilaa ja ylläpitäen miellyttäviä sisäilmaolosuhteita. Massiivisen rakennuksen lämmönvarauskyky mahdollistaa sen, että suurin osa lämmöstä varastoituu rakenteisiin, mutta seinien ja lattian pintalämpötilat kohoavat vain vähän. Tällöin pintalämpötilat ovat päivällä ilman lämpötilaa matalampia. Rakennuksen varastoima lämpö poistetaan yöaikaisella ilmanvaihdolla hyödyntämällä viileää ulkoilmaa. Ilmanvaihdolla varmistetaan se, että rakennus voi myös seuraavana päivänä varastoida lämpöä. [23, s. 27.] Termisen massan toimintaperiaate kesällä ja talvella on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Termisen massan toiminta kesällä ja talvella [24].

Tiilessä, betonissa ja kivessä yhdistyvät korkea lämmönvarastointikyky sekä maltillinen lämmönjohtokyky. Nämä ominaisuudet sekä suuri rakenteiden ominaispaino tekevät materiaaleista energiaa säästäviä. Myös kivirakenteiden hyvä tiiveys vähentää energiankulutusta. Kivirakenteiden kestävyys ja pitkä käyttöikä takaavat rakennusten koko elinkaarenaikaisen pienen kokonaisenergiankulutuksen. [22; 23, s. 7.]

Rakennuksen termien massa hyödyntää vapaita lämpökuormia, kuten auringon säteilyä sekä ihmisistä, valaistuksesta ja koneista vapautuvaa lämpöä. Kyse on siis passiivisesta varastoinnista. Aurinkolämmön saantia voidaan tehostaa, suuntaamalla rakennus ja useimmat ikkunat kohti etelää sekä antamalla auringon paistaa sisään päivän lämpimimpänä aikana. Massiivisuuden vaikutuksen suuruus riippuu monista tekijöistä, kuten

massan sijoittelusta, ikkunoiden määrästä, rakennuksen suuntauksesta, ilmaisenergioiden määrästä sekä käytetyistä pintamateriaaleista. [22; 23, s. 7–8.]

Termisen massan hyödyntäminen soveltuu sekä asuinrakennuksiin että toimistorakennuksiin. Termisen massan ansiosta esimerkiksi toimistojen huippulämpötilat voidaan siirtää ajankohtaan, jolloin rakennus on tyhjillään. Se on erityisen hyödyllistä, etenkin kun kesällä lämpötilat ovat huipussaan iltapäivällä ja illalla, jolloin rakennus ei ole enää käytössä. [23, s. 29.]

Termisen massan hyödyntäminen on tunnettu menetelmä Euroopan lämpimimmissä maissa, mutta se on tärkeä myös Pohjois-Euroopan matalaenergia- ja passiivitaloissa varsinkin kesällä [23, s. 27]. Rakennuksen termisen massan hyödyntämistä varastoinnissa voidaan tehostaa myös aktiivisilla järjestelmillä. Tällöin on kyse termoaktivoiduista rakennusjärjestelmistä. Niitä käsitellään tarkemmin osiossa 4.3.

#### 4.2 Lämpöenergian varastointi veteen

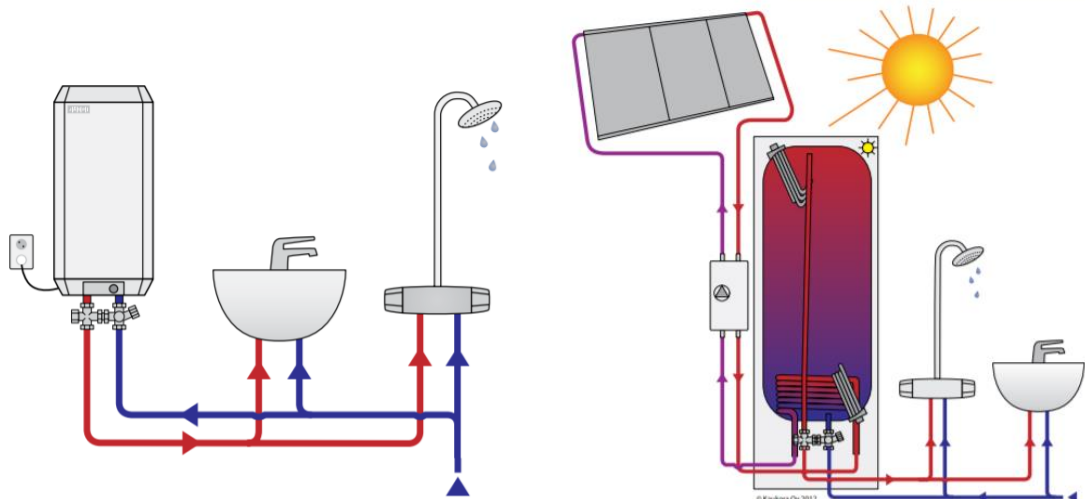
Lämmön varaaminen veteen on helppo ja käytännöllinen tapa varastoida lämpöä. Lämminvesivaraaja toimii rakennuskohtaisena lämpövarastona ja sen tehtävänä on tasata lämpimän veden käytöstä johtuvia kulutushuippuja [25]. Varaaja mahdollistaa sen, että lämmintä vettä on aina saatavilla. Vesivaraajalla voidaan käyttöveden lisäksi lämmittää myös lämmitysvettä, jos rakennuksessa on vesikiertoinen lämmitysjärjestelmä.

Sähkölämmitteisissä asuinrakennuksissa käyttövesi lämmitetään tavallisesti erillisessä lämminvesivaraajassa edullisella yösähköllä. Varaaja voi olla yhteinen koko asunnolle tai hajautettu kulutuksen painopisteiden mukaan. [26.] Varaaja mitoitetaan henkilömäärän ja käyttöveden kulutuksen mukaan. Lämminvesivaraaja on korroosion kestävästä materialista valmistettu hyvin eristetty säiliö, jossa on sähkövastus. Järjestelmälle on tyypillistä, että varaajaan muodostuu lämpökerrostumia. Kerrostuminen on eristyksen ohella yksi lämminvesivaraajan tärkeimmistä ominaisuuksista. Vesi laajenee lämmitessään, jolloin sen ominaispaino pienenee. Tämän takia lämmennyt vesi pyrkii varaajan yläosaan ja jäähtynyt vesi alaosaan. [27; 28.]

Lämminvesivaraajaa voi sähkön lisäksi lämmittää esimerkiksi puulla, aurinkoenergialla, pelletillä tai öljyllä. Osa lämminvesivaraajista soveltuu yhteen kaikkien

energiantuotantotapojen kanssa, toiset taas tukevat ainoastaan tiettyjä lämmitysmuotoja. Kaikissa tapauksissa lämminvesivaraaja kuitenkin parantaa tuotetun energian hyötysuhdetta. [29.]

Lämminvesivaraaja voidaan yhdistää rakennuksen omaan tuotantoon. Lisälämmityksen mahdollisuus on kuitenkin huomioitava jo varaaja valittaessa. Lämminvesivaraajassa on oltava erillinen kierukka lisälämmönlähdettä varten. Aurinkoenergia soveltuu hyvin hyödynnettäväksi lämpimän käyttöveden lämmitykseen tai vesikiertoisen varaavan sähkölämmitysjärjestelmän yhteyteen. Käyttöveden lämmitykseen aurinkoenergialla käytetään tavanomaisen varaajan sijasta aurinkokierukalla varustettua lämminvesivaraajaa. Aurinkokeräinten tuottama lämpö siirtyy varaajaan kyseisellä siirtimellä, muuten varaaja ei poikkea tavanomaisesta. Lämpöä varastoidaan yleensä muutamia vuorokausia tasamaan vuorokautisia ja sään aiheuttamia vaihteluita. [30; 31; 32.] Kuvassa 8 on esitetty lämminvesivaraaja ilman lisälämmönlähdettä sekä aurinkoenergiaa hyödyntävä lämminvesivaraaja.



Kuva 8. Vasemmalla lämminvesivaraaja ilman lisälämmönlähdettä ja oikealla aurinkoenergiaa hyödyntävä lämminvesivaraaja [33].

Vaihtoehtona on myös vesivaraajan ja poistoilmalämpöpumpun yhdistelmä. Toimintaperiaatteeltaan poistoilmalämpöpumppu toimii kuten muutkin lämpöpumput, eli energia otetaan talteen lämpimästä sisäilmasta ennen kuin se puhalletaan ulos. Poistoilmalämpöpumppu poistaa tunkkaista sisäilmaa ja siirtää poistoilman lämpöenergiaa käyttöveden tai vesikiertoiseen lämmitysjärjestelmään. [34.] Poistoilmalämpöpumpulla voidaan myös viilentää sisäilmaa [32]. Lämminvesivaraajat tarvitsevat vain vähän huoltamista,

mutta varsinkin käyttöiän lopussa säiliöt ovat alttiita kulumiselle, jolloin varaajien vuoto- ja rikkoutumisriski kasvaa [29].

### 4.3 Termoaktivoidut rakennusjärjestelmät

Termoaktivoidut rakennusjärjestelmät (Thermally activated building systems eli TABS) ovat talon rakenteisiin integroitua rakennuselementtejä, joita käytetään aktiivisesti lämmön siirtoon ja varastointiin. Termoaktivoidujen rakennusjärjestelmien käyttö rakennusten lämmityksessä ja jäähdytyksessä on levinnyt laajalti Keski- ja Pohjois-Eurooppaan. Järjestelmien lämmönvaihto tapahtuu pääasiassa säteilyn kautta, minkä jälkeen lämpöenergia varastoidaan rakennuksen termiseen massaansa. Tässä aktiivisessa varastoinnissa rakennuksen seinät, lattiat tai katto aktivoidaan lisäämällä niihin vesiputkia tai ilmakehän. Tällöin joko vettä tai ilmaa kierretään rakennuksen elementeissä lämpöenergian varastoimista varten. [35; 36.]

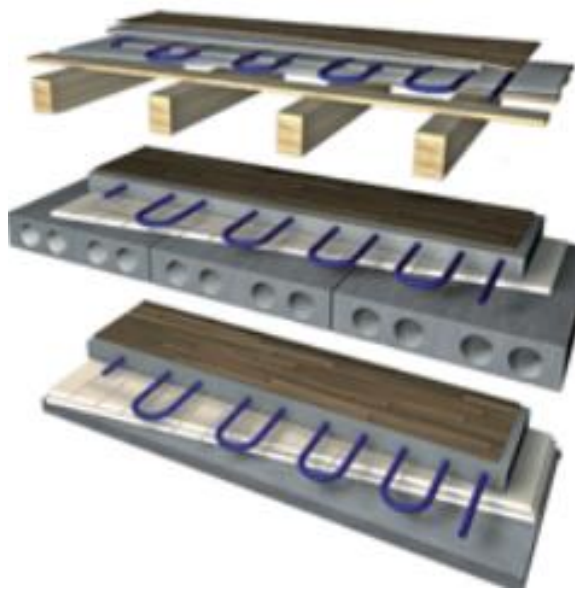
Termoaktivoidujen rakennusjärjestelmien suurin etu piilee siinä, että rakennus hyödyntää lämpöhitausta varastoimisessa ja suurilla pinta-aloilla lämmönsiirrossa. Lämpöhitaus määrittää kappaleen kyvyn vastustaa lämpötilanmuutoksia. Pinnat pidetään tietyssä lämpötilassa tilan lämmittämistä tai jäähdyttämistä varten. Lämpö siirtyy pinnoilta huoneisiin säteilyn avulla, mutta myös huoneilmaan konvektion kautta. Termoaktivoidut rakennusjärjestelmät eivät vain tuo tai poista lämpöä, vaan ne vaikuttavat suoraan koko rakennuksen lämmönsiirron suorituskykyyn. Rakennuksen suuret pinnat mahdollistavat merkittävän lämmönvaihdon pienellä lämpötilagradientilla, minkä takia järjestelmän yhteydessä voidaan hyödyntää matalalämpötilaisia energianlähteitä. Termoaktivoidut rakennusjärjestelmät voidaan yhdistää ympäristöystävällisiin energianlähteisiin, kuten lämpöpumppeihin ja aurinkokeräimiin. [35; 37, s.124; 38, s. 6–7.]

Koska suurin osa lämpökuormasta käsitellään termoaktivoiduilla rakennusjärjestelmillä, rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmien on tarjottava ainoastaan minimi ilmanvaihtosuhteiden hygieenisiä sisäolosuhteita varten. Täten puhallin ja kanavat voidaan mitoittaa pienemmiksi, mikä säästää energiankulutusta ja tilaa. Lisäksi mukavuus paranee, kun vetoa ei ole niin paljon eikä ilmastointilaitteesta lähteviä äänihaittoja. Järjestelmien käyttö vaatii asianmukaisen eristyksen rakennukseen ja sopivan termisen massan. [35.]

Termoaktivoidujen rakennusjärjestelmien luotettavuus on varmistettu monissa rakennushankkeissa ympäri maailmaa. Järjestelmä on kustannustehokas, sillä on alhaiset

asennus-, huolto- ja käyttökustannukset. [39]. Tämän lisäksi järjestelmä vaatii suhteellisen vähän huoltoa, koska kyseessä on suljettu järjestelmä. [38, s. 6].

Varastointitekniikoita on erilaisia riippuen niiden suunnitellusta toimintatavasta, sijainnista sekä lämmönsiirtoaineesta [35]. Hyvin yleinen termoaktivoitu rakennusjärjestelmä on lattialämmitys, jossa vesiputket on upotettu lattiaan. Jäähdytystä varten yleinen vaihtoehto on aktiiviset kattopaneelit. [40, s. 15.] Termoaktivoitujen järjestelmien ympärillä on tehty paljon tutkimusta, mutta nimikkeistön suhteen ei ole päästy yhteisymmärrykseen. Täten samojen järjestelmien nimitykset voivat vaihdella merkittävästi eri kirjoittajien välillä. [35.] Kuvassa 9 on esimerkki vesikiertoisesta lattialämmitysjärjestelmästä.



Kuva 9. Vesikiertoinen lattialämmitysjärjestelmä [41].

Tutkijat ovat ottaneet käyttöön uusia lähestymistapoja energiansäästöjen aikaansaamiseksi, sisällyttämällä faasimuutosmateriaaleja termoaktivoitujen rakennusjärjestelmien suunnitteluun. Tutkimukset ovat osoittaneet, että energiankulutusta voidaan vähentää näissä järjestelmissä noin 10–60 % faasimuutosmateriaalien avulla. [42, s. 2.]

Termoaktivoituilla rakennusjärjestelmillä on pitkät vasteajat, minkä seurauksena ne eivät pysty käsittelemään äkillisiä kuormia. Tämän lisäksi näillä järjestelmillä ei pystytä säätämään kosteutta, joten ne pitää yhdistää ilmanvaihtojärjestelmiin. Termoaktivoitujen rakennusjärjestelmien ja ilmanvaihtojärjestelmien välinen yhteistyö on myös välttämätöntä, jotta saadaan vähennettyä energiankulutusta ja pystytään säilyttämään suotuisat sisäolosuhteet. Järjestelmiä hyödynnetään huippukuormien tasoittamiseen ja

energiankulutuksen siirtämistä korkean hyötysuhteen alueelle tai alhaisten energiankustannusten ajalle. [35.] Ongelmana järjestelmien käyttöönotossa on se, että ne ovat osa rakennusta, minkä takia niiden asentaminen jälkeinpäin on haasteellista [38, s. 6].

#### 4.4 Faasimuutosmateriaaleihin varastointi

Faasimuutosmateriaalien käyttö perustuu rakennuksen lämpöhitauden kasvattamiseen, lisäämättä kuitenkaan merkittävästi rakennuksen painoa. Tämä tekniikka on erityisen hyödyllinen kevytrakenteisissa rakennuksissa, jotka kärsivät matalasta lämpöhitaudesta. Faasimuutosmateriaaleilla parannellut rakenteet toimivat käytännössä rakennusten kevyinä termisen massan komponentteina. Faasimuutos tapahtuu pienellä lämpötilavälillä, jolloin suuria energiamääriä voidaan varastoida pienellä lämpötilamuutoksella. Tämä tarkoittaa sitä, ettei materiaaliin varastoidu lämpöenergiaa ilmasta, ennen kuin haluttu lämpötila-alue on saavutettu, ja tällöin vain ylimääräinen lämpö varastoituu. Lämpöenergian varastoituminen korkeiden lämpötilojen aikana (päivällä) tulisi purkaa matalan lämpötilajakson aikana (yöllä), voidakseen toimia peräkkäisinä päivinä. Faasimuutosmateriaaleihin voidaan varastoida myös kylmää ja täten hyödyntää vapaajähdytyksessä. Faasimuutosmateriaalien käyttö vähentää energiankulutusta, siirtää jäähdytysenergian kysynnän huippukuormia ja tasoittaa lämpötilanvaihteluita tarjoten termisesti mukavan ympäristön. Faasimuutosmateriaaleja voidaan hyödyntää sekä aktiivisesti että passiivisesti. [3; 12, s. 35–36, s. 71.]

Faasimuutosmateriaalit voidaan integroida talon rakenteisiin, tai ne voivat olla osana monimutkaisempia energiajärjestelmiä, kuten lämpöpumppuja tai aurinkopaneeleja. Tämän lisäksi niitä voidaan hyödyntää myös LVI-järjestelmissä, jossa ne toimivat lämpövarastoina, parantaen järjestelmien tehokkuutta [43, s. 3]. Faasimuutosmateriaalit voidaan integroida rakenteisiin erilaisten menetelmien avulla, kuten upottamalla, suoraan sisällyttämällä tai kapseloimalla. Upotuksessa huokoinen rakennusmateriaali upotetaan kuumaan ja sulaan faasimuutosmateriaaliin, joka imeytyy huokosiin kapillaari-ilmiön vaikutuksesta. Huokoinen materiaali poistetaan nesteestä ja rakennuselementtien annetaan kuivua. Suoraan sisällyttäminen on yksinkertaisin ja taloudellisin menetelmä, jossa nestemäinen tai jauhettu faasimuutosmateriaali lisätään suoraan rakennusmateriaaleihin. Faasimuutosmateriaalien haitallisten vaikutusten välttämiseksi voidaan hyödyntää faasimuutosmateriaalien kapseloimista ennen rakenteisiin sisällyttämistä. Kapselointi voidaan jakaa makrokapselointiin ja mikrokapselointiin. Koska suurin osa faasimuutosmateriaaleista toimii nestefaasin kautta, kapselointi on tarpeen, jotta vältetään vuodot

rakennusmateriaalien pintaan. Vuotoriskin takia faasimuutosmateriaalien suoraan sisällyttäminen tai upottaminen rakennuksen komponentteihin ei sovellu hyvin pitkäaikaiseen käyttöön. [12, s. 23–24, s. 36.] Rakenteisiin sisällytetyt faasimuutosmateriaalit tarjoavat suuren alueen varastointia ja lämmönsiirtoa varten. Faasimuutosmateriaaleja voidaan sisällyttää tavanomaisiin rakennusmateriaaleihin, kuten kipsilevyihin, betoniin ja tiileen. Erilaisia paneeleja voidaan myös hyödyntää. [11; 12, s. 28.]

Sopivan faasimuutosmateriaalin valinta on monimutkaista, mutta hyvin keskeinen osa latentin lämpöenergian varastointia. Materiaalin faasimuutoslämpötila tulisi olla lähellä huoneen keskilämpötilaa sekä latentin lämmön ja lämmönjohtavuuden arvot on oltava sopivia. Huomioon on otettava myös materiaalin tulenarkuus sekä pitkän ajan terminen ja kemiallinen stabiilius. [12, s. 31, s. 6.] Sopivan toimintalämpötila-alueen perusteella rasvahapot, parafiinit, suolahydraatit ja eutekiset seokset ovat yhteensopivia rakennusten viihtyisän sisälämpötilan kanssa ja siksi ne ovat hyödynnettävissä rakennusten lämpöenergian varastoinnissa. [12, s. 9.]

Faasimuutosmateriaalit kasvattavat rakennuksen termistä massaa, minkä avulla tasoitetaan rakennuksen sisälämpötilojen vaihtelua. Faasimuutosmateriaalien tehokas sisällyttäminen voi mahdollistaa sen, että sisälämpötila saadaan pidettyä tasaisena pidemmän aikaa jopa ilman LVI-järjestelmien käyttöä. Tämä minimoi LVI-järjestelmien tarpeen ja johtaa lopulta energian säästöön rakennuksessa. [13.]

Yksi merkittävimmistä haasteista rakennusmateriaaleihin integroitujen faasimuutosmateriaalien kanssa on se, että niitä on lähes mahdotonta huoltaa sisäpuolelta. Kun faasimuutosmateriaali lakkaa toimimasta, sitä on hyvin vaikeaa korvata uudella hajottamatta rakennusmateriaaleja. Osa faasimuutosmateriaalien ratkaisuista on kuitenkin sellaisia, että niiden lisääminen rakennukseen sujuu melko vaivattomasti. Esimerkkinä toimii seinälevyt ja lattialaatat. [43, s. 6; 44.]

#### 4.5 Termokemiallisiin materiaaleihin varastointi

Komponenttien välisestä voimasta ja vuorovaikutuksesta riippuen termokemiallinen lämmön varastointi luokitellaan sorptio-prosessiin ja kemiallisiin reaktioihin. Kemiallisten reaktioiden varastointikapasiteetti on korkea, mutta sorptio sopii paremmin matalien lämpötilojen sovelluksiin. Siksi tässä osiossa keskitytään käsittelemään ainoastaan sorptio-varastointia. [16, s. 2.] Kun tarkastellaan termokemiallista varastointia koskevaa tutkimusta, luokittelu sorptioon ja kemiallisiin reaktioihin ei ole täysin yksiselitteinen. Täten eri julkaisuissa jaottelu saattaa hieman vaihdella. [45.]

Sorptio voidaan määritellä ilmiöksi, jossa kaasu kiinnittyy joko nesteeseen tai kiinteään materiaaliin. Sorptio koostuu sorbentista ja sorbaatista, jossa sorbentti on joko neste tai kiinteä aine ja sorbaatti on kaasu tai vesihöyry. Sorptio jaetaan absorptioon ja adsorptioon. Absorptiossa kaasufaasin molekyylit yhdistyvät nesteeseen tai kiinteään aineeseen muuttaen nesteen tai kiinteän aineen koostumusta. Adsorptio sen sijaan määritellään kaasun sitoutumisena kiinteän aineen pintaan tai huokoiseen materiaaliin. [15; 46.]

Sorptiojärjestelmiä on kahdenlaisia, suljettuja ja avoimia. Ero avoimen ja suljetun järjestelmän välillä on kaasureaktantin (sorbaatti) varastointi. Suljettu järjestelmä on eristetty ympäristöstä ja se toimii tyhjiössä, joten kaasureaktantin varastointiin tarvitaan säiliö. Avoin systeemi toimii ilmakehään paineessa ja käytetty kaasu pääsee vapaasti ympäristöön. Rakennussovelluksissa kaasureaktanttina toimii vesihöyry, koska se täyttää turvallisuusvaatimukset eikä täten aiheuta ympäristölle vaaraa. [15.]

Riippuen valitusta järjestelmäkokoontanosta termokemiallinen varasto koostuu reaktorista, lämmönvaihtimista, säiliöistä, höyrystimistä/lauhduttimista, aurinkokeräimistä, venttiileistä ja putkistoista [45]. Sekä avoimessa että suljetussa järjestelmässä voidaan käyttää joko integroitua, erillistä tai modulaarista reaktoria [1, s. 8]. Avointen järjestelmien suunnittelu on yksinkertaisempaa ja täten myös halvempaa kuin suljettujen, koska ne eivät vaadi lauhduttimia, höyrystymiä eivätkä kaasureaktantin varastointia. Myös avointen järjestelmien huoltotoimenpiteet ovat helpompi tehdä. Toisaalta sääolosuhteet rajoittavat avointen järjestelmien toimintaa. Jos ympäristön kosteuspitoisuus ei ole riittävä, pitää ilmaa lisäkosteuttaa. [46.]

Termokemiallisen varastoinnin tutkimus rakennussovelluksissa keskittyy pääasiassa aurinkoenergian kausivarastointiin. Varaston toiminta perustuu kiinteän termokemiallisen materiaalin lataamiseen. Tämä tarkoittaa, että varastomateriaalista poistetaan vesihöyry

aurinkokeräimen avulla, jonka jälkeen vesi ja kuiva materiaali pidetään erillään toisistaan niin kauan, kunnes tarvitaan lämpöenergiaa. Aurinkokeräimiä hyödynnetään, jotta päästään tarpeeksi korkeisiin lämpötiloihin varastoinnin aikaansaamiseksi. Täten materiaalin käyttölämpötilan tulee olla korkeintaan 150 °C. [3; 45; 47.]

Termokemiallisten varastointimateriaalien haluttuihin ominaisuuksiin kuuluvat sopivat käyttöolosuhteet, korkea energiatiheys, myrkyttömyys, palamattomuus, syöpymättömyys ja stabiilius monen varastointisyklin jälkeen [45]. Suolahydraatteja pidetään sopivimpina materiaaleina asuinrakennuksiin korkean energiatiheyden ja alhaisten toimintalämpötilojen vuoksi. Suolahydraateilla on kuitenkin taipumusta muodostaa esteitä, jotka vaikuttavat reaktion palautuvuuteen sekä lämmön- ja massansiirtoon. [1, s. 1]. Täten reaktoria suunniteltaessa tulee huomioida reaktion kinetiikka, massansiirto, lämmönsiirto, turvallisuustekijät ja taloudelliset tekijät [45].

Huono lämmön- ja massansiirtokapasiteetti sekä materiaalin ja laitteiston suuret kustannukset ovat suurimpia esteitä varastoinnin käyttöönotolle. Haastetta aiheuttaa myös materiaalien huono terminen stabiilius useamman varastointisyklin jälkeen. Termokemiallinen varastointijärjestelmä vaatii säiliöitä ja lämmönvaihtimia, mitkä voivat vähentää tekniikan varastointitiheyttä jopa 50 %. Reaktorit saattavat kärsiä korroosiosta, mikä tuo lisähaasteita järjestelmän suunnitteluun. Termokemiallisia varastoja ei ole kaupallisesti saatavilla, mutta prototyyppejä on tehty. [3; 45.]

## 5 Varastointitekniikoiden vertailu ja päätelmät

Taulukkoon 1 on koottu opinnäytetyössä käsiteltyjen varastointitekniikoiden ominaisuuksia. Taulukon arvot ovat suuntaa antavia, ja hinta-arvio sisältää ainoastaan materiaalin kustannukset. Voidaan kuitenkin todeta, että termokemiallinen varastointi on huomattavasti kalliimpaa verrattaessa muihin tekniikoihin.

Kaikki opinnäytetyössä käsitellyt varastointitekniikat ovat kaupallisesti saatavilla termokemiallista varastointia lukuun ottamatta. Myös kaikki tekniikat soveltuvat asuin-, toimisto- ja liikerakennuksiin, mutta niiden valinta kaikkiin kohteisiin ei välttämättä ole kannattavaa. Termokemiallista varastointia käsittelevässä aineistossa painotettiin tekniikan käyttöä etenkin asuinrakennuksissa, mutta ei ole pois suljettua, ettei sitä voisi hyödyntää myös toimisto- ja liikerakennuksissa. Vesivaraajan tapauksessa varastointikapasiteetti harvoin riittää kattamaan suuren rakennuksen tarpeet. Siksi taulukkoon on kirjattu näiden tekniikoiden käyttöprofiiliin kohdalle vain asuinrakennukset.

Taulukko 1. Varastointitekniikoiden vertailutaulukko.

Varastointitekniikka	Lämminvesivaraaja	Terminen massa	TABS	Faasimuutosmateriaalit	Termokemiallinen varastointi
<b>Hinta (materiaali)</b>	1,48–1,77 €/m <sup>3</sup>	-	20-50 €/m <sup>2</sup>	0,3-40 €/kg	350-3600 €/m <sup>3</sup>
<b>Varastointiaika</b>	Noin vuorokausi	Noin vuorokausi	Noin vuorokausi	Noin vuorokausi	Kuukausia
<b>Käyttöprofiili</b>	Asuinrakennukset	Asuinrakennukset sekä toimisto- ja liikerakennukset	Asuinrakennukset sekä toimisto- ja liikerakennukset	Asuinrakennukset sekä toimisto- ja liikerakennukset	Asuinrakennukset
<b>Huoltotarve</b>	Vähäinen	Ei ollenkaan	Vähäinen	-	-
<b>Valmiusaste</b>	Kaupallisesti saatavilla	Kaupallisesti saatavilla	Kaupallisesti saatavilla	Kaupallisesti saatavilla, ei kovin laajasti käytössä	Ei kaupallisesti saatavilla

Taulukkoon 2 on koottu eri varastointityyppien varastointikapasiteettien hinta-arviot. Tämän perusteella voidaan tehdä sama päätelmä kuin taulukon 1 kohdalla, että termokemiallinen lämpöenergian varastointi on selvästi kallein varastointiratkaisu. On vaikea arvioida tekniikoiden lopullisia kokonaiskustannuksia, sillä saatavilla olevia hinta-arvioita on hyvin vähän. Varastointitekniikoiden kokonaiskustannukset ovat riippuvaisia rakennuksen käyttöprofiilista ja täten tarvittavista varastointimateriaaleista ja niiden määristä sekä järjestelmän kokoonpanosta. Varastokokonaisuuksia on paljon erilaisia ja täten myös niiden kustannusarviot vaihtelevat hyvinkin paljon. Ennen tekniikan käyttöönottoa on kuitenkin tärkeää tietää varaston takaisinmaksuaika. Vaikka varastointitekniikka vaikuttaisi-kin sopivalta teknisten ominaisuuksiensa osalta, pitkä takaisinmaksuaika voi johtaa siihen, että kyseistä tekniikkaa ei hyödynnetä ollenkaan. [18.]

Taulukko 2. Varastointikapasiteetin hinta-arvio varastointityypin mukaan [48, s. 3].

Varastointityyppi	Tuntuva lämpöenergia	Latenttilämpöenergia	Termokemiallinen lämpöenergia (kemiallinen reaktio)
Varastointikapasiteetin hinta	0,1–10 €/kWh	10–50 €/kWh	8–100 €/kWh

Yksinään rakennuksen terminen massa ei ole kovin tehokas ratkaisu, mutta yhdistettynä esimerkiksi termoaktivoitujen rakennusjärjestelmien kanssa hyödyt ovat jo suuremmat. Tuntuvan lämmön varastointiin perustuvat ratkaisut hallitsevat vielä toistaiseksi markkinoita luotettavuuden ja kustannustehokkuuden ansiosta. Toisaalta tuntuvan lämmön varastointi kärsii alhaisesta säilytyskapasiteetista ja suurista lämpöhäviöistä. Tämän takia tuntuvan lämmön varastointiratkaisut vaativat yleensä suuren järjestelmän tilavuuden ja eristyksen pitkäaikaista varastointia varten, mikä taas ei ole kannattavaa rakennuksissa. [1, s. 16; 16, s. 1.]

Termoaktivoituja rakennusjärjestelmiä pidetään potentiaalisena ratkaisuna rakennuksen sisäolosuhteiden hallinnassa, mutta tehostaakseen järjestelmän toimintaa faasimuutosmateriaalien integroimisella on osoitettu selkeitä etuja suuremman varastointikapasiteetin saamisessa.

Faasimuutosmateriaalit ovat tällä hetkellä kiinnostavin ratkaisu lämpöenergianvarastoinnissa, on kyse sitten niiden passiivisesta tai aktiivisesta hyödyntämisestä. Kaupallisesti useita faasimuutosmateriaaleja on saatavilla ja ne ovat myös menestyneet kohtuullisesti. Haasteita tekniikassa kuitenkin ilmenee ja siksi tutkimuksissa tulisi keskittyä erityisesti lämmönsiirtonopeuksien kasvattamiseen parantamalla materiaalien lämmönjohtavuutta, keskittymällä faasimuutosmateriaalien sisällyttämistekniikoihin ja varastointimateriaalien pitkän ajan stabiiliuteen. Latentin lämmön varastoinnin kustannuksista noin 75 % tulee pelkistä faasimuutosmateriaalista. Tämä tarkoittaa, että lisätutkimuksia tulisi tehdä myös investointikustannusten laskemiseksi. [3.]

Termokemiallinen varastointi poikkeaa muista varastointimenetelmistä korkean energiantiheuden, vähäisten lämpöhäviöiden ja pitkäaikaisen varastointimahdollisuuden takia. Vaikka termokemiallista varastointia pidetään tulevaisuuden kannalta hyvinkin lupaavana varastointitekniikkana edellä mainittujen ominaisuuksiensa takia, ei se vielä näytä selkeitä etuja rakennussovelluksissa. Toistaiseksi ei ole vielä saatavilla sellaista termokemiallista varastointimateriaalia, joka täyttäisi rakennusten lämpöenergian varastoinnin vaatimukset. Tämän perusteella ei myöskään ole kaupallisia tuotteita saatavilla. Termokemiallisessa varastoinnissa hyödynnetään usein lämmön- ja massansiirtoa parantavia tekniikoita, jotta saavutetaan vaadittu suorituskyky. Monimutkainen laitteisto nostaa huomattavasti tekniikan kokonaiskustannuksista, vaikka ennestään varastointimateriaalin hinta on jo hyvin korkea. [48, s. 27.] Lisätutkimuksia tarvitaan toimintaolosuhteiden, tehokkuuden, kustannusten ja järjestelmän suunnittelun optimoimiseksi [3].

## 6 Lämpöenergian varastoinnin vaikutus ilmastotavoitteisiin

Ilmastopolitiikan kannalta rakennussektorin tärkein energiansäästöpotentiaali on olemassa olevassa rakennuskannassa [49]. Rakennusten energiankulutuksen vähentäminen voi perustua energiatehokkuuden edistämiseen, energian älykkäämpään käyttöön sekä rakennuksissa tapahtuvaan hajautettuun energiantuotantoon [50, s. 7]. Lämpöenergian varastointia on tutkittu jo pitkään ja sitä voidaankin pitää toteuttamiskelpoisena ratkaisuna tehokkaaseen lämmön hallintaan rakennuksissa. Samalla kun rakennusten energiatehokkuuteen panostetaan, tuetaan EU:n ilmasto- ja ympäristötavoitteiden saavuttamista. Ilmastotavoitteiden avulla pyritään rajoittamaan päästöjä ja siten hillitsemään ilmastomuutoksen etenemistä. [7, s. 443–447; 51]

Lämpöenergian varastointijärjestelmillä (Thermal energy storage systems eli TESS) on merkittävä rooli fossiilisista polttoaineista irtautumiseen. Varastointijärjestelmät tukevat tehokkaampaa ja ympäristöystävällisempää energiankäyttöä, mahdollistaen sellaisten uusiutuvien energianlähteiden hyödyntämisen, mitkä olisivat muuten saavuttamattomissa. [7, s. 443; 18.] Varastoinnin toteuttaminen energijärjestelmissä mahdollistaa myös saasteiden ja hiilidioksidipäästöjen vähentämisen sekä järjestelmien paremman suorituskyvyn. Energian varastoinnilla on myös tärkeä rooli, siirryttäessä kohti matala-, nolla- ja plusenergiarakentamista. [7, s.447; 11.]

Päästöttömän energijärjestelmän lisäksi lämpöenergian varastointi tuo mukanaan paljon muitakin hyötyjä. Se lisää tuotantokapasiteettia. Lämpöenergian kysyntä ja tarjonta harvoin kohtaavat täysin, minkä seurauksena matalan kysynnän aikana käytettävissä olevaa tuotantoa voidaan käyttää lämpövarastojen lataamiseen tuotantokapasiteetin lisäämiseksi korkean kysynnän aikana. [52, s. 89–90.]

Lämpöenergian varastointijärjestelmät mahdollistavat kysyntäjoustopotentialin hyödyntämisen. Kysyntäjousto (Demand response) tunnetaan myös kulutusjoustopotentialina, ja sillä tarkoitetaan sähkönkäytön siirtämistä korkean hinnan ja kulutuksen tunneilta edullisempaan ajankohtaan tai käytön hetkellistä muuttamista tehotasapainon hallinnan tarpeisiin [53]. Tämän avulla kuluttajien rooli kasvaa energiainmarkkinoilla ja he pystyvät itse vaikuttamaan energiakustannuksiinsa. Kuluttajat pystyvät jatkossa myös tuottamaan osan käyttämästään energiasta ja mahdollisesti myymään pientuotannostaan ylijäävää energiaa. [54.]

Kysyntäjoustopotentialia tarvitaan lisää, kun joustamattoman tuotannon kuten uusiutuvan energian määrä lisääntyy verkossa [53]. Tuotannon tasapainon säilyttämiseksi on tärkeää

pystyä säätämään ja ohjaamaan myös rakennusten tehonkulutusta. Tuotantohiippujen aikana kysyntäjousto mahdollistaa energian varastoinnin rakennuksessa olevaan lämpövarastoon. Rakennusautomaatiojärjestelmien ja etäluettavien mittareiden avulla kysyntäjoustopon ohjaus voidaan toteuttaa kätevästi rakennusten ja energiaverkon välille. [54; 55, s. 1.] Lämpöenergian varastointi edistää kestävästä kehitystä ja tarjoaa ratkaisuja moniin haasteisiin, joita energiamurros tuo mukanaan.

## 7 Yhteenveto

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia olemassa olevia ja kehitteillä olevia rakennuksiin soveltuvia lämpöenergian varastointitekniikoita sekä arvioida niiden soveltuvuutta ja valmiusastetta. Työssä tutustuttiin lämpöenergian varastointityyppeihin, minkä jälkeen käytiin läpi opinnäytetyöhön valitut varastointitekniikat. Lisäksi työssä vertailtiin näiden varastointitekniikoiden ominaisuuksia.

Tehdyn selvityksen perusteella voidaan todeta, että lämpöenergian varastointia faasimuutosmateriaaleihin pidetään kiinnostavimpana varastointiratkaisuna rakennuksissa. Faasimuutosmateriaaleja pystytään hyödyntämään sekä passiivisesti että aktiivisesti, mikä kasvattaa varastointitekniikan käyttömahdollisuuksia. Faasimuutokseen perustuvia varastointiratkaisuja on jo kaupallisesti saatavilla ja ne ovat pärjänneet markkinoilla kohtuullisesti. Haasteita kuitenkin esiintyy etenkin varastointimateriaalin lämmönsiirtonopeuksissa, pitkäaikaisessa termisessä ja kemiallisessa stabiiliudessa sekä korkeissa kustannuksissa. Tutkimusta tarvitaan edelleen lämpöenergian varastoinnissa esiintyvien haasteiden voittamiseksi ja taloudellisten varastointijärjestelmien aikaansaamiseksi. Faasimuutosmateriaalit soveltuvat käytettäväksi sekä asuinrakennuksiin että toimisto- ja liikerakennuksiin.

Faasimuutosmateriaalien lisäksi myös termokemiallista varastointia pidetään tulevaisuuden kannalta potentiaalisena varastointiratkaisuna etenkin asuinrakennuksissa. Kiinnostusta on herättänyt termokemiallisen varastoinnin korkeat energiatiheudet, varastoinnin vähäiset lämpöhäviöt ja pitkän ajan varastointimahdollisuus. Tekniikaltaan termokemiallinen varastointi on huomattavasti monimutkaisempaa, mikä nostaa myös järjestelmän kokoonpanon kustannukset korkeiksi. Useita haasteita on selätettävä ennen tekniikan kaupallistamista. Tämän perusteella termokemiallinen varastointi ei toistaiseksi näytä selkeitä etuja rakennuksissa tapahtuvassa lämpöenergian varastoinnissa. Tekniikan kehittämiseksi ja sen tuomista lähemmäksi kaupallistamista on tutkimuksissa tarpeen yhdistää sekä materiaalin että järjestelmän kokoonpanoon liittyvät haasteet.

Lämpöenergian varastointi tulee vastamaan moniin energiantuotannollisiin haasteisiin, joita uusiutuvan energian lisääntyminen sähköverkossa aiheuttaa. Varastointi pienentää energiantuotannon kysynnän ja tarjonnan välistä eroa, mahdollistaen kuluttajien aktiivisemmän osallistumisen energiamarkkinoille kysyntäjouston avulla. Lämpöenergian varastointi parantaa olemassa olevan rakennuskannan energiatehokkuutta ja tukee samalla ilmastotavoitteiden saavuttamista.

## Lähteet

- 1 Clark, Ruby-Jean; Mehrabadi, Abbas & Farid, Mohammed. 2020. State of the art on salt hydrate thermochemical energy storage systems for use in building applications. Verkkoaineisto. Journal of Energy Storages. Vol 27, s. 1–18. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X19307649?via%3Dihub>>. Luettu 21.2.2020.
- 2 Rakentaminen ja rakennukset. Verkkoaineisto. Motiva Oy. <[https://www.motiva.fi/julkinen\\_sektori/kestavat\\_julkiset\\_hankinnat/tietopankki/rakentaminen\\_ja\\_rakennukset?i=19](https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kestavat_julkiset_hankinnat/tietopankki/rakentaminen_ja_rakennukset?i=19)>. Luettu 24.3.2020.
- 3 Lizana, Jesús; Chacartegui, Ricardo; Barrios-Padura, Angela & Valverde, José Manuel. 2017. Advances in thermal energy storage materials and their applications towards zero energy buildings: A critical review. Verkkoaineisto. Applied Energy. Vol. 203, s. 219–239. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261917307584?via%3Dihub>>. Luettu 7.2.2020.
- 4 Caverion lyhyesti. Verkkoaineisto. Caverion Oyj. <<https://www.caverion.fi/tietoa-caverionista/caverion-lyhyesti>>. Luettu 11.3.2020.
- 5 Liiketoimintayksiköt. Verkkoaineisto. Caverion Oyj. <<https://www.caverion.fi/sijoittajat/caverion-sijoituskohteena/liiketoimintayksik%c3%b6t>>. Luettu 11.3.2020.
- 6 Alanen, Raili; Koljonen, Tiina; Hukari, Sirpa & Saari, Pekka. 2003. Energian varastoinnin nykytila. Tutkimustyö. VTT.
- 7 Cabeza, Luisa F. 2015. Advances in Thermal Energy Storage Systems - Methods and Applications. E-kirja. Woodhead publishing.
- 8 Alva, Guruprasad; Lin, Yaxue & Fang, Guiyin. 2018. An overview of thermal energy storage systems. Verkkoaineisto. Energy. Vol. 144, s. 341–378. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036054421732056X?via%3Dihub>>. Luettu 21.2.2020.
- 9 Connor, Nick. 2019. What is Sensible Heat Storage – SHS – Definition. Verkkoaineisto. Thermal Engineering. <<https://www.thermal-engineering.org/what-is-sensible-heat-storage-shs-definition/>>. 22.5.2019. Luettu 20.12.2019.
- 10 Lumme, Matti. 2018. Lämpövarastot. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. LUTPub-tietokanta.
- 11 Lizana, Jesús; Chacartegui, Ricardo; Barrios-Padura, Angela & Ortiz, Carlos. 2018. Advanced low-carbon energy measures based on thermal energy storage in buildings: A review. Verkkoaineisto. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 82, s. 3705–3749. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117314600?via%3Dihub>>. Luettu 24.3.2020.

- 12 Delgado, João; Martinho, Joana; Vaz Sá, Ana; Guimarães, Ana & Abrantes, Vitor. 2019. Thermal Energy Storage with Phase Change Material – A Literature Review of Applications for Buildings Materials. E-kirja. Springer Nature.
- 13 Khan, Rafid Jahangir; Bhuiyan, Md. Zubayer Hossain & Ahmed, Dewan Hasan. 2020. Investigation of heat transfer of a building wall in the presence of phase change material (PCM). Verkkoaineisto. Energy and Built Environment. Vol. 1, s. 199–206. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666123320300088?via%3Dihub>>. Luettu 3.3.2020.
- 14 da Cunha, Sandra Raquel Leite & de Aguiar, José Luís Barroso. 2020. Phase change materials and energy efficiency of buildings: A review of knowledge. Verkkoaineisto. Journal of Energy Storage. Vol. 27, s. 1–13. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X19310734?via%3Dihub>>. Luettu 11.3.2020.
- 15 Tatsidjoudoung, Parfait; Le Pierres, Nolwenn & Luo, Lingai. 2013. A review of potential materials for thermal energy storage in building applications. Verkkoaineisto. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 18, s. 327–349. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032112005679?via%3Dihub>>. Luettu 23.3.2020.
- 16 Mehari, Abel; Xu, Z.Y & Wang, R.Z. 2020. Thermal energy storage using absorption cycle and system: A comprehensive review. Verkkoaineisto. Energy Conversion and Management. Vol. 206, s. 1–18. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890420300182?via%3Dihub>>. Luettu 11.3.2020.
- 17 Aydin, Devrim; Casey, Sean P. & Riffat, Saffa. 2015. The latest advancements on thermochemical heat storage systems. Verkkoaineisto. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 41, s. 356–367. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114007308?via%3Dihub>>. Luettu 11.2.2020.
- 18 Heier, Johan; Bales, Chris & Martin, Viktoria. 2015. Combining thermal energy storage with buildings – a review. Verkkoaineisto. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 42, s. 1305–1325. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114009629?via%3Dihub>>. Luettu 4.2.2020.
- 19 Fopah Lele, Armand. 2016. A Thermochemical Heat Storage Systems for Households – Combined Investigations of Thermal Transfers Coupled to Chemical Reactions. E-kirja. Springer Nature.
- 20 Koohi-Fayegh, S. & Rosen, M.A. 2020. A review of energy storage types, applications and recent developments. Verkkoaineisto. Journal of Energy Storage. Vol. 27, s. 1–23. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X19306012?via%3Dihub>>. Luettu 23.3.2020.

- 21 Lämmön varastointi talon rakenteisiin. Verkkoaineisto. Motiva Oy. <[https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelman\\_kaytto/aurinkolammon\\_varastointi/lammon\\_varastointi\\_talon\\_rakenteisiin](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelman_kaytto/aurinkolammon_varastointi/lammon_varastointi_talon_rakenteisiin)>. Päivitetty 6.8.2019. Luettu 13.1.2020.
- 22 Kaskiaro, Tiina. 2016. Lämpöä varaavat rakenteet säästävät energiaa. Verkkoaineisto. Kivifaktaa. <<https://kivifaktaa.fi/faktapankki/kivi-on-ymparistoystavallinen-materiaali/terminen-massa/>>. 7.11.2016. Luettu 13.1.2020.
- 23 Betoniteollisuus ry. 2010. Kivitalojen energiatehokkuus. E-kirja. Suomen rakennusmedia Oy.
- 24 Grimes, Cameron. 2018. Thermal mass detail. Verkkoaineisto. Building connection. <<https://buildingconnection.com.au/2018/03/16/what-you-need-to-know-about-thermal-mass-2/thermal-mass-detail/>>. 16.3.2018. Luettu 19.4.2020.
- 25 Lämmönvaraaja lämmittää käyttö- ja lämmitysvettä. Verkkoaineisto. Rakentaja.fi. <[https://www.rakentaja.fi/artikkelit/10095/lammonvaraaja\\_ahtaaseen\\_tilaan\\_akvaterm.htm](https://www.rakentaja.fi/artikkelit/10095/lammonvaraaja_ahtaaseen_tilaan_akvaterm.htm)>. Luettu 19.3.2020.
- 26 Lappalainen, Markku. 2011. Rakennusten lämmöntuotantotavat. Verkkoaineisto. Rakennustieto Oy. <<https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK110301.pdf>>. Luettu 13.1.2020.
- 27 Lämminvesivaraajat: käyttöveden lämmitys. Verkkoaineisto. Jäsپی. <<https://jaspi.fi/lamminvesivaraaja/>>. Luettu 14.1.2020.
- 28 Varastointi vesivaraajaan. Verkkoaineisto. Motiva Oy. <[https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelman\\_kaytto/aurinkolammon\\_varastointi/varastointi\\_vesivaraajaan](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelman_kaytto/aurinkolammon_varastointi/varastointi_vesivaraajaan)>. Päivitetty 18.10.2019. Luettu 13.1.2020.
- 29 Lämminvesivaraaja: Kuinka paljon sen uusiminen tai korjaaminen maksaa? Miten lämminvesivaraaja toimii? Verkkoaineisto. Urakkamaailma.fi. <<https://www.urakkamaailma.fi/lamminvesivaraaja-hinta>>. Luettu 19.3.2020.
- 30 Sähkölämmitys. Verkkoaineisto. Motiva Oy. <[https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelmat/kytkenta\\_muihin\\_lammitysjarjestelmiin/sahkolammitys](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelmat/kytkenta_muihin_lammitysjarjestelmiin/sahkolammitys)>. Päivitetty 6.8.2019. Luettu 14.1.2020.
- 31 Aurinkolämmön varastointi. Verkkoaineisto. Energiatehokas koti. <[https://www.energiatehokaskoti.fi/suunnittelu/talotekniikan\\_suunnittelu/lammitys/aurinkoenergia/aurinkolammon\\_varastointi](https://www.energiatehokaskoti.fi/suunnittelu/talotekniikan_suunnittelu/lammitys/aurinkoenergia/aurinkolammon_varastointi)>. Päivitetty 17.3.2020. Luettu 16.1.2020.
- 32 Pientalon lämmitysjärjestelmät. 2011. Verkkoaineisto. Motiva Oy. <<http://www.motiva.fi/files/4970/PientalonLammitysjarjestelmat.pdf>>. Luettu 14.1.2020.

- 33 Vedenlämmittimet. Verkkoaineisto. Jäspi. <[https://www.varaaja.com/images/tiedostot/tuotteet/lamminvesivaraajat/jaspi/Jaspi\\_Vedenlammittimet\\_esite.pdf](https://www.varaaja.com/images/tiedostot/tuotteet/lamminvesivaraajat/jaspi/Jaspi_Vedenlammittimet_esite.pdf)>. Luettu 19.4.2020.
- 34 Poistoilmalämpöpumppu yhdistää lämmityksen ja ilmanvaihdon. Verkkoaineisto. Suomi rakentaa. <<https://www.suomirakentaa.fi/omakotirakentaja/laemmitys/yritysten-artikkeleita-aiheesta/poistoilmalampopumppu-vaihtoehtona>>. Päivitetty 15.3.2019. Luettu 27.1.2020.
- 35 Romaní, Joaquim; de Gracia, Alvaro & Cabeza, Luisa F. 2016. Simulation and control of thermally activated building systems (TABS). Verkkoaineisto. Energy and Buildings. Vol. 127, s. 22–42. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778816304261?via%3Dihub>>. Luettu 3.2.2020.
- 36 Lehmann, B.; Dorer, V.; Gwerder, M.; Renggli, F. & Tödtli, J. 2011. Thermally activated building systems (TABS): Energy efficiency as a function of control strategy, hydronic circuit topology and (cold) generation system. Verkkoaineisto. Applied Energy. Vol. 88, s. 180–191. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261910003260?via%3Dihub>>. Luettu 20.2.2020.
- 37 Airo, Meri-Liisa & Kiuru, Risto. 2012. Petrofysiikan perusteet. Raportti. No 68. Helsingin yliopisto.
- 38 Behrendt, Benjamin. 2016. Possibilities and Limitations of Thermally Activated Building Systems – Simply TABS and a Climate Classification for TABS. PhD Thesis. Technical University of Denmark.
- 39 Cubick, Robert. 2017. The Benefits of Thermally Active Building System. Verkkoaineisto. Uponor. <<https://web.uponor.hk/radiant-cooling-blog/the-benefits-of-thermally-active-building-systems/>>. 19.2.2017. Luettu 25.2.2020.
- 40 Heier, Johan. 2013. Energy Efficiency through Thermal Energy Storage – Possibilities for the Swedish Building Stock. Licentiate thesis. KTH School of Industrial Engineering and Management.
- 41 Lattialämmitysjärjestelmä. Verkkoaineisto. Lämpöykkönen. <<https://lampoykkonen.fi/tuotteet/lattialammitys/lattialammitysjarjestelma/>>. Luettu 19.4.2020.
- 42 Guerrero Delgado, MCarmen; Sánchez Ramos, José; Álvarez Domínguez, Servando; Tenorio Ríos, José Antonio & Cabeza, Luisa F. 2020. Building thermal storage technology: Compensating renewable energy fluctuations. Verkkoaineisto. Journal of Energy Storage. Vol. 27, s. 1–19. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X19305468?via%3Dihub>>. Luettu 22.1.2020.

- 43 Bland, Ashley; Khzouz, Martin; Statheros, Thomas & Gkanas, Evangelos I. 2017. PCMs for Residential Building Applications: A Short Review Focused on Disadvantages and Proposals for Future Development. Verkkoaineisto. MPDI. <<https://www.mdpi.com/2075-5309/7/3/78>>. Luettu 18.3.2020.
- 44 Kalnæs, Simen Edsjø & Jelle, Bjørn Petter. 2015. Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities. Verkkoaineisto. Energy and Buildings. Vol. 94, s. 150–176. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778815001188?via%3Dihub>>. Luettu 18.2.2020.
- 45 Solé, Aran; Martorell, Ingrid & Cabeza, Luisa F. 2015. State of the art on gas–solid thermochemical energy storage systems and reactors for building applications. Verkkoaineisto. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 47, s. 386–398. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115002300?via%3Dihub>>. Luettu 5.3.2020.
- 46 Krese, Gorazd; Koželj, Rok; Butala, Vincenc & Stritih, Uroš. 2018. Thermochemical seasonal solar energy storage for heating and cooling of buildings. Verkkoaineisto. Energy and Buildings. Vol. 164, s. 239–253. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778817301469?via%3Dihub>>. Luettu 27.2.2020.
- 47 Gaeini, M.; Shaik, S.A. & Rindt, C.C.M. 2019. Characterization of potassium carbonate salt hydrate for thermochemical energy storage in buildings. Verkkoaineisto. Energy and Buildings. Vol. 196, s. 178–193. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778818319315?via%3Dihub>>. Luettu 5.3.2020.
- 48 Sarbu, Ioan & Sebarchievici, Calin. 2018. A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage. Verkkoaineisto. MDPI. <<https://www.mdpi.com/2071-1050/10/1/191>>. Luettu 18.3.2020.
- 49 Energiahukkajahti käyntiin ympäristöministeriön johdolla. Verkkoaineisto. Ilmasto-opas.fi. <<https://ilmasto-opas.fi/fi/ajankohtaista/uutinen/-/artikkeli/1944f150-bd43-44be-9748-88345f349362/energiahukkajahti-kayntiin-ymparistoministerion-johdolla.html>> 3.10.2016. Luettu 16.3.2020.
- 50 Kivimaa, Paula; Marttila, Tatu & Matschoss, Kaisa. Muutospolku 4: Rakennusten energiatehokkuus, Yhteenveto työskentelyn tuloksista. Verkkoaineisto. <<http://www.smartenergytransition.fi/tiedostot/murrosareena-polku4-rakennusten-e-tehokkuus.pdf>>. Smart Energy Transition 2030 – Energianmurrosareena.
- 51 Nursyazwani, Abdul Aziz; Nasrul, Amri Mohd Amin; Mohd, Shukry Abd Majid & Izzudin, Zaman. 2018. Thermal energy storage (TES) technology for active and passive cooling in buildings: A Review. Verkkoaineisto. <[https://www.mateconferences.org/articles/mateconf/pdf/2018/84/mateconf\\_ses2018\\_03022.pdf](https://www.mateconferences.org/articles/mateconf/pdf/2018/84/mateconf_ses2018_03022.pdf)>. Luettu 23.1.2020.

- 52 Dincer, Ibrahim & Rosen, Marc A. 2011. Thermal energy storage – Systems and Applications. E-kirja. John Wiley and Sons, Ltd., Publication.
- 53 Kysyntäjousto. Verkkoaineisto. Fingrid. <<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyys/sahkomarkkinoiden-tulevaisuus/kysyntajousto/>>. Luettu 21.2.2020.
- 54 Kuluttajan rooli kasvaa energiamarkkinoilla. Verkkoaineisto. Talotekniikka. <<https://talotekniikka-lehti.fi/kuluttajan-rooli-kasvaa-energiamarckkinoilla/>>. 25.10.2016. Luettu 26.3.2020.
- 55 Keskustelupaperi: Energiajärjestelmä tarvitsee joustavuutta lisääviä ohjauskeinoja – voisiko dynaaminen sähkövero olla vaihtoehto? Verkkoaineisto. Smart Energy Transition. <<http://smartenergytransition.fi/fi/keskustelupaperi-energiajarjestelma-tarvitsee-joustavuutta-lisaavia-ohjauskeinoja-voisiko-dynaaminen-sahkovero-olla-vaihtoehto/>>. Luettu 17.3.2020.