



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Emma Kangas

Faasimuutosmateriaalien hyödyntäminen lämpöenergian varastoinnissa talotekniikassa

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö
Energiatekniikka
Diplomityö

Vaasa 2026

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

Tekijä:	Emma Kangas		
Tutkielman nimi:	Faasimuutosmateriaalien hyödyntäminen lämpöenergian varastoinnissa talotekniikassa		
Tutkinto:	Diplomi-insinööri		
Opintosuunta:	Energiatekniikka		
Työn valvoja:	Anne Mäkiranta		
Työn ohjaaja:	Birgitta Martinkauppi		
Valmistumisvuosi:	2026	Sivumäärä:	77

TIIVISTELMÄ:

Tässä tutkielmassa tarkastellaan faasimuutosmateriaalien hyödyntämistä lämpöenergian varastoinnissa talotekniikassa. Tutkielmassa perehdytään aiempiin tutkimuksiin, joiden avulla arvioidaan faasimuutosmateriaalien soveltuvuutta, lämpöenergian varastointiominaisuuksia ja varastointijärjestelmien energiatehokkuutta. Tämän lisäksi tarkastellaan uutta lämpöenergian varastointijärjestelmää, jonka toteuttamisesta vastaa NewHeatIntegrated-hanke.

Tutkielman aihe on ajankohtainen, sillä lämmitys- ja jäähdytyskulut kattavat suurimman osan rakennusten energiankulutuksesta. Euroopan unionilla on päästövähennystavoitteita, jotka koskevat myös talotekniikkaa. Faasimuutosmateriaalien avulla tapahtuva lämpöenergian varastointi voi edistää EU:n päästövähennystavoitteiden saavuttamista.

Faasimuutosmateriaalien hyödyntäminen talotekniikassa voi parantaa rakennusten energiatehokkuutta, sillä faasimuutosmateriaali varastoi ja vapauttaa lämpöenergiaa tehokkaasti. Faasimuutosmateriaalit toimivat passiivisina lämpövarastoina, ja niitä voidaan integroida tehokkaasti rakennuksiin. Faasimuutosmateriaalien avulla rakennusten sisälämpötilat pysyvät tasaisimpina, ja sekä lämmitys- että jäähdytyskulut pienenevät. Uusiutuvia energialähteitä voidaan hyödyntää tehokkaammin faasimuutosmateriaaleihin perustuvissa lämpöenergian varastointijärjestelmissä.

Tutkielman käytännön toteutukset osoittavat, että faasimuutosmateriaalien tehokas hyödyntäminen edellyttää varastointijärjestelmien huolellista suunnittelua ja kokoonpanoa. Faasimuutosmateriaalien lämpötekniset ominaisuudet eivät pelkästään takaa toimivaa ratkaisua, vaan järjestelmän toteutus ja asennustapa ovat ratkaisevia tekijöitä. Näiden seikkojen huomioiminen on välttämätöntä, jotta faasimuutosmateriaalien potentiaali rakennusten energiatehokkuuden parantamisessa voidaan hyödyntää täydellä potentiaalillaan.

Tutkielman johtopäätöksiä voidaan todeta, että faasimuutosmateriaalit tarjoavat merkittävän teknisen potentiaalin rakennusten energiatehokkuuden parantamisessa. Kirjallisuuden perusteella niiden käyttö voi parantaa lämpötilojen hallintaa, lämpökuormien tasausta sekä järjestelmien energiatehokkuutta erityisesti. Käytännön toteutuksessa keskeisiä haasteita ovat kuitenkin materiaalien pitkäaikaiskestävyys, faasimuutoksen epävakaus sekä järjestelmien toteutuksen ja kapseloinnin laatu, jotka vaikuttavat ratkaisevasti järjestelmien luotettavuuteen ja sovellettavuuteen.

AVAINSANAT: faasimuutosmateriaalit, lämpöenergian varastointi, PCM, talotekniikka, rakennusten energiatehokkuus, latenttilämpö, uusiutuva energia

UNIVERSITY OF VAASA**School of Technology and Innovations**

Author:	Emma Kangas		
Title of the Thesis:	Utilization of Phase Change Materials in Thermal Energy Storage in Building		
Degree:	Master of Science in Technology		
Discipline:	Energy Technology		
Supervisor:	Anne Mäkiranta		
Instructor:	Birgitta Martinkauppi		
Year:	2026	Pages:	77

ABSTRACT:

This thesis investigates the utilization of phase change materials in thermal energy storage systems for building engineering. The study is based on a comprehensive review of previous research, which is used to assess the applicability of phase change materials, their thermal storage characteristics, and the overall energy efficiency of storage systems. In addition, a newly developed thermal energy storage system implemented within the NewHeatIntegrated project is examined.

The topic is highly relevant, as heating and cooling represent a significant share of total energy consumption in buildings. The European Union has established emission reduction targets that also apply to the building sector. Thermal energy storage based on phase change materials can support the achievement of these targets by improving energy efficiency and enabling more effective energy use.

Phase change materials enhance building energy efficiency by storing and releasing thermal energy at near-constant temperatures. They can be integrated into buildings as passive thermal storage components. Their use contributes to more stable indoor temperature conditions and can reduce both heating and cooling energy demand. In addition, phase change materials can improve the integration and utilization of renewable energy sources in building energy systems.

The practical part of the study demonstrates that the effective application of phase change materials requires careful design, implementation, and integration of thermal energy storage systems. The thermophysical properties of the materials alone are not sufficient to ensure reliable system performance, as the overall system configuration and installation quality play a critical role.

In conclusion, phase change materials offer significant potential for improving energy efficiency in buildings. Based on previous research, they can enhance temperature regulation, reduce thermal load fluctuations, and improve overall system efficiency. However, practical implementation is still challenged by issues such as long-term material stability, phase change reliability, and the quality of system design and encapsulation.

KEYWORDS: phase change materials, thermal energy storage, PCM, building engineering, building energy efficiency, latent heat, renewable energy

Sisällys

1	Johdanto	10
1.1	Tausta ja merkitys	10
1.2	Lämpöenergian varastointi rakennusten energiajärjestelmissä	13
1.3	Faasimuutosmateriaalit osana lämpöenergian varastointijärjestelmiä	14
1.4	Tutkielman tavoitteet ja tutkimuskysymys	16
1.5	Tutkimusmenetelmä	17
2	Kirjallisuuskatsaus	18
2.1	Lämpöenergian varastoinnin periaatteet	18
2.1.1	Aistittava lämpöenergian varastointi	19
2.1.2	Latenttilämmön varastointi	20
2.1.3	Termokemiallinen lämmön varastointi	21
2.2	Faasimuutosmateriaalit	22
2.2.1	Faasimuutosmateriaalien luokittelu	23
2.2.2	Suolahydraatit	24
2.3	Lämpöenergian varastointimoduulit ja -järjestelmät	24
2.4	Mittaukset kirjallisuudessa	26
2.5	Lämpötilaprofiilien mittaus	26
2.6	Virtausmittaukset	28
3	Aiemmat tutkimukset	30
3.1	Vesi-jää- ja suolahydraattipohjaisten PCM-järjestelmien 4E-vertailu	30
3.2	Edistyneet faasimuutosmateriaalit lämpöenergian varastoinnissa	33
3.3	Lämpöpumppujen yhdistäminen faasimuutosmateriaaleihin perustuvaan lämpöenergian varastointiin	35
3.4	EG-vahvistetun faasimuutosmateriaalin soveltaminen aurinkolämpövarastointiin	39
3.5	Faasimuutosmateriaalin vaikutus lämpöenergian varastointijärjestelmän suorituskykyyn	41
3.6	Yhteenveto aiemmista tutkimuksista	42

4	Uusi tutkimus – PCM-pohjainen lämpöenergian varastointijärjestelmä osana rakennuksen lämmitysratkaisua	45
4.1	Mittausjärjestelmän toteutus faasimuutosmateriaalipohjaisessa lämpövarastossa	46
4.2	Mittausjärjestelmän käyttöönoton tila	57
5	Tulokset	59
5.1	Tulokset aiemmissä tutkimuksissa	59
5.1.1	Lämpötilaprofiilit	59
5.1.2	Lataus- ja purkuominaisuudet	60
5.1.3	Faasimuutosmateriaalien käyttäytyminen ja alijäähtyminen	60
5.1.4	Energiatiheys ja lämmönsiirron tehokkuus	61
5.1.5	Järjestelmän suorituskyky	61
5.1.6	Yhteenvedo aiempien tutkimusten tuloksista	62
5.2	Tulokset uusissa mittauksissa	62
6	Pohdinta	64
7	Johtopäätökset	67
8	Yhteenvedo	69
	Lähteet	71

Kuvat

Kuva 1. Lämpöpumppujärjestelmä, joka hyödyntää faasimuutosmateriaalipohjaista tai latenttilämmön varastointia (Suresh ja muut, 2026).	37
Kuva 2. Toteutus PCM-PBD-pohjaisesta aurinkolämpövesilämmitysjärjestelmästä (Chopra ja muut, 2026).	39
Kuva 3. Leipätehtaan rakennus.	46
Kuva 4. Kaksi rinnakkaista faasimuutosmateriaalia sisältävää lämpöenergian varastointiyksikköä sijoitettuna todelliseen ympäristöön.	47
Kuva 5. Lämpöenergian varastointiyksikön ylämoduuli.	48
Kuva 6. Lämpöenergian varastointiyksikkö kuvattuna sivulta päin.	49
Kuva 7. Mittausjärjestelmän sähkönsyöttöyksikkö Siemens LOGO!Power sekä siihen liitetyt lisäkomponentit.	51
Kuva 8. Kamstrupin valmistama energiamittari asennettuna järjestelmään.	53
Kuva 9. Lämpöenergian varastointiyksikön putkisto asennusvaiheessa.	54
Kuva 10. Testausjärjestelmän ja rakennuksen lämmönjakoverkon välinen putkisto	55
Kuva 11. Testausjärjestelmän putkistoa ja liitäntöjä asennusvaiheessa.	56

Kuviot

Kuvio 1. Asumisen energiankulutus käyttökohteen mukaan 2008–2024 (Tilastokeskus, 2025a).	11
Kuvio 2. Sähkön tuotanto energialähteen mukaan 2000–2024 (Tilastokeskus, 2025b).	12
Kuvio 3. Faasimuutosmateriaalien toiminta lämpötilan ja energian funktiona (mukaillen Thermtest, 2024).	16
Kuvio 4. Aistittavan lämpöenergian varastointimateriaalit (mukaillen Khatod ja muut, 2022).	19

Taulukot

Taulukko 1. Latenttilämpöä varastoivan materiaalin tärkeimmät ominaisuudet (Yousef ja muut, 2021).	21
Taulukko 2. Optimoidut tulokset lämmönsiirtoputken sisähalkaisijalle (Jian ja muut, 2015).	26
Taulukko 3. Lämpöenergian varastointijärjestelmien vertailu (Sanaye ja muut, 2026).	32
Taulukko 4. PCM-TES:n vaikutus lämpöpumppujärjestelmän suorituskykyyn (Suresh ja muut, 2026).	38

Symbolit ja lyhenteet

$\$/kWh$	Yhdysvaltain dollari per kilowattitunti
%	Prosentti
$\€/kWh$	Euro per kilowattitunti
$^{\circ}C$	Celsius-aste
4E	Energia, ympäristö, talous ja <i>tekniikka (Energy, Environment, Economy, Exergy)</i>
A	Esimerkkiaine
AB	Esimerkkiyhdiste
B	Esimerkkiaine
CO ₂	Hiilidioksidi
COP	Lämpökerroin (<i>Coefficient of Performance</i>)
DC	Tasavirta (<i>Direct Current</i>)
d_i	Putken sisähalkaisija
EG	Paisutettu grafiitti (<i>Expanded Graphite</i>)
EN 1434	Eurooppalainen standardi lämpöenergiamittareille
EU	Euroopan unioni
FOS-SA	Muotostabiili steariinihappo–paisutettu grafiitti -komposiitti
kWh	Kilowattitunti
kWh/vuosi	Kilowattituntia vuodessa

L	Putkiston pituus
m	Metri
m/s	Metri per sekunti
M-Bus	Mittauslaitteiden tiedonsiirtoprotokolla (<i>Meter-Bus</i>)
mm	Millimetri
MWh	Megawattitunti
MWh/vuosi	Megawattituntia vuodessa
N	Lämmönsiirtoputkien lukumäärä
PCM	Faasimuutosmateriaali (<i>Phase Change Material</i>)
PCM-TES	Faasimuutosmateriaalipohjainen lämpöenergian varastointi (<i>Phase Change Material Thermal Energy Storage</i>)
Pt100	Platina-anturityyppi 100 Ω lämpötilamittauksiin
Pt500	Platina-anturityyppi 500 Ω lämpötilamittauksiin
$r_{materiaali}$	Materiaalikustannus varastoitua energiayksikköä kohti
$r_{yhteensä}$	Kokonaiskustannus varastoitua energiayksikköä kohti
S8	Suolahydraattiin perustuva materiaali
SA	Steariinihappo (<i>Stearic Acid</i>)
sLHTES	Kytkevä latenttilämpövarasto (<i>Switchable Latent Heat Thermal Energy Storage</i>)
$T1-T6$	Lämpötilan mittauspisteet
TES	Lämpöenergian varastointi (<i>Thermal Energy Storage</i>)
U	Putkessa virtaavan nesteen keskimääräinen virtausnopeus
USA	Yhdysvallat
USD	Yhdysvaltain dollari
η	Hyötysuhde

Ilmoitus tekoälyn käytöstä

Tämän diplomityön laatimisen aikana työn tekijä, Emma Kangas, on hyödyntänyt ChatGPT-tekoälytyökalua ideoinnissa sekä tekstin kielen ja kieliäsun tarkastamisessa ja kehittämisessä. Tekoälyn tuottama sisältö on tarkistettu, arvioitu ja tarvittaessa muokattu tekijän toimesta. Tekijä vastaa kokonaisuudessaan diplomityön sisällöstä, sen oikeellisuudesta sekä asianmukaisuudesta.

1 Johdanto

Euroopan unioni tavoittelee lainsäädännön avulla hiilidioksidipäästöjen vähentämistä rakennusallalla. Vaikka rakennusalan ympäristöpäästöjä on pyritty vähentämään, vuonna 2025 rakennukset olivat edelleen suurin energiankuluttaja niin Euroopassa kuin globaalisti. Talotekniikassa energiankulutus painottuu rakennusten lämmitykseen ja jäähdyttämiseen. (Widera ja muut, 2025)

1.1 Tausta ja merkitys

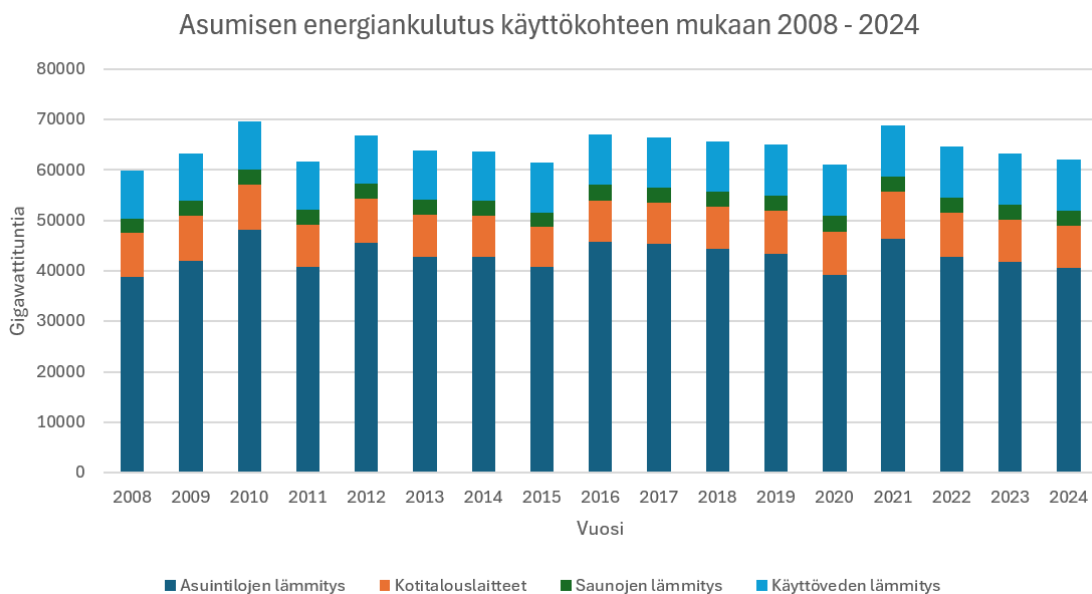
Ympäristöministeriön (n.d.) mukaan rakennusten energiatehokkuus pienentää käyttökustannuksia, parantaa asumismukavuutta ja vähentää hiilidioksidipäästöjä. Heidän arvionsa mukaan Suomessa rakennukset kuluttavat noin 40 % kaikesta energiasta. Suomen tavoitteet energiatehokkuuden parantamiseen talotekniikassa pohjautuvat EU:n rakennuksia koskeviin direktiiveihin (Ympäristöministeriö, n.d.).

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2018/844 (2018) tavoitteena on parantaa rakennusten energiatehokkuutta ja edistää rakennuskannan muuttamista hiilineutraaliksi vuoteen 2050 mennessä. Uusien rakennusten edellytetään olevan lähes nollaenergiarakennuksia, mikä tarkoittaa, että rakennusten energiantarve tulee olla hyvin vähäinen, ja tarvittava energia on tuotettava uusiutuvista energialähteistä. Tämä direktiivi velvoittaa jäsenmaitaan käyttämään energiatehokkuustodistuksia, jossa rakennukset luokitellaan energialuokkiin energiankulutuksen perusteella. Energiatehokkuustodistusten tarkoituksena on ohjata rakennuksia energiatehokkaisiin ratkaisuihin ja kannustaa peruskorjauksiin (Euroopan parlamentti ja neuvosto, 2018).

Tilastokeskuksen (2025a) mukaan vuosina 2008–2024 suurin osa asumisen energiankulutuksesta aiheutui asuintilojen lämmityksestä, kun tarkastelussa huomioidaan kaikki energialähteet. Kuviossa 1 esitetään Tilastokeskuksen (2025a) tuottama *Asumisen energiankulutus* -tilasto, joka kuvaa asumiseen liittyvää

energiankulutuksen määrää ja rakennetta. Tilastossa on huomioitu kaikki saatavilla olevat energialähteet (Tilastokeskus, 2025a).

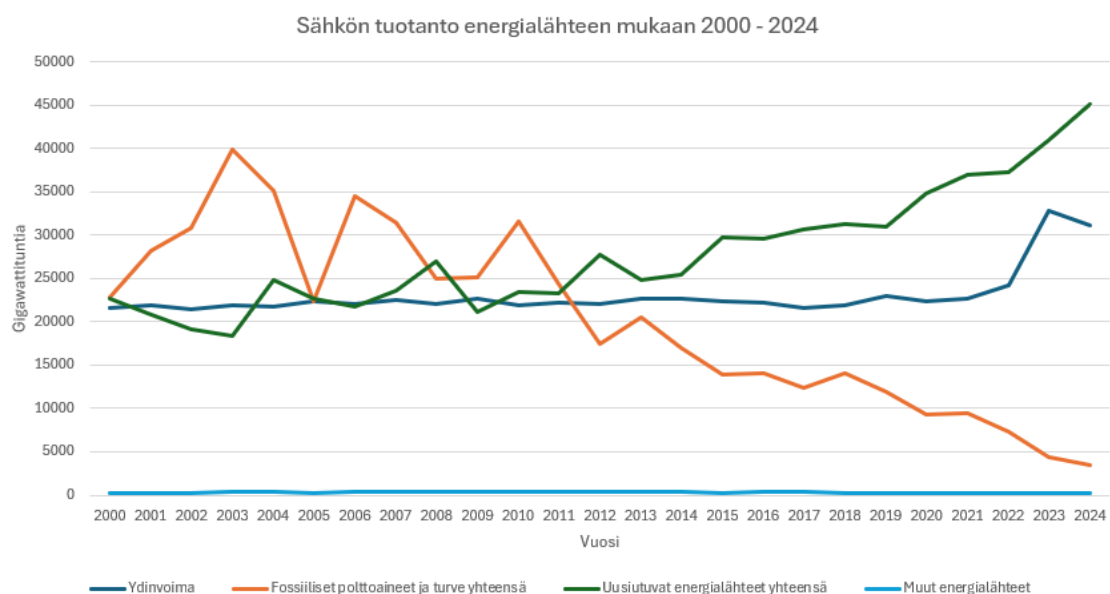
Kuviosta 1 nähdään, että yli puolet asumisen energiankulutuksesta käytetään rakennusten lämmitykseen. Toiseksi eniten energiaa kuluu käyttöveden lämmittämiseen ja melkein samoissa luvuissa ovat kotitalouslaitteiden energiankulutus. Selkeästi vähiten energiaa käytetään saunojen lämmittämiseen. Muita energiankulutuskohteita ei ole esitetty tilastossa. (Tilastokeskus, 2025a)



Kuvio 1. Asumisen energiankulutus käyttökohteen mukaan 2008–2024 (Tilastokeskus, 2025a).

Uusiutuvien energialähteiden, kuten aurinko- ja tuulivoiman, integrointi energiajärjestelmiin on tärkeää. Uusiutuvien energialähteiden hyödyntäminen vaatii usein lämpöenergian varastointia, sillä näiden energialähteiden saatavuus on luonteeltaan vaihtelevaa. Energian saatavuus ja kulutus eivät välttämättä kohdistu samaan ajankohtaan, jolloin tarvitaan toimivia varastointiratkaisuja. (Reddick ja muut, 2020)

Kuvio 2 näyttää sähkön tuotannon kehityksen eri energialähteillä. Uusiutuville energialähteillä tuotettu sähkö on jatkanut kasvuaan tasaisesti viime vuosina. Fossiilisten polttoaineiden osuus on samalla pienentynyt merkittävästi. Ydinvoiman tuotanto on noussut selvästi vasta viime vuosina, vaikka ennen vuotta 2022 sen tuotanto on ollut pitkään lähes vakio. Muiden energialähteiden osuus on lähes mitätön. Vuonna 2024 eniten sähköä tuotettiin uusiutuville energialähteillä. (Tilastokeskus, 2025b)



Kuvio 2. Sähkön tuotanto energialähteen mukaan 2000–2024 (Tilastokeskus, 2025b).

Lämpöenergian varastointijärjestelmät voivat parantaa rakennusten energiatehokkuutta, ja niiden takaisinmaksuaika voi olla alle kymmenen vuotta. On arvioitu, että erityisesti termokemiallisen energian varastointi tarjoaa korkean energiatehokkuuden ja soveltuu kausivarastointiin. Lämpöenergian varastointijärjestelmät ovat osittain kaupallisesti jo soveltuvia, mutta niissä on myös haasteita. Niiden tehokas hyödyntäminen edellyttää kehittyneitä ohjausjärjestelmiä ja järjestelmien integroitumista uusiutuviin energiajärjestelmiin. Näiden lisäksi haasteita ovat myös energian hinnan vaihtelut ja toimivat pitkän aikavälin varastointiratkaisut. (Cabeza ja muut, 2026)

Faasimuutosmateriaalien hyödyntämistä on voidaan kehittää talotekniikassa lämpöenergian varastoinnissa. Faasimuutosmateriaalien etuina ovat materiaalien termofysikaaliset, kemialliset ja taloudelliset ominaisuudet, joiden avulla voidaan saavuttaa maksimaalinen tehokkuus sekä kohtuullinen hinta sovelluksille. (Dora ja muut, 2026)

1.2 Lämpöenergian varastointi rakennusten energiajärjestelmissä

Rakennusten energiatehokkuutta voidaan parantaa energian varastoinnilla, älykkäillä ohjausjärjestelmillä sekä käyttäjälähtöisellä suunnittelulla (Widera ja muut, 2025). Kaldehin ja muiden (2025) tutkimus osoittaa, että lämpöenergian varastoinnilla on keskeinen rooli rakennusten energiatehokkuuden parantamisella. Heidän mukaansa lämpöenergian varastoinnin teknologiat ovat kehittyneet nopeasti, mutta niiden taloudellisuudessa, pitkäaikaiskestävyydessä ja standardoinnissa on edelleen haasteita.

Uusiutuvien energialähteiden integrointi energiajärjestelmään edellyttää lähes poikkeuksetta lämpövarastojen käyttöä. Auringosta ja tuulesta saatava energia on epäsäännöllistä, mutta rakennusten lämmitys- ja jäähdytystarpeet ovat jatkuvia. Lämpövarastot voivat parantaa uusiutuvien energialähteiden käyttöastetta ja parantaa rakennusten energiatehokkuutta. (Widera ja muut, 2025)

Litiumioniakkuja on käytetty sähkön varastoinnissa, mutta se ei ole kustannustehokas tai kestävä ratkaisu talotekniikassa, jossa suurin energiantarve on lämmityksessä ja jäähdytyksessä. Sen sijaan lämpöenergian varastointi eli TES tarjoaa potentiaalisen korvaajan litiumioniakuille. Faasimuutosmateriaaleihin perustuva lämpöenergian varastointi on edullisempaa, pitkäikäisempää ja materiaalien saatavuuden näkökulmasta kestävämpää kuin litiumioniakuilla tapahtuva lämpöenergian varastointi. Aikaisempien tutkimusten mukaan lämpöenergian varastointi on jo nyt kustannustehokkaampaa kuin akut. (Odukamaiya ja muut, 2021)

Lämpöenergian varastoinnin tehokas toteutus on keskeinen kehityskohde energiajärjestelmien toimivuudelle, kustannustehokkuudelle sekä päästövähennyksille. Lämpöenergian varastoinnilla voidaan varautua ennakoivasti kulutushuippuihin, jotka ajoittuvat yleensä aamuihin tai iltoihin, ja aiheutuvat pääosin korkeista kulutuskuormista. Uusiutuvien energialähteiden tuotantoa on haastavaa ajoittaa tarkasti kulutushuippujen mukaan, koska niiden saatavuus vaihtelee luonteensa vuoksi. Lämpöenergian varastoinnin avulla uusiutuvaa energiaa voidaan säästää ja hyödyntää myöhemmin ilman ylimääräistä sähkön kulutusta. (Odukomaiya ja muut, 2021)

1.3 Faasimuutosmateriaalit osana lämpöenergian varastointijärjestelmiä

Viime vuosina faasimuutosmateriaalit ovat herättäneet mielenkiintoa, sillä niillä on potentiaalia mullistaa lämpöenergian varastointijärjestelmiä. Faasimuutosmateriaaleilla on todettu olevan korkea latenttilämmön varastoitokapasiteetti, jota voidaan hyödyntää lämpöenergian varastointijärjestelmien sovelluksissa. (Yang ja muut, 2024)

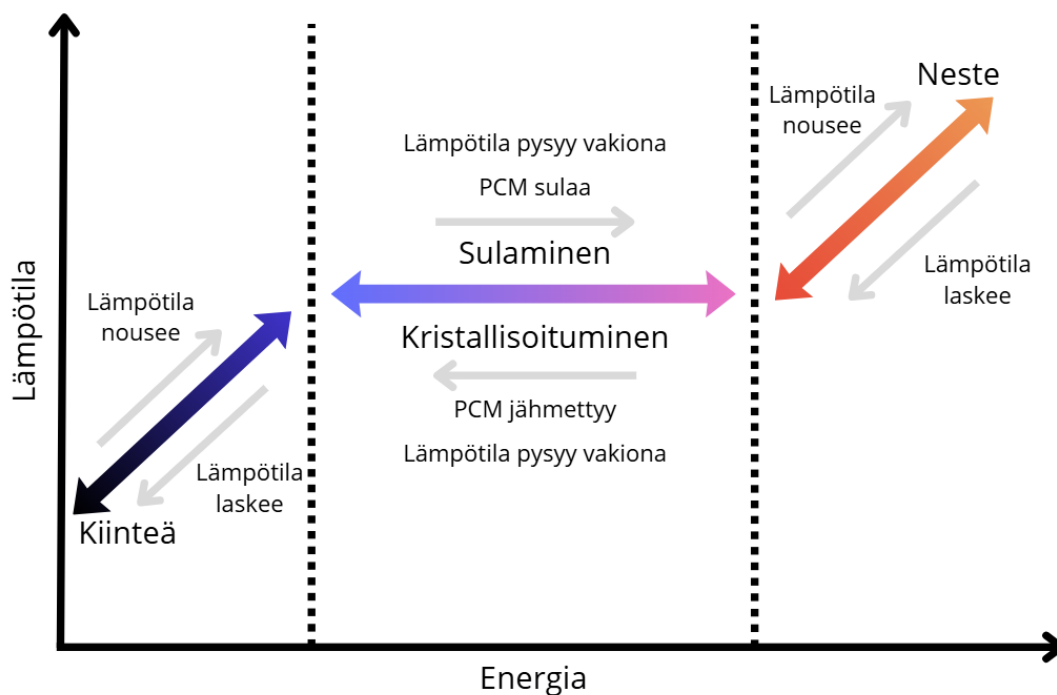
Lämpöenergian varastointijärjestelmät jaetaan kolmeen kategoriaan: aistittavan lämpöenergian varastointi, latenttilämmön varastointi ja termokemiallinen energia. Aistittavan lämpöenergian varastointi perustuu lämpötilaeroihin, mutta vaatii suuren varastointitilan. Latenttilämmön varastointi, joka perustuu usein faasimuutosmateriaaleihin, hyödyntää faasimuutoksen aikana absorboitunutta tai vapautuvaa lämpöä. Tämä lähestymistapa tarjoaa korkean energian varastointitiheyden ja pienet lämpötilavaihtelut, mikä johtaa lämpöhäviöiden ja tilavuuden minimointiin. Termokemialliset varastointijärjestelmät toimivat palautuvin reaktioiden kautta. Tätä varastointimenetelmää ei ole tutkittu vielä tarpeeksi kaupallistamista varten. (Yang ja muut, 2024)

Näistä menetelmistä latenttilämmön varastointi on noussut lupaavammaksi lämpöenergian varastointijärjestelmäksi. Faasimuutosmateriaaleja voidaan soveltaa monenlaisissa tilanteissa, joissa esiintyy muun muassa hukkalämpöä.

Faasimuutosmateriaalien hyödyntämistä lämpöenergian varastointijärjestelmissä tarjoaa lämpöenergian varastointikapasiteettia kohtuuhintaisesti ja luotettavasti. On arvioitu, että tällä lähestymistavalla voidaan säilöä puhdasta energiaa ja saavuttaa kestävä kehityksen tavoitteita. (Yang ja muut, 2024)

Faasimuutosmateriaalit varastoivat energiaa pääosin faasimuutoksen aikana, jolloin lämpöä absorboituu tai vapautuu, kun se saavuttaa sulamispisteen. Koska lataus- ja purkausvaiheet ovat lähes isotermisiä, minimaalinen lämpötilanvaihtelu vähentää merkittävästi lämpöhäviöitä ja varastointiväliaineen tilavuuden laajentumista. (Yang ja muut, 2024)

Kuvio 3 esittää faasimuutosmateriaalien, eli PCM:ien, toiminnan lämpötilan ja energian funktiona. Kun faasimuutosmateriaalin lämpötila nousee, ja se saavuttaa sulamislämpötilansa, faasimuutosmateriaali alkaa muuttumaan kiinteästä faasista nestemäiseen faasiin. Tämän faasimuutoksen aikana materiaali sitoo itseensä suuren määrän lämpöenergiaa ilman merkittävää lämpötilan nousua. Sulassa tilassa faasimuutosmateriaali pystyy varastoimaan lämpöenergiaa pitkiäkin aikoja. Kun lämpötila laskee ja ympäristö viilenee, materiaali jähmettyy takaisin kiinteään olomuotoon ja vapauttaa samalla varastoituneen lämpöenergian ympäristöön. Tätä ominaisuutta hyödynnetään esimerkiksi talotekniikassa rakennusten lämpötilan tasaamisessa ja lämmityksen tukena. (Thermtest, 2024)



Kuvio 3. Faasimuutosmateriaalien toiminta lämpötilan ja energian funktiona (mukaillen Thermtest, 2024).

Faasimuutosmateriaalien valinta vaatii huolellista menettelyä, jonka tavoitteena on löytää oikea sulamisalue, riittävä lämmönjohtavuus ja mahdollisimman pieni alijäähtyminen. Materiaaleille tehdään yleensä faasidiagrammit, jotka perustuvat faasimuutosmateriaalin ominaisuuksiin ja koostumuksiin. Näiden avulla voidaan hahmottaa visuaalisesti materiaalien käyttäytyminen. (Yang ja muut, 2024)

1.4 Tutkielman tavoitteet ja tutkimuskysymys

Tämän tutkielman tavoitteena on arvioida faasimuutosmateriaalien soveltuvuutta lämpöenergian varastointiin talotekniikassa. Erityisesti tutkielmassa tarkastellaan suolahydraattipohjaisten faasimuutosmateriaalien lämpötekniisiä ominaisuuksia sekä niiden käyttäytymistä osana rakennusten energiajärjestelmiä.

Tutkielma perustuu kirjallisuuskatsaukseen sekä suunniteltuun kokeelliseen tutkimusasetelmaan. Tutkimuskysymys on: **Voidaanko faasimuutosmateriaaleilla parantaa rakennusten energiatehokkuutta?**

1.5 Tutkimusmenetelmä

Tässä tutkielmassa perehdytään kattavasti aiempiin tutkimuksiin faasimuutosmateriaaleista. Tämän lisäksi tarkastellaan uutta faasimuutosmateriaaleihin pohjautuvaa mittausasetelmakohdetta, jossa pystytään myöhemmin toteuttamaan mittauksia.

Tutkielmassa korostuu aiempien tutkimusten tarkastelu ja suunnitellun mittausasetelman esittely. Lisäksi tutkielmassa kuvataan mittausjärjestelmän nykytila sekä siihen liittyvät keskeiset tekniset haasteet.

Tutkielma toteutetaan kvantitatiivisena eli määrällisenä tutkimuksena. Kvantitatiivinen tutkimus on menetelmä, jossa jotain ilmiötä tutkitaan numeeristen tietojen ja tilastojen avulla (Jyväskylän yliopisto, n.d.). Kvantitatiivinen tutkimus keskittyy asioiden luokitteluun, mittaamiseen ja laskemiseen sekä ilmiöiden selittämiseen numeroiden avulla (Jyväskylän yliopisto, n.d.). Kvantitatiivinen lähestymistapa soveltuu tähän tutkielmaan, koska lämpöenergian varastointia ja faasimuutosmateriaalien ominaisuuksia voidaan kuvata mitattavilla suureilla, kuten lämpötilalla, virtausnopeuksilla ja energiatiheydellä.

2 Kirjallisuuskatsaus

Lämpöenergian varastoinnilla on ratkaiseva rooli uusiutuvien energialähteiden hyödyntämisessä ja hukkalämmön kierrättämisessä (Chi ja muut, 2024). Lämpöenergian varastointijärjestelmät tarjoavat tehokkaan ratkaisun tasapainottamaan energian tarjonnan ja kysynnän rajapintaa, ja niillä on ratkaiseva rooli verkon vakauttamiselle ja taloudelliselle tehokkuudelle (Tang ja muut, 2026).

2.1 Lämpöenergian varastoinnin periaatteet

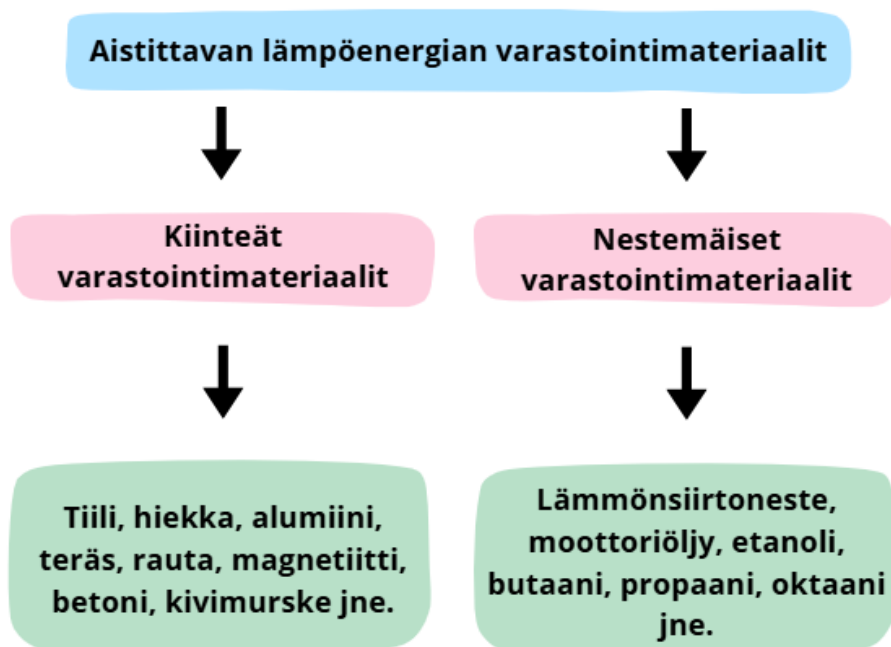
Kaikki materiaalit varastoivat lämpöä atomien värähtelyjen kineettisen energian muodossa. Materiaalit, joilla on suurempi ominaislämpökapasiteetti, pystyvät varastoimaan enemmän lämpöä saman lämpötilan nousun aikana, minkä vuoksi ne yleensä tarjoavat suuremman energiatiheyden. Nestemäinen vesi, jonka ominaislämpökapasiteetti on korkea, on yleinen väliaine lämmön varastoinnissa. Myös muita materiaaleja, kuten alkoholeja, muoveja, betonia ja metalleja, on hyödynnetty lämmönvarastointijärjestelmissä. (Kiyabu ja muut, 2025)

Lämpöenergian varastointi voidaan jakaa aistittavan lämpöenergian, latenttilämmön ja termokemiallisen lämmön varastointiin. Näitä menetelmiä hyödynnetään laajasti erityisesti uusiutuviissa energiajärjestelmissä, kuten aurinko- ja hukkalämmön talteenotossa, sekä rakennusten energiatehokkuuden parantamisessa. Varastointitekniikan valinta riippuu muun muassa sovelluksen vaatiman lämpötilatason, energiatiheyden, varastointiajan ja energian laadun vaatimuksista, minkä vuoksi eri menetelmät soveltuvat erilaisiin käyttötarkoituksiin. (Tang ja muut, 2026)

2.1.1 Aistittava lämpöenergian varastointi

Lämpöenergiaa voidaan varastoida aistittavana lämpöenergiana. Aistittavan lämpöenergian varastointijärjestelmät hyödyntävät materiaalin lämpökapasiteettia ja lämpötilan muutosta lataus- ja purkamisprosessin aikana. Varastointimateriaalin lämpötila nousee, kun energiaa absorboituu, ja laskee, kun energia otetaan talteen. Yksi aistittavan lämpöenergian varastointijärjestelmien eduista on se, että lataus- ja purkuprosessit voidaan toistaa toistuvasti ilman suorituskyvyn heikkenemistä koko elinkaaren ajan. (Garg ja muut, 1985)

Aistittavat lämpöenergian varastointimateriaalit jaetaan kahteen päätyyppiin niiden olomuodon perusteella, kuten kuviossa 4 on esitetty. Kiinteisiin varastointimateriaaleihin kuuluvat muun muassa tiili, hiekka, alumiini ja teräs. Nestemäisiin varastointimateriaaleihin puolestaan lukeutuvat esimerkiksi lämmönsiirtoneste, moottoriöljy ja etanoli. (Khatod ja muut, 2022)



Kuvio 4. Aistittavan lämpöenergian varastointimateriaalit (mukaillen Khatod ja muut, 2022).

Aistittavan lämpöenergian varastointijärjestelmien käytössä on kuitenkin haasteita. Esimerkiksi käytettävien materiaalien alhainen energiatiheys sekä ajan myötä tapahtuvat lämpöhäviöt rajoittavat niiden soveltuvuutta pitkäaikaiseen varastointiin. Lyhyen aikavälin varastointiin, kuten päivien tai viikkojen mittaisiin jaksoihin, aistittavat lämpövarastot sen sijaan soveltuvat hyvin. (Huang ja muut, 2026)

2.1.2 Latenttilämmön varastointi

Latenttilämmön varastointi tarkoittaa isotermistä tai lähes isotermistä lämpöenergian varastointia. Sen toimintaperiaate perustuu materiaalin faasimuutoksen hyödyntämiseen, tyypillisesti sulamisen ja jähmettymisen yhteydessä. Energia sitoutuu ja vapautuu lähes vakiolämpötilassa ilman merkittävää lämpötilan muutosta, mikä mahdollistaa korkean energiatiheyden ja hyvän lämpötilavakauden. Latenttilämmön varastointiin käytetään faasimuutosmateriaaleja, jotka soveltuvat erityisesti sovelluksiin, joissa lämpöä tarvitaan tarkasti määritetyllä lämpötilatasolla. (Tang ja muut, 2026)

Latenttilämpöä varastoivien materiaalien ominaisuudet ovat ratkaisevia niiden toimivuuden ja energiatehokkuuden kannalta. Taulukosta 1 voidaan havaita, että nämä ominaisuudet voidaan jakaa kolmeen pääryhmään: lämpö-, fysikaalisiin ja kemiallisiin ominaisuuksiin. Lämpöominaisuuksien osalta materiaalilta edellytetään esimerkiksi sopivaa faasimuutoksen lämpötilaa, korkeaa latenttilämpöä tilavuus- ja massayksikköä kohti sekä hyvää ominaislämpökapasiteettia, jotta energiaa voidaan varastoida ja vapauttaa tehokkaasti. Fysikaaliset ominaisuudet, kuten korkea tiheys, vähäinen tilavuuden muutos faasimuutoksen aikana ja hyvä lämmönjohtavuus kiinteässä ja nestemäisessä faasissa, vaikuttavat materiaalin kykyyn sitoa ja siirtää lämpöä luotettavasti. Kemialliset ominaisuudet, kuten stabiilius, syöpymättömyys, myrkyttömyys ja kyky uudelleen kiteytyä ilman suorituskyvyn heikkenemistä, varmistavat materiaalin pitkäaikaisen toimivuuden ja turvallisuuden käytössä. Näiden ominaisuuksien yhdistelmä tekee latenttilämpöä varastoivista materiaaleista erityisen

soveltuvia lämpöenergian varastointijärjestelmiin, joissa vaaditaan korkeaa energiatiheyttä ja vakaita lämpötiloja. (Yousef ja muut, 2021)

Taulukko 1. Latenttilämpöä varastoivan materiaalin tärkeimmät ominaisuudet (Yousef ja muut, 2021).

Lämpöominaisuudet	Fysikaaliset ominaisuudet	Kemialliset ominaisuudet
Sopiva faasimuutoksen lämpötila	Korkea tiheys	Syöpymätön, myrkytön
Korkea latenttilämpö tilavuus- ja massayksikköä kohti	Alhainen höyrynpaine käyttölämpötilassa	Kemiallisesti stabiili
Korkea ominaislämpökapasiteetti	Vähäinen tilavuuden muutos faasimuutoksen aikana	Yhteensopiva rakenne- ja säiliömateriaalien kanssa
Korkea lämmönjohtavuus kiinteässä ja nestemäisessä faasissa	Pieni alijäähtymisaste ja suuri kiteytymisnopeus	Uudelleen kiteytyy ilman heikkenemistä
Nopea lämmönsiirto	Suotuisa faasitasapaino	Ei kemiallista hajoamista, täysin palautuva jäätymis-sulamiskierto

Latenttilämpöä hyödynnetään laajasti aurinkolämpöjärjestelmissä, rakennusten energiansäästöissä ja elektronisten laitteiden jäähdytyksessä. Sen korkea energiatiheys ja hyvä lämpötilavakaus tekevät siitä myös erinomaisen ratkaisun hukkalämmön talteenottoon. (Tang ja muut, 2026)

2.1.3 Termokemiallinen lämmön varastointi

Termokemiallinen lämmön varastointi perustuu lämpöenergian sitomiseen ja vapauttamiseen palautuvien kemiallisten reaktioiden tai sorptioprosessien avulla.

Termokemiallisessa lämmön varastoinnissa materiaali käy läpi palautuvan kemiallisen reaktion, jossa yhdiste AB hajoaa aineiksi A ja B samalla sitoen lämpöenergiaa. Vastaavasti varastoitunut energia vapautuu, kun reaktio tapahtuu käänteisesti eli aineet A ja B yhdistyvät takaisin alkuperäiseksi yhdisteeksi AB. Tämä voidaan esittää kaavan 1 mukaisesti. (Panchabikesan ja muut, 2022)



Toisin kuin aistittavaa tai latenttia lämpöä varastoivissa materiaaleissa, termokemiallisessa varastoinnissa lämpöenergia ei vähene ajan myötä merkittävästi. Energia säilyy varastoituneena kemiallisissa yhdisteissä niin kauan kuin reaktiossa syntyneet aineet pidetään erillään toisistaan. Termokemialliset materiaalit tarjoavat suurimman energiatiheyden kaikista lämpöenergian varastointimenetelmistä. Menetelmään liittyy kuitenkin myös haasteita, kuten hitaat reaktionopeudet, mahdolliset ei-toivotut sivureaktiot sekä lämmön ja massan siirtoon liittyvät rajoitukset. (Kiyabu ja muut, 2025)

2.2 Faasimuutosmateriaalit

Faasimuutosmateriaalien lämpöominaisuudet mahdollistavat tehokkaan lämpöenergian varastoinnin faasimuutoksen aikana. Faasimuutosmateriaalit voidaan luokitella eri ryhmiin esimerkiksi käyttölämpötilan, faasimuutostyyppin tai materiaalin koostumuksen perusteella. Eri materiaalityypeillä on omat etunsa ja rajoituksensa. Sopivan faasimuutosmateriaalin valinta riippuu käyttökohteesta ja sen vaatimuksista, kuten lämpöominaisuuksista, kestävydestä ja kustannuksista. (Cao ja muut, 2026)

2.2.1 Faasimuutosmateriaalien luokittelu

Käyttölämpötilan perusteella faasimuutosmateriaalit voidaan luokitella matalan, keskilämpötilan ja korkean lämpötilan materiaaleihin. Tämä luokittelu osoittaa, että faasimuutosmateriaaleja voidaan hyödyntää monilla eri aloilla energiatehokkuuden parantamiseksi. (Cao ja muut, 2026)

Faasimuutoksen perusteella tehtävä luokittelu kuvaa materiaalissa tapahtuvaa olomuodon muutosta. Faasimuutos voi tapahtua kiinteän ja kiinteän, kiinteän ja nesteen, kiinteän ja kaasun tai nesteen ja kaasun välillä. Kaasuolomuotoon liittyvät faasimuutokset voivat aiheuttaa suuria tilavuuden muutoksia. Kiinteä–kiinteä-faasimuutosmateriaalit puolestaan varastoivat yleensä vähemmän lämpöenergiaa kuin muut faasimuutosmateriaalit. (Cao ja muut, 2026)

Koostumuksen perusteella faasimuutosmateriaalit jaetaan kolmeen pääryhmään: epäorgaanisiin faasimuutosmateriaaleihin, orgaanisiin faasimuutosmateriaaleihin ja eutektisiin seoksiin. Epäorgaanisiin faasimuutosmateriaaleihin kuuluvat esimerkiksi suolahydraatit, suolat, metallit ja metalliseokset. Niiden etuja ovat hyvä lämpöstabiilisuus ja luotettavuus, kun taas haittoina pidetään suurta tiheyttä, korkeaa lämmönjohtavuutta ja korkeita kustannuksia. (Cao ja muut, 2026)

Orgaanisiin faasimuutosmateriaaleihin kuuluvat muun muassa parafiinit ja rasvat. Niiden etuja ovat kemiallinen stabiilisuus, turvallisuus sekä vähäinen alijäähtymistäipumus. Haittoina ovat puolestaan heikko lämmönjohtavuus kiinteässä olomuodossa, syttyvyys sekä alhainen energian varastointikyky tilavuutta kohti. (Cao ja muut, 2026)

Eutektiset seokset koostuvat useamman aineen yhdistelmästä, ja niiden ominaisuudet riippuvat seoksen koostumuksesta. Niitä käytetään erityisesti sovelluksissa, joissa halutaan saavuttaa tarkasti määritelty sulamislämpötila. (Cao ja muut, 2026)

2.2.2 Suolahydraatit

NewHeatIntegrated-projektissa tutkitaan ja kehitetään suolahydraatteja teknisesti käyttökelpoisiksi faasimuutosmateriaaleiksi (NewHeatIntegrated, n.d.). Tämän vuoksi suolahydraatteja tarkastellaan tässä tutkielmassa tarkemmin.

Suolahydraatit ovat epäorgaanisia faasimuutosmateriaaleja, jotka soveltuvat hyvin lämpöenergian varastointiin niiden tehokkuuden ja luotettavuuden ansiosta. Niiden käyttöä voivat kuitenkin rajoittaa materiaalien suuri tiheys sekä suhteellisen korkeat kustannukset. (Cao ja muut, 2026)

Suolahydraatit varastoivat lämpöenergiaa kiteytymisen ja sulamisen yhteydessä vapautuvan ja sitoutuvan latenttilämmön avulla. Suolahydraattien etuja faasimuutosmateriaaleina ovat korkea latenttilämpö eli suuri energiatiheys tilavuusyksikköä kohden, hyvä lämmönjohtavuus, tarkka sulamispiste, palamattomuus, alhainen myrkyllisyys, edullisuus sekä hyvä saatavuus. Näiden ominaisuuksien ansiosta suolahydraatit soveltuvat hyvin rakennustekniikan lämpötilanhallintasovelluksiin. (Dixit ja muut, 2022)

Suolahydraatteihin liittyy kuitenkin myös haasteita, jotka voivat rajoittaa niiden käyttöä. Kiteytyminen ei aina käynnisty hallitusti, mikä voi aiheuttaa alijäähtymistä. Lisäksi suolahydraateissa voi esiintyä faasierottumista, jolloin suola ja kidevesi erottuvat toisistaan toistuvien lämpösykliä aikana. Haasteita aiheuttavat myös materiaalin vuotaminen sulassa tilassa sekä rajallinen pitkäaikainen syklinen stabiilisuus. (Dixit ja muut, 2022)

2.3 Lämpöenergian varastointimoduulit ja -järjestelmät

Lämpöenergian varastointijärjestelmät perustuvat siihen, että lämpöä varastoidaan ja vapautetaan faasimuutosmateriaalien avulla. Näissä järjestelmissä keskeistä ovat

faasimuutosmateriaalin lataus- ja purkausvaiheet. Latausvaiheessa lämpöenergia siirtyy lämmönsiirtonesteestä järjestelmän sisäisen kierukan kautta faasimuutosmateriaaliin. Järjestelmässä on usein metalliverkko, joka tehostaa lämmönsiirtoa ja nopeuttaa energian varastoitumista materiaaliin. Purkausvaiheessa prosessi tapahtuu päinvastoin, jolloin faasimuutosmateriaali vapauttaa varastoituneen lämpöenergian. Metalliverkko ja järjestelmän rakenne tukevat lämmön siirtymistä materiaalista metallikuoreen ja edelleen ympäristöön. Näiden vaiheiden avulla lämpöenergian varastointijärjestelmät pystyvät varastoimaan ja vapauttamaan lämpöenergiaa tehokkaasti ja hallitusti. (Gao ja muut, 2026)

Jian ja muut (2015) ovat tutkineet kiinteiden lämpöenergian varastointimoduulien suunnittelua ja optimointia aurinkolämpövoimalaitossovelluksissa. Tutkimuksessa varastointimoduulit koostuvat useista sylinterimäisistä yksiköistä, jotka on asetettu rinnakkain ja jotka muodostavat yhdessä toimivan kokonaisuuden. Oletuksena on, että lämmönsiirtonesteen virtaus jakautuu tasaisesti kaikissa sylintereissä, jolloin analyysi voidaan kohdistaa yhteen sylinterimäiseen varastointiyksikköön (Jian ja muut, 2015).

Tutkimuksessa optimoitiin varastointimoduulin rakennetta ja etsittiin parametreja, joilla järjestelmä toimii mahdollisimman tehokkaasti ja kustannustehokkaasti. Taulukossa 2 on esitetty optimaaliset arvot. Tutkimuksen mukaan putken sisähalkaisija d_i on 16 mm, putkiston pituus L on joko 32,9 m tai 25,7 m, lämmönsiirtonesteen keskimääräinen virtausnopeus U on joko 0,0903 m/s tai 0,0671 m/s, lämmönsiirtoputkien lukumäärä N on joko 76 kpl tai 101 kpl, järjestelmän hyötysuhde η on joko 8,2 tai 8,1, materiaalikustannukset varastoitua energiayksikköä kohti $r_{materiaali}$ on 6,51 \$/kWh ja kokonaiskustannus varastoitua energiayksikköä kohden on $r_{yhteensä}$ 970 \$/kWh. (Jian ja muut, 2015)

Taulukko 2. Optimoidut tulokset lämmönsiirtoputken sisähalkaisijalle (Jian ja muut, 2015).

d_i (mm)	L (m)	U (m/s)	N	η	$r_{materiaali}$ (\$/kW h)	$r_{yhteensä} \cdot 10^3$ (\$/kW h)
16	32,9	0,0903	76	8,2	6,21	-
16	25,7	0,0671	101	8,1	-	0,97

Jianin ja muiden (2015) tulokset osoittavat, että lämpöenergian varastointimoduulin suorituskykyyn voidaan vaikuttaa merkittävästi sen rakenteellisilla ja virtausteknisillä parametreilla. Erityisesti putkiston geometria, virtausnopeus ja lämmönsiirtoputkien lukumäärä vaikuttavat järjestelmän hyötysuhteeseen ja kustannustehokkuuteen. Optimoitu rakenne parantaa lämmönsiirtoa faasimuutosmateriaalin ja lämmönsiirtonesteen välillä, mikä tehostaa varastointia ja energian hyödyntämistä. Lisäksi tulokset osoittavat, että järjestelmän kustannukset varastoitua energiayksikköä kohden voidaan pitää kohtuullisina optimoiduilla parametreilla, mikä korostaa rakenteellisen optimoinnin merkitystä lämpöenergian varastointijärjestelmien suunnittelussa. (Jian ja muut, 2015)

2.4 Mittaukset kirjallisuudessa

Faasimuutosmateriaalien hyödyntämistä lämpöenergian varastoinnissa talotekniikan sovelluksissa voidaan tutkia kokeellisilla mittauksilla, joista keskeisimpiä ovat lämpötilaprofiilien sekä virtausominaisuuksien mittaukset. Näiden avulla voidaan arvioida järjestelmien dynaamista lämpökäyttäytymistä, lämpöenergian siirtymistä sekä varastoinnin ja purkamisen tehokkuutta käytännön olosuhteissa. (Shanmugavalli & Rajaraman, 2026)

2.5 Lämpötilaprofiilien mittaus

Shanmugavalli ja Rajaraman (2026) kuvaavat lämpötilaprofiilien mittauksen kokeellisessa lämpöenergian varastointijärjestelmässä siten, että J-tyyppin termoparit

sijoitettiin strategisesti varaajasäiliön ylä-, keski- ja alaosiin lämpökerrostumisen seuraamiseksi sekä lämmönsiirtoaineen sisään- ja ulostulokohtiin lämpötilamuutosten havaitsemiseksi. PCM-järjestelmässä osa antureista asennettiin suoraan faasimuutosmateriaalikapseleiden sisälle, ylä-, keski- ja ala-alueille, jotta voitiin seurata PCM:n sulamis- ja jähmettymisprosessia sekä sen vaikutusta lämpöenergian varastointiin ja vapautumiseen. Kaikki termoparit liitettiin digitaaliseen tiedonkeruujärjestelmään, joka tallensi lämpötilat jatkuvana aikasarjana koko lataus- ja purkusyklin ajan. Näin muodostettiin lämpötilaprofiilit, joiden avulla analysoitiin lämpötilan kehittymistä ajassa ja paikassa sekä arvioitiin lämpökerrostumista ja faasimuutosmateriaalin vaikutusta järjestelmän lämpötekniiseen käyttäytymiseen. (Shanmugavalli & Rajaraman, 2026)

García-Alonso ja muut (2026) suorittivat lämpötilaprofiilin mittaukset täysin instrumentoidulla kokeellisella testipenkillä, jossa useita kalibroituja Pt100-lämpötila-antureita sijoitettiin lämmönsiirtoaineen virtausreitteihin sekä faasimuutosmateriaalin (PCM) sisälle ja sen rajapintoihin. Antureiden avulla mitattiin samanaikaisesti lämpötiloja varaajan tulo- ja lähtökanavissa sekä eri sisäisissä mittauspisteissä, jolloin voitiin muodostaa sekä ajallinen että varaajan pituussuuntainen lämpötilaprofiili lataus- ja purkujaksojen aikana. Mittaukset toteutettiin kontrolloiduissa olosuhteissa ja data kerättiin jatkuvalla tiedonkeruujärjestelmällä, mikä mahdollisti lämpötilojen tarkan reaaliaikaisen seurannan ja lämpötilagradienttien analysoinnin. (García-Alonso ja muut, 2026)

Shanmugavalli ja Rajaraman (2026) sekä García-Alonso ja muut (2026) kuvaavat lämpötilaprofiilien mittauksen perustuvan useiden kalibroitujen lämpötila-antureiden sijoittamiseen varastointijärjestelmän keskeisiin kohtiin, jolloin voidaan samanaikaisesti seurata lämpötilan vaihtelua sekä ajassa että eri sijainneissa. Mittauspisteet kattavat virtaavan lämmönsiirtoaineen tulo- ja lähtöalueet sekä varastointimateriaalin sisäiset ja rajapintavyöhykkeet, mikä mahdollistaa lämpötilagradienttien ja energian siirtymisen tarkastelun. Kaikki mittausdata kerätään jatkuvalla tiedonkeruujärjestelmällä

kontrolloiduissa olosuhteissa, jolloin muodostetaan yhtenäiset lämpötilaprofiilit järjestelmän toiminnan analysointia varten. (Shanmugavalli & Rajaraman, 2026; García-Alonso ja muut, 2026)

2.6 Virtausmittaukset

Virtausmittauksissa käytetään yleensä virtausmittareita, joiden avulla voidaan määrittää nesteen tilavuusvirta järjestelmässä. Yadav ja muut (2026) kertovat, että heidän tutkimuksessaan käytettiin lämpöenergian varastointijärjestelmää, jossa kuumennus- ja jäähdytyspiirit toimivat samanaikaisesti. Tutkimuksen virtausmittaukset toteutettiin siten, että sekä kuumennus- että jäähdytyspiirin lämmönsiirtonesteiden tilavuusvirtoja säädettiin erikseen käsikäyttöisillä venttiileillä ja seurattiin erillisillä virtausmittareilla. Näin kummankin piirin virtaus pystyttiin asettamaan halutulle tasolle ja pitämään vakiona kokeiden aikana. Virtausmittarit mittasivat jatkuvasti nesteiden tilavuusvirtaa, mikä mahdollisti luotettavan seurannan ja tarkan lämmönsiirron sekä energiataseiden analysoinnin yhdessä lämpötilamittausten kanssa. (Yadav ja muut, 2026)

Fareedi ja muut (2026) kuvaavat tutkimustaan lämpöenergian varastointijärjestelmän kokeellisesta analyysistä. Siinä virtausta säädettiin suljetussa kiertopiirissä venttiilien avulla, joilla ohjattiin lämmönsiirtonesteen kulkua joko TES-yksikön läpi tai ohituslinjan kautta, jotta saavutettiin ensin terminen tasapaino ja sen jälkeen stabiili virtausolosuhde kokeiden ajaksi. Virtausmittaukset toteutettiin kiertopiiriin asennetulla inline-virtausmittarilla, joka mittasi jatkuvasti veden tilavuusvirtaa reaaliaikaisesti ja mahdollisti virtausnopeuden seurannan koko kokeen ajan. Mittarin avulla varmistettiin, että virtaus pysyi vakiona asetetussa arvossa 2,70 l/min kaikilla kallistuskulmilla, ja mahdolliset vaihtelut havaittiin välittömästi ja voitiin kompensoida venttiilisäädöillä. Näin virtausmittaus toimi sekä säätöä ohjaavana että kokeiden toistettavuuden varmistavana mittausmenetelmänä. (Fareedi ja muut, 2026)

Virtausmittaukset toteutetaan lähes aina virtausmittareilla, joilla määritetään nesteen tilavuusvirta ja varmistetaan sen pysyminen vakiona kokeen aikana. Yadav ja muut (2026) toteavat, että heidän tutkimuksensa virtaus säädettiin käsikäyttöisillä venttiileillä ja mitattiin erillisillä virtausmittareilla, jolloin kuumennus- ja jäähdytyspiirien tilavuusvirrat voitiin pitää vakioina ja seurata reaaliaikaisesti. Fareedi ja muut (2026) puolestaan toteavat, että suljetussa kiertopiirissä virtaus ohjattiin venttiileillä TES-yksikön tai ohituslinjan kautta ja mitattiin inline-virtausmittarilla, mikä mahdollisti vakaan virtausnopeuden ylläpidon sekä mittausten toistettavuuden. Nämä menetelmät mahdollistavat luotettavan virtauksen laskennan ja vertailukelpoiset tulokset eri koeolosuhteissa.

3 Aiemmat tutkimukset

Aiempien tutkimusten tarkastelu on tärkeä osa tätä diplomityötä, sillä niiden avulla voidaan muodostaa kokonaiskuva faasimuutosmateriaaleihin perustuvien lämpöenergian varastointijärjestelmien nykytilasta, hyödyistä ja haasteista. Aiempien tutkimusten avulla voidaan tunnistaa keskeiset tulokset, järjestelmäratkaisut sekä teknologian kehityssuunnat. Lisäksi aiemmat tutkimukset toimivat hyvänä perustana tämän työn tarkastelulle ja mahdollistavat uuden tutkimuskohteen sekä suunniteltujen mittausten arvioinnin suhteessa olemassa olevaan tietoon.

3.1 Vesi–jää- ja suolahydraattipohjaisten PCM-järjestelmien 4E-vertailu

Sanaye ja muut (2026) ovat tehneet tutkimuksen, jossa vertaillaan kahta lämpöenergian varastointiin soveltuvaa faasimuutosmateriaalia: vesi–jää- sekä suolahydraattipohjaista S8-eutektista suolahydraattia. Tutkimuksen tavoitteena oli toteuttaa 4E-analyysi (energia, eksergia, talous ja ympäristö) sekä arvioida materiaalien suorituskykyä identtisissä rakennus- ja ilmasto-olosuhteissa (Sanaye ja muut, 2026).

Tutkimus toteutettiin siten, että aluksi laadittiin yksityiskohtaiset termodynaamiset mallit, joissa huomioitiin faasimuutoksen lämmönsiirto kapseloituissa faasimuutosmateriaalien varastointiyksiköissä sekä höyrykompressiokykläkiekkot. Tutkimuksessa hyödynnettiin keinotekoisia neuroverkkoja laskennallisen kuormituksen vähentämiseksi sekä monikriteerisen optimoinnin yhdistämiseksi tarkkoihin simulointeihin. Optimointiprosessi keskittyi energiatehokkuuden maksimointiin ja vuotuisen kokonaiskustannuksen minimointiin. Saatuja tuloksia validoitiin kokeellisesti sekä kirjallisuuteen verraten, ja ennustetut virheet pysyivät alle 3 %:n. (Sanaye ja muut, 2026)

Sanayen ja muiden (2026) tutkimuksen keskeiset havainnot on koottu taulukkoon 3. Taulukosta 3 nähdään, että suolahydraattijärjestelmän lämpötilataso on 8,3 °C, kun vesi–

jääseoksen vastaava lämpötila on 0 °C. Tämä osoittaa, että suolahydraattijärjestelmä toimii korkeammassa käyttölämpötilassa, mikä parantaa sen yhteensopivuutta tavanomaisten jäädytys- ja lämpöpumppujärjestelmien kanssa. (Sanaye ja muut, 2026)

Latenttilämmön osalta suolahydraateilla arvo on 95,36 kJ/kg ja vesi-jääseoksella 334 kJ/kg. Tämä tarkoittaa, että vesi-jääseos pystyy varastoimaan merkittävästi enemmän lämpöenergiaa massayksikköä kohden, mikä selittää sen korkeamman energiatiheyden. Ero näkyy suoraan myös PCM-massan tarpeessa, jossa suolahydraattijärjestelmä tarvitsee 109 600 kg materiaalia, kun taas vesi-jääseos tarvitsee 31 200 kg saman energiakapasiteetin saavuttamiseksi. (Sanaye ja muut, 2026)

Energiankäytön osuus kuormasta on suolahydraateilla 35,8 % ja vesi-jääseoksella 27,3 %, mikä viittaa suolahydraattijärjestelmän parempaan kykyyn kattaa jäädytyskuormaa lämpövarastoinnin avulla. Tätä tukevat myös sähkönkulutuksen vähennys, joka on suolahydraateilla 3359 MWh vuodessa ja vesi-jääseoksella 3084 MWh vuodessa, sekä CO₂-päästövähennys, joka on 55,4 % ja 51,3 %. Näiden tulosten perusteella suolahydraattijärjestelmä osoittaa hieman tehokkaampaa energianhallintaa. (Sanaye ja muut, 2026)

Eksergiatehokkuus on suolahydraateilla 39,1 % ja vesi-jääseoksella 36,5 %, mikä viittaa suolahydraattijärjestelmän parempaan kykyyn hyödyntää energiaa. Taloudellisesta näkökulmasta sähkön kustannussäästö on suolahydraateilla 403 000 USD vuodessa ja vesi-jääseoksella 370 000 USD vuodessa, mikä heijastaa parempaa energiankäytön tehokkuutta. (Sanaye ja muut, 2026)

Vuosikustannukset ovat suolahydraateilla 1,90 miljoonaa USD vuodessa ja vesi-jääseoksella 2,05 miljoonaa USD vuodessa, mikä osoittaa suolahydraattijärjestelmän olevan kokonaiskustannuksiltaan edullisempi. Tämä näkyy myös takaisinmaksuajassa, joka on suolahydraateilla 3,64 vuotta ja vesi-jääseoksella 3,92 vuotta. (Sanaye ja muut, 2026)

Purkuajan tarkastelussa suolahydraattijärjestelmä mahdollistaa pidemmän lämmönluovutusjakson, 8 tuntia, kun vesi-jääseoksella vastaava aika on 7 tuntia, mikä parantaa kuormansiirron joustavuutta. Järjestelmätasolla suolahydraattien etuna ovat alhaisemmat laite- ja käyttökustannukset, kun taas vesi-jääseoksen etuna on pienempi tilantarve korkeamman latenttilämpökapasiteetin ansiosta. (Sanaye ja muut, 2026)

Taulukko 3. Lämpöenergian varastointijärjestelmien vertailu (Sanaye ja muut, 2026).

Ominaisuus	Suolahydraatit (S8 eutektinen)	Vesi-jääseos
Lämpötilataso	8,3 °C	0 °C
Latenttilämpö	95,36 kJ/kg	334 kJ/kg
PCM-massan tarve	109 600 kg	31 200 kg
Energiankäytön osuus kuormasta	35,8 %	27,3 %
Sähkönkulutuksen vähennys	3359 MWh/vuosi	3084 MWh/vuosi
CO ₂ -päästövähennys	55,4 %	51,3 %
Eksergiatehokkuus	39,1 %	36,5 %
Sähkön kustannussäästö	403 000 USD/vuosi	370 000 USD/vuosi
Vuosikustannukset	1,90 milj. USD/vuosi	2,05 milj. USD/vuosi
Takaisinmaksuaika	3,64 vuotta	3,92 vuotta
Purkuajan kesto	8 h	7 h
Järjestelmäetu	Alemmat laite- ja käyttökustannukset	Pienempi tilantarve

Tutkimuksen johtopäätöksiä todettiin, että suolahydraattipohjainen faasimuutosmateriaali tarjoaa kokonaisuutena hieman paremman suorituskyvyn lämpöenergian varastoinnissa taloteknisissä sovelluksissa verrattuna vesi-jääseokseen.

Tämä perustuu erityisesti korkeampaan eksergiatehokkuuteen, parempaan energianhallintaan sekä alhaisempiin kokonaiskustannuksiin. (Sanaye ja muut, 2026)

Tulosten perusteella suolahydraatit toimivat korkeammassa lämpötilatasossa, mikä parantaa niiden yhteensopivuutta tavanomaisten jäähdytys- ja lämpöpumppujärjestelmien kanssa. Lisäksi niiden havaittiin mahdollistavan pidemmän purkuajan, mikä parantaa rakennusten jäähdytyskuormien tasausta ja kuormansiirron joustavuutta erityisesti huippukuormitustilanteissa. (Sanaye ja muut, 2026)

Taloudellisesta näkökulmasta suolahydraattijärjestelmä osoittautui edullisemmaksi vaihtoehdoksi alhaisempien vuosikustannusten ja lyhyemmän takaisinmaksuajan ansiosta. Tämä tekee siitä houkuttelevan vaihtoehdon erityisesti kohteissa, joissa investointien takaisinmaksuaika ja käyttökustannukset ovat keskeisiä suunnittelukriteerejä. (Sanaye ja muut, 2026)

Vesi-jääjärjestelmä puolestaan säilyttää etunsa kompaktissa tilantarpeessa korkeamman latenttilämpökapasiteetin ansiosta, mikä tekee siitä soveltuvan erityisesti tilarajoitteisiin kohteisiin. Kokonaisuutena tutkimus osoittaa, että faasimuutosmateriaalien valinta taloteknisissä lämpöenergian varastointisovelluksissa perustuu useiden tekijöiden, kuten eksergiatehokkuuden, kustannusten ja tilankäytön, väliseen kompromissiin. (Sanaye ja muut, 2026)

3.2 Edistyneet faasimuutosmateriaalit lämpöenergian varastoinnissa

Jayabal ja muut (2026) ovat koonneet yhteen laajan kirjallisuuskatsauksen, jossa tarkastellaan faasimuutosmateriaaleihin perustuvia lämpöenergian varastointimenetelmiä. Tutkimuksen tavoitteena oli yhdistää materiaalit, järjestelmäratkaisut, ohjausmenetelmät sekä taloudelliset ja ympäristöön liittyvät näkökulmat yhdeksi tarkastelukokonaisuudeksi, jonka avulla voidaan edistää faasimuutosmateriaalipohjaisten lämpöenergian varastointijärjestelmien käytännön

soveltamista erityisesti teollisuudessa, rakennuksissa ja datakeskuksissa vähähiilissä energiajärjestelmissä (Jayabal ja muut, 2026).

Jayabalin ja muiden (2026) kirjallisuuskatsauksessa tarkasteltiin aiempia tutkimuksia muun muassa seuraavista näkökulmista:

- faasimuutosmateriaalit ja niiden termofysikaaliset ominaisuudet,
- lämmönsiirron tehostaminen ja järjestelmäratkaisut,
- materiaalien degradaatio ja järjestelmien luotettavuus,
- ohjausmenetelmät ja tekoälypohjainen optimointi,
- taloudellinen kannattavuus ja
- ympäristövaikutukset ja elinkaarianalyysi.

Tulosten perusteella PCM-TES-järjestelmät voivat olla teknisesti ja taloudellisesti toteuttamiskelpoinen ratkaisu vähähiiliseen lämmönhallintaan, kun materiaalit, järjestelmäarkkitehtuuri ja ohjaus suunnitellaan kokonaisuutena. Eri faasimuutosmateriaalityypit soveltuvat eri lämpötila-alueille. Orgaaniset faasimuutosmateriaalit tarjoavat hyvän syklisen stabiilisuuden ja vähäisen korroosion, epäorgaaniset suolat korkean energiatiheyden mutta suuremman degradaatoriskin, ja eutektiset seokset laajan lämpötila-alueen sovelluksiin. Lisäksi kapselointiratkaisut, esimerkiksi levymoduulit, mikro- ja makrokapselit sekä kehittyneet rakenteet, ovat keskeisiä sekä lämmönsiirron että käyttöiän kannalta. (Jayabal ja muut, 2026)

Keskeisiksi rajoitteiksi tunnistettiin faasimuutosmateriaalien degradaatio, kuten faasierottelu, ylijäähtyminen ja kapseloinnin väsymisvauriot. Näitä voidaan kuitenkin lieventää stabilointimenetelmillä ja optimoidulla järjestelmäsuunnittelulla, jolloin voidaan saavuttaa noin 85–95 % latenttilämmön säilyminen tuhansien syklien aikana. Lisäksi tekoälypohjaisten ohjausmenetelmien käyttö parantaa ennustettavuutta, vähentää suorituskyvyn heikkenemistä ja voi pidentää käyttöikää yli 10000 sykliin. Taloudellisesti järjestelmät voivat saavuttaa alle 0,05–0,10 €/kWh kustannustason sekä

3–6 vuoden takaisinmaksuajan korkean käyttöasteen sovelluksissa. (Jayabal ja muut, 2026)

Johtopäätöksinä todetaan, että PCM-TES-järjestelmät edellyttävät materiaalien, kapseloinnin ja ohjauksen tiivistä yhteensovittamista, jotta niiden täysi potentiaali voidaan hyödyntää. Hyvin suunnitellut järjestelmät voivat säilyttää suuren osan kapasiteetistaan pitkissä käyttöjaksoissa, ja erityisesti levymäiset sekä monivaiheiset ratkaisut ovat suorituskyvyltään edistyneempiä kuin perinteiset rakenteet. (Jayabal ja muut, 2026)

Jayabalin ja muiden (2026) kirjallisuuskatsauksessa arvioidaan, että tulevaisuuden tutkimus painottuu yhä enemmän integroituihin ja dataohjattuihin järjestelmiin. Heidän mukaansa keskeisiä kehityssuuntia faasimuutosmateriaaleille ovat:

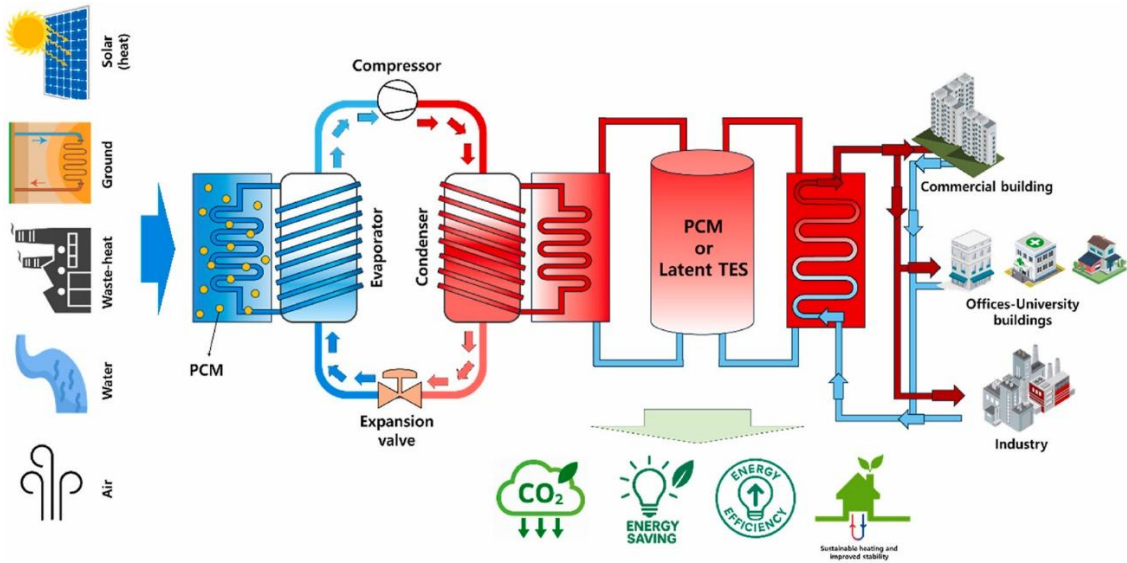
- kestävät ja kierrätettävät PCM-materiaalit,
- tekoälypohjainen ohjaus,
- hybridijärjestelmät,
- elinkaaripohjainen suunnittelu ja standardointi ja
- kiertotalous ja suljetut materiaalivirrat.

3.3 Lämpöpumppujen yhdistäminen faasimuutosmateriaaleihin perustuvaan lämpöenergian varastointiin

Suresh ja muut (2026) ovat tutkineet lämpöpumppujen ja faasimuutosmateriaaleihin perustuvan lämpöenergian varastoinnin yhdistämistä rakennusten lämmityksen energiatehokkuuden parantamiseksi sekä hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi. Tutkimuksen tavoitteena on tarkastella, miten faasimuutosmateriaalipohjainen lämpövarastointi voi parantaa lämpöpumppujärjestelmien toimintaa ja ratkaista keskeisiä haasteita, kuten huippukuormitusten hallintaa sekä uusiutuvien ja hukkalämpölähteiden saatavuuden vaihtelua. (Suresh ja muut, 2026)

Tutkimus toteutettiin laajana kirjallisuuskatsauksena, jossa analysoitiin erilaisia lämpöpumppuratkaisuja, kuten ilma-, maa-, vesi-, hybridi- ja aurinkoavusteisia lämpöpumppuja sekä niiden integrointia PCM-TES-järjestelmiin. Tarkastelussa huomioitiin erityisesti lämpöpumppujen ja lämpövaraston sijoittuminen järjestelmässä, kuten höyrystin- ja lauhdutinpuolen ratkaisut. Lisäksi tutkimuksessa arvioitiin järjestelmien energiatehokkuutta, taloudellisuutta ja ympäristövaikutuksia sekä tunnistettiin keskeisiä teknisiä rajoitteita ja tulevaisuuden kehityssuuntia. (Suresh ja muut, 2026)

Kuvassa 1 esitetään Sureshin ja muiden (2026) tutkima lämpöpumppujärjestelmä, jossa lämpöpumppu on yhdistetty faasimuutosmateriaalipohjaiseen lämpöenergian varastointijärjestelmään. Järjestelmä hyödyntää useita eri lämpölähteitä, kuten aurinkoenergiaa, maalämpöä, teollisuuden hukkalämpöä sekä vesi- ja ilmavirtoja. PCM-yksikkö toimii sekä lämpötilavaihteluiden tasaajana että energian varastointimoduulina ennen lämpöpumppuprosessia. Faasimuutosmateriaalin avulla lämpöä voidaan varastoida sulamisen aikana ja vapauttaa jähmettymisen aikana, mikä mahdollistaa energian hyödyntämisen kulutushuippujen aikana. Lämpöpumpun tuottama lämpö johdetaan edelleen loppukäyttäjille, kuten asuinrakennuksiin, toimistoihin, yliopistoihin ja teollisuuteen. (Suresh ja muut, 2026)



Kuva 1. Lämpöpumpputjärjestelmä, joka hyödyntää faasimuutosmateriaalipohjaista tai latenttilämmön varastointia (Suresh ja muut, 2026).

Sureshin ja muiden (2026) tutkimuksen tulosten perusteella PCM-TES:n integrointi lämpöpumppeihin parantaa merkittävästi järjestelmän suorituskykyä. Lämpökerroin, COP, voi kasvaa tyypillisesti 10–30 %, ja joissakin tapauksissa COP-arvo on noussut jopa tasolle 4,7, mikä vastaa noin 43,6 % parannusta verrattuna perinteisiin lämmönsiirtonesteisiin. Höyrystinpuolen PCM-integraation on havaittu nostavan COP-arvoa 6–14 %. Lisäksi energiankulutuksen on raportoitu vähenevän noin 56 %, ja sulatusprosessin energiankulutuksen jopa 55,8 %, samalla kun sulatusaika voi lyhentyä noin 75 %. Käyttökustannusten on todettu pienenevän keskimäärin 27,7 %, ja hiilidioksidipäästöjen vähentyvän merkittävästi erityisesti uusiutuvia energialähteitä hyödyntävissä järjestelmissä. Keskeiset tutkimuksessa raportoidut ominaisuudet ovat koottu taulukkoon 4. (Suresh ja muut, 2026)

Taulukko 4. PCM-TES:n vaikutus lämpöpumppujärjestelmän suorituskykyyn (Suresh ja muut, 2026).

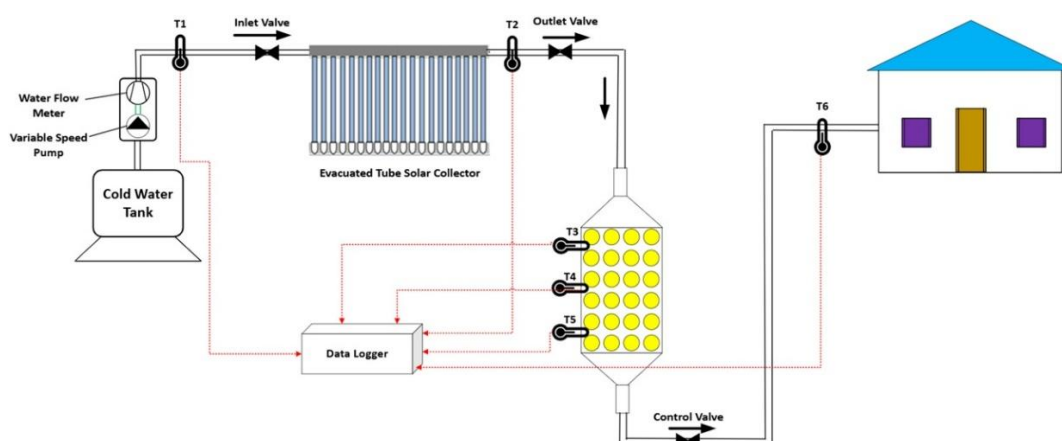
Ominaisuus	Muutos PCM-TES:n avulla	Kommentti
Lämpökerroin (COP)	+10–30 %, maks. 43,6 %	Merkittävä energiatehokkuuden kasvu
COP (höyrystipuoli)	+6–14 %	Parantaa lämmönsiirtoa
Energiankulutus	–56 %	Kokonaisenergiankulutuksen väheneminen
Sulatusprosessin energia	–55,8 %	Sulatusjaksojen tehostuminen
Sulatusaika	–75 %	Nopeampi toiminta kylmissä olosuhteissa
Käyttökustannukset	–27,7 %	Taloudellinen hyöty
CO ₂ -päästöt	Merkittävä vähennys (tarkkaa lukua ei ole raportoitu)	Riippuu käytetystä energialähteestä

Johtopäätöksenä Suresh ja muut (2026) toteavat, että PCM-TES:n ja lämpöpumppujen yhdistäminen tarjoaa erittäin lupaavan ratkaisun energiatehokkaaseen, joustavaan ja vähäpäästöiseen rakennusten lämmitykseen. PCM-pohjainen lämpövarastointi parantaa lämpöpumppujen toimintavarmuutta, mahdollistaa uusiutuvan ja hukkalämmön tehokkaamman hyödyntämisen sekä tasaa lämpökuormien vaihteluita. Tutkimuksessa kuitenkin korostetaan, että laajempi käyttöönotto edellyttää edelleen teknologian kehittymistä, PCM-materiaalien parempaa suorituskykyä sekä investointikustannusten alenemista. (Suresh ja muut, 2026)

3.4 EG-vahvistetun faasimuutosmateriaalin soveltaminen aurinkolämpövarastointiin

Chopra ja muut (2026) tarkastelivat steariinihappoon (SA) perustuvan faasimuutosmateriaalin soveltuvuutta aurinkolämpöenergian varastointiin ja sen suorituskyvyn parantamista paisutetulla grafiitilla (EG). Tutkimuksessa muodostettiin muotostabiili komposiitti (FOS-SA), jonka tavoitteena oli parantaa sekä lämmönsiirtoa että materiaalin rakenteellista ja termistä vakautta toistuvissa lämpösykleissä. (Chopra ja muut, 2026)

Kuvassa 2 esitetty koejärjestelmä kuvaa aurinkolämpöön kytkettyä lämpövarastointisysteemiä, jossa aurinkokeräin toimii lämmön lähteenä ja kiertovesi siirtää lämpöenergiaa faasimuutosmateriaalin varastointijärjestelmään. Järjestelmässä vesi lämmitetään aurinkokeräimessä, minkä jälkeen se johdetaan PCM-yksikköön, jossa lämpö siirtyy materiaalin sulamisprosessin kautta varastoitavaksi latenttina lämpönä. Kuvaan 2 on merkitty lämpötilan mittauspisteet T1–T6. Lämpötilamittaukset pisteistä T1–T6 mahdollistavat lämpötilagradienttien ja energian siirtymisen seurannan eri kohdissa järjestelmää, mikä antaa kokonaiskuvan sekä lämmön varastoinnista että vapautumisesta. (Chopra ja muut, 2026)



Kuva 2. Toteutus PCM-PBD-pohjaisesta aurinkolämpövesilämmitysjärjestelmästä (Chopra ja muut, 2026).

Tutkimuksen keskeinen havainto on, että EG:n lisääminen muuttaa merkittävästi SA:n lämmönsiirto-ominaisuuksia. EG muodostaa huokoisen, verkostomaisen rakenteen, joka toimii lämpöä johtavana runkona PCM-matriisissa. Tämä vähentää lämpövastusta materiaalin sisällä ja nopeuttaa faasimuutosta, mikä näkyy sekä lyhentyneinä sulamis- että jähmettymisjaksoina. Parantunut lämmönjohtavuus ei ainoastaan nopeuta energian varastointia, vaan myös tehostaa sen vapautumista, mikä on keskeinen tekijä aurinkolämpöjärjestelmien dynaamisessa toiminnassa (Chopra ja muut, 2026).

Materiaalin rakenteellinen vakaus parani merkittävästi EG:n ansiosta. Huokoinen grafiittiverkosto sitoo sulanutta PCM:ää kapillaarivoimien avulla, mikä estää vuotoa ja säilyttää muodon myös korkeissa lämpötiloissa. Tämä on erityisen tärkeää käytännön sovelluksissa, joissa PCM:n tulee säilyttää rakenteellinen eheys toistuvien sulamis- jähmettymissykliä aikana. (Chopra ja muut, 2026)

Terminen analyysi osoitti, että FOS-SA säilyttää faasimuutoslämpötilansa ja latenttilämpönsä hyvin myös pitkäaikaisessa syklisessä kuormituksessa, eikä merkittävää termistä hajoamista havaittu. Tämä viittaa siihen, että EG ei ainoastaan paranna lämmönsiirtoa, vaan myös stabiloi materiaalin mikrorakennetta ja vähentää lämpösykliä aiheuttamaa degradaatiota (Chopra ja muut, 2026).

Järjestelmätasolla tämä materiaalikehitys näkyy parempana energian hyödyntämisenä: lämpöenergia varastoituu nopeammin, lämpötila jakautuu tasaisemmin PCM-säiliössä ja energia vapautuu hallitummin. Tämä parantaa aurinkolämpöjärjestelmän toimintavarmuutta erityisesti vaihtelevissa säteilyolosuhteissa, joissa energian saatavuus ei ole jatkuvaa. (Chopra ja muut, 2026)

Johtopäätöksenä tutkimus osoittaa, että EG-vahvistettu PCM ei ole pelkästään materiaaliparannus, vaan se muuttaa koko aurinkolämpöjärjestelmän dynamiikkaa. Lämpövastuksen pienentyminen, rakenteellinen muotostabiilisuus ja parantunut syklistä kestävyys yhdessä mahdollistavat tehokkaamman ja ennustettavamman

lämpövarastoinnin. Tämä tekee FOS-SA:sta erityisen lupaavan ratkaisun aurinkoenergian varastointiin tilanteissa, joissa tarvitaan sekä nopeaa lämpövasteen säätelyä että pitkäaikaista energian säilytystä. (Chopra ja muut, 2026)

3.5 Faasimuutosmateriaalin vaikutus lämpöenergian varastointijärjestelmän suorituskykyyn

Shanmugavalli ja Rajaraman (2026) tutkivat kokeellisesti faasimuutosmateriaalilla tehostetun lämpöenergian varastointijärjestelmän suorituskykyä käyttöveden lämmityssovelluksessa. Tutkimuksessa vertailtiin perinteistä vesipohjaista lämpövarastoa ja PCM-materiaalia hyödyntävää järjestelmää samoissa käyttöolosuhteissa. Erityisesti tarkasteltiin lataus- ja purkuprosessien aikaisia lämpötilaprofiileja, lämpöenergian varastoitumista ja vapautumista sekä järjestelmän lämpötehokkuutta. Tulosten perusteella PCM paransi lämpöenergian varastoinnin tasaisuutta ja pidensi hyödyllisen lämpötehon kestoa verrattuna pelkkään vesivaraajaan. (Shanmugavalli & Rajaraman, 2026)

Tutkimus toteutettiin kokeellisena laboratoriotutkimuksena, jossa lämpöenergian varastointijärjestelmän toimintaa verrattiin kahdessa kokoonpanossa: ilman faasimuutosmateriaalia sekä PCM-materiaalia sisältävässä järjestelmässä. PCM oli parafiinipohjaista ja kapseloitu ruostumattomasta teräksestä valmistettuihin palloihin, jotka sijoitettiin varaajasäiliöön. Kokeissa lämmönsiirtoainetta kierrätettiin säiliön läpi vakioidulla virtausnopeudella, ja lämpötiloja mitattiin useista pisteistä lataus- ja purkuvaiheiden aikana. Mittausten perusteella tarkasteltiin lämpötilaprofiileja sekä lämpöenergian varastoitumista ja vapautumista, ja arvioitiin PCM:n vaikutusta järjestelmän lämpötehokkuuteen. (Shanmugavalli & Rajaraman, 2026)

Tutkimuksessa todettiin, että faasimuutosmateriaalin (PCM) käyttö paransi selvästi lämpöenergian varastointijärjestelmän suorituskykyä verrattuna pelkkään

vesipohjaiseen järjestelmään. PCM pidensi hyödyllisen korkean lämpötilan (>60 °C) kestoja noin 30 minuutista 60 minuuttiin ja tasasi lämpötilaprofiileja sekä lataus- että purkuvaiheessa. Samalla järjestelmän lämpötehokkuus kasvoi noin 55,6 prosentista 62,0 prosenttiin, ja sekä varastoitavan että vapautuvan lämpöenergian määrä lisääntyi. PCM paransi myös lämpötilakerrostumista säiliössä, vähensi lämpötilan vaihteluita ja tuki tasaisempaa lämmönluovutusta purkuvaiheessa. Kokonaisuutena tulokset osoittivat, että PCM parantaa erityisesti lämmön varastoinnin tasaisuutta, energian hyödyntämisen kestoja ja järjestelmän lämpötehokkuutta. (Shanmugavalli & Rajaraman, 2026)

Tutkimuksen johtopäätöksenä todettiin, että faasimuutosmateriaalin (PCM) integrointi lämpöenergian varastointijärjestelmään parantaa selvästi sen lämpöteknistä suorituskykyä. PCM lisää varastointikapasiteettia latenttilämmön ansiosta, tasaa lämpötilajakaumaa säiliössä ja vahvistaa lämpökerrostumista, mikä parantaa lämmön varastoinnin ja vapauttamisen hallittavuutta. Lisäksi PCM pidentää käyttökelpoisen korkean lämpötilan kestoja ja lisää energian talteenoton tehokkuutta verrattuna perinteiseen vesipohjaiseen järjestelmään. Kokonaisuutena tutkimus osoittaa, että PCM-pohjaiset ratkaisut soveltuvat hyvin käyttöveden lämmitykseen ja muihin sovelluksiin, joissa tarvitaan tasaista ja pitkäkestoista lämpötehoa. (Shanmugavalli & Rajaraman, 2026)

3.6 Yhteenveto aiemmista tutkimuksista

Aiemmissä tutkimuksissa on tarkasteltu faasimuutosmateriaaleja sekä niiden hyödyntämistä lämpöenergian varastoinnissa. Tutkimusten keskeisinä tavoitteina on ollut parantaa rakennusten lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien energiatehokkuutta, tasata sisäisiä lämpökuormia sekä hyödyntää paremmin uusiutuvia- ja hukkalämpöpohjaisia energialähteitä.

Sanaye ja muut (2026) osoittivat, että PCM-materiaalien valinnalla on merkittävä vaikutus rakennusten energijärjestelmien suorituskykyyn. Taloteknisissä sovelluksissa

suolahydraattipohjaiset PCM-järjestelmät parantavat erityisesti kuormansiirtoa ja järjestelmän dynaamista toimintaa verrattuna vesi-jääjärjestelmiin. Ne tarjoavat paremman eksergiatehokkuuden ja pidemmän lämmönluovutusajan, mikä parantaa rakennusten jäähdytys- ja lämmityskuormien hallintaa. Vesi-jääjärjestelmät puolestaan soveltuvat tilarajoitteisiin kohteisiin korkean energiatiheytensä ansiosta. Tulokset korostavat, että taloteknisessä suunnittelussa PCM-valinta on kompromissi tilatehokkuuden, energiatehokkuuden ja järjestelmän toimintavarmuuden välillä. (Sanaye ja muut, 2026)

Jayabal ja muut (2026) tarkastelivat PCM-pohjaisten TES-järjestelmien roolia osana rakennusten ja kiinteistöjen energijärjestelmiä. Tutkimus osoittaa, että PCM-TES voidaan integroida talotekniikassa lämpöpumppujen, ilmanvaihdon ja jäähdytysjärjestelmien yhteyteen, jolloin ne toimivat sekä energiavarastoina että kuormien tasaajina. Erityisesti kapseloidut PCM-ratkaisut ja kehittyneet ohjausjärjestelmät mahdollistavat rakennusten energiankulutuksen optimoinnin ja huippukuormien leikkaamisen. Haasteina taloteknisessä käytössä korostuvat materiaalien pitkäaikaiskestävyys, lämmönsiirron rajoitteet sekä järjestelmien ohjauksen monimutkaisuus. (Jayabal ja muut, 2026)

Suresh ja muut (2026) tarkastelivat lämpöpumppujen ja PCM-TES-järjestelmien yhdistämistä nimenomaan rakennusten lämmityksen ja jäähdytyksen energiatehokkuuden parantamiseksi. Taloteknisestä näkökulmasta keskeinen havainto on, että PCM-varastointi parantaa lämpöpumppujärjestelmien toimintavarmuutta ja mahdollistaa tasaisemman energian käytön vaihtelevissa kuormitustilanteissa. Lämpöpumppujen COP-arvon havaittiin kasvavan tyypillisesti 10–30 %, ja parhaimmillaan jopa 43,6 %, samalla kun rakennusten energiankulutus ja käyttökustannukset pienenevät merkittävästi. Lisäksi PCM-TES mahdollistaa kuormien siirron ajallisesti, mikä on keskeinen hyöty erityisesti talotekniikan huippukuormien hallinnassa ja energiankäytön optimoinnissa. (Suresh ja muut, 2026)

Chopra ja muut (2026) osoittivat, että EG-vahvistetun steariinihapon (FOS-SA) integrointi aurinkolämpövarastointijärjestelmään parantaa merkittävästi sekä materiaalin että koko järjestelmän lämpötekniistä suorituskykyä. Keskeinen havainto on, että paisutettu grafiitti muodostaa PCM-matriisiin jatkuvan lämpöä johtavan verkoston, joka pienentää lämpövastusta ja nopeuttaa faasimuutosta ilman, että materiaalin kemiallinen tai termien stabiilisuus heikkenee. Tämä näkyi käytännössä lyhentyneinä sulamis- ja jäähmettymisajoina sekä tehostuneena energian varastointina ja vapautumisena aurinkolämpöjärjestelmässä. Lisäksi muotostabiili rakenne ehkäisee PCM:n vuotoa ja parantaa materiaalin pitkäaikaista käyttövarmuutta toistuvissa lämpösykleissä, mikä on keskeinen edellytys käytännön TES-sovelluksille. (Chopra ja muut, 2026)

Shanmugavalli ja Rajaraman (2026) vesipohjaista lämpövarastoa ja PCM-materiaalia sisältävää järjestelmää, jossa parafiinipohjainen faasimuutosmateriaali oli kapseloitu teräspalloihin. Tulosten mukaan PCM paransi lämpövarastoinnin tasaisuutta ja teki lämpötilan muutoksista hallitumpia. Hyödyllisen korkean lämpötilan (>60 °C) kesto piteni noin 30 minuutista 60 minuuttiin, ja järjestelmän lämpötehokkuus kasvoi noin 55,6 prosentista 62,0 prosenttiin. Lisäksi lämpö jakautui säiliössä tasaisemmin, koska kapselien sijoittelu paransi veden virtausta ja vähensi lämpötilan epätasaisuutta.

Yhteenvetona aiemmat tutkimukset osoittavat, että PCM-pohjaiset lämpöenergian varastointiratkaisut tarjoavat talotekniikassa merkittäviä mahdollisuuksia rakennusten energiatehokkuuden parantamiseen. Niiden keskeisiä hyötyjä ovat lämpökuormien tasaaminen, lämpöpumppujen toimintapisteiden optimointi, uusiutuvan ja hukkalämmön parempi hyödyntäminen sekä energiankulutuksen ja päästöjen vähentäminen. Samalla tutkimukset korostavat, että taloteknisen soveltamisen haasteita ovat erityisesti järjestelmien mitoitus, PCM-materiaalien pitkäaikaiskäyttäytyminen sekä ohjausstrategioiden kehittäminen. Näiden tekijöiden ratkaiseminen on keskeistä PCM-TES-tekniikan laajemmalle käyttöönotolle rakennusten energijärjestelmissä.

4 Uusi tutkimus – PCM-pohjainen lämpöenergian varastointijärjestelmä osana rakennuksen lämmitysratkaisua

Uusi tutkimus ja sen mittaukset on tarkoitus toteuttaa yhteistyössä NewHeatIntegrated-hankkeen kanssa. NewHeatIntegrated on kansainvälinen tutkimushanke lämpöenergian varastointijärjestelmien kehittämiseksi rakennusten energiatehokkuuden parantamiseksi (NewHeatIntegrated, n.d). Hankkeessa on mukana muun muassa Vaasan yliopisto, VSB Technical University of Ostrava, Fraunhofer ICT ja IWU, Budapest University of Technology and Economics sekä nollaE Oy ja useita muita eurooppalaisia tutkimus- ja teollisuusyhteistyökumppaneita (NewHeatIntegrated, n.d).

Projektin päätavoitteena on kehittää modulaarinen, faasimuutosmateriaaleihin perustuva lämpöenergian varastointijärjestelmä, joka soveltuu modernien vähähiilisten lämmitysjärjestelmien toimintaympäristöön. Järjestelmää on tarkoitus testata eri tutkimuskohteissa ja -ympäristöissä. Kehitettävä järjestelmä perustuu kaksivaiheiseen latenttilämpövarastoon eli switchable latent heat thermal energy storageen, sLHTES:ään, jossa faasimuutosmateriaaleja. Varastointilämpötilat on optimoitu noin 35–58 °C:n toiminta-alueeseen, mikä mahdollistaa yhteensopivuuden lämmitysjärjestelmien kanssa sekä parantaa koko järjestelmän energiatehokkuutta. (NewHeatIntegrated, n.d)

Hankkeessa kehitetään lisäksi älykäs ohjaus- ja optimointijärjestelmä, joka hyödyntää anturidataa, sääolosuhteita ja energian hintavaihteluita järjestelmän toiminnan optimointiin (NewHeatIntegrated, n.d). Demonstraatiokohteissa järjestelmiä on tarkoitus testata sekä todellisissa käyttöolosuhteissa että testilaboratorio-olosuhteissa, jolloin voidaan arvioida järjestelmän lämpöteknistä suorituskykyä, energiatehokkuutta ja pitkäaikaista toimintavarmuutta eri ympäristöissä (NewHeatIntegrated, n.d). Vaasassa testaukset on tarkoitus toteuttaa todellisessa käyttöympäristössä. Todellisen ympäristön on tarkoitus mahdollistaa realistisen mittausdatan keräämisen eri lämpökuormitus- ja käyttöskenaarioista sekä järjestelmän suorituskyvyn arvioinnin todellisessa

rakennusympäristössä (NewHeatIntegrated, n.d). Tämän tutkielman mittaukset on tarkoitus toteuttaa Suomessa Vaasassa.

4.1 Mittausjärjestelmän toteutus faasimuutosmateriaalipohjaisessa lämpövarastossa

Mittaukset oli tarkoitus toteuttaa faasimuutosmateriaalipohjaisella lämpöenergian varastointijärjestelmällä, joka on osa NewHeatIntegrated-hankkeen kokonaisuutta. Varastointijärjestelmä on sijoitettu Vaasaan Leipätehtaan tiloihin. Kuvasta 3 nähdään Leipätehtaan rakennus. Kyseessä on todellinen asuinrakennusympäristö, jossa järjestelmän toimintaa on tarkoitus testata käytännön käyttöolosuhteissa vaihtelevien lämpökuormien ja energiansiirtotilanteiden aikana.



Kuva 3. Leipätehtaan rakennus.

Lämpöenergian varastointijärjestelmä koostuu kahdesta faasimuutosmateriaalia sisältävästä lämpöenergian varastointiyksiköstä, putkistosta, antureista sekä lämpöä siirtävästä vesipiiristä, joiden avulla lämpöenergiaa siirretään varastointiyksikköön ja siitä pois lataus- ja purkusyklien aikana. Varastointiyksiköt on sijoitettu rakennuksen teknisiin tiloihin siten, että ne mahdollistaisivat integroidun lämmönsiirron jo olemassa olevaan lämpöverkkoon. Kuvassa 4 näkyy kaksi rinnakkaista faasimuutosmateriaalia sisältävää lämpöenergian varastointiyksikköä sijoitettuna todelliseen ympäristöön. Varastointiyksiköt eivät ole kuvanottohetkellä toiminnassa, ja niistä puuttuu eri asennuksia.



Kuva 4. Kaksi rinnakkaista faasimuutosmateriaalia sisältävää lämpöenergian varastointiyksikköä sijoitettuna todelliseen ympäristöön.

Lämpöenergian varastointiyksiköt on rakennettu saksalaisen yrityksen toimesta Saksassa, ja kuljetettu sieltä Suomeen. Kuvassa 5 esitetään lämpöenergian varastointiyksikön ylämoduuli, johon on integroitu osa putkistosta.



Kuva 5. Lämpöenergian varastointiyksikön ylämoduuli.

Kuvassa 6 on lämpöenergian varastointiyksikkö kuvattuna sivulta päin. Kuvassa näkyy varastointiyksikön lisäksi putkistoa sekä vasemmassa reunassa mittausanturi asennettuna järjestelmään. Putkiston asennus ei ole valmis kuvassa.



Kuva 6. Lämpöenergian varastointiyksikkö kuvattuna sivulta päin.

Mittausjärjestelmään on tarkoitus integroida useita antureita, joilla seurataan lämpötilajakaumaa järjestelmän eri kohdissa. Antureiden avulla olisi tarkoitus analysoida muun muassa lämpötilan ajallista ja paikallista vaihtelua järjestelmässä sekä lämpötilagradienttien muodostumista lataus- ja purkusyklien aikana. Lisäksi mittausdatan perusteella olisi mahdollista tarkastella faasimuutosmateriaalin lämpötilan kehitystä sekä järjestelmän lämpötilan vakiintumista eri käyttötilanteessa.

Mittausjärjestelmän sähkönsyöttö ja vakaa toiminta on toteutettu Siemens LOGO!Power -virtalähteellä, joka tuottaa 24 V DC -tasajännitteen mittauskomponenteille. Kyseinen virtalähde mahdollistaa anturien ja tiedonkeruulaitteiden luotettavan käytön jatkuvissa mittausjaksoissa. Lisäksi sen korkea energiatehokkuus ja laaja käyttölämpötila-alue tukevat järjestelmän toimintaa vaihtelevissa testausympäristöissä sekä parantavat kokonaisuuden toimintavarmuutta pitkäkestoisissa kokeellisissa asetelmissä. (Siemens, 2026)

Kuvassa 7 nähdään mittausjärjestelmän sähkönsyöttöyksikkö Siemens LOGO!Power sekä siihen liitetyt lisäkomponentit. Tämä kokonaisuus tuottaa vakaan käyttöjännitteen lämpötila-antureille ja tiedonkeruulaitteille PCM-pohjaisessa lämpöenergian varastointijärjestelmässä.



Kuva 7. Mittausjärjestelmän sähkönsyöttöyksikkö Siemens LOGO!Power sekä siihen liitetyt lisäkomponentit.

Mittausjärjestelmään integroidaan energiankulutuksen ja -siirron tarkempaa arviointia varten Kamstrupin valmistamia energiamittareita, jotka toimivat järjestelmän keskeisenä energialaskentayksikkönä. Energiamittarit mahdollistavat sekä lämpö- että jäähdytysenergian laskennan lämmönsiirtojärjestelmissä (Kamstrup, n.d.). Laitteisto on suunniteltu erityisesti rakennusten lämpötekniisiin sovelluksiin, joissa energian tuotanto ja -kulutus perustuvat dynaamisiin käyttötilanteisiin (Kamstrup, n.d.).

Mittari hyödyntää ULTRAFLOW®-virtausantureita sekä tarkasti paritettuja Pt100- tai Pt500-lämpötila-antureita, jolloin energialaskenta perustuu standardin EN 1434 mukaiseen lämpötilaeron ja virtausmäärän määrittämiseen. Lisäksi laite tukee vuotovalvontaa, tehon ja virtaaman rajoitusta sekä järjestelmän jatkuvaa suorituskyvyn seuranta. Modulaarisen rakenteensa ansiosta mittari voidaan varustaa erilaisilla tiedonsiirtomoduuleilla, kuten M-Bus- ja Wireless M-Bus -ratkaisulla, mikä mahdollistaa mittausdatan etäluennan ja integroinnin rakennusautomaatiojärjestelmiin. (Kamstrup, n.d.).

Energiamittarin rakenne mahdollistaa myös järjestelmän jälkiasennettavuuden ja joustavan konfiguroinnin, sillä virtaus- ja viestintämoduulit voidaan vaihtaa tai lisätä ilman koko mittausjärjestelmän uudelleenasetusta. Tämä ominaisuus on erityisen merkittävä kokeellisessa tutkimusympäristössä, jossa mittausjärjestelmän konfiguraatiota voidaan joutua muuttamaan tutkimusasetelman kehittyessä. Mittarin avulla voidaan siten tuottaa luotettavaa ja vertailukelpoista energiamittaustietoa faasimuutosmateriaaleihin perustuvan lämpöenergian varastointijärjestelmän toiminnan analysoimiseksi. (Kamstrup, n.d.).

Kuvassa 8 on Kamstrupin valmistama energiamittari asennettuna järjestelmään. Mittareita on asennettu järjestelmään vasta yksi kappale, mutta niitä olisi tarkoitus olla useampia, jotta analysoitavaa dataa saadaan useista eri järjestelmän kohdista.



Kuva 8. Kamstrupin valmistama energiamittari asennettuna järjestelmään.

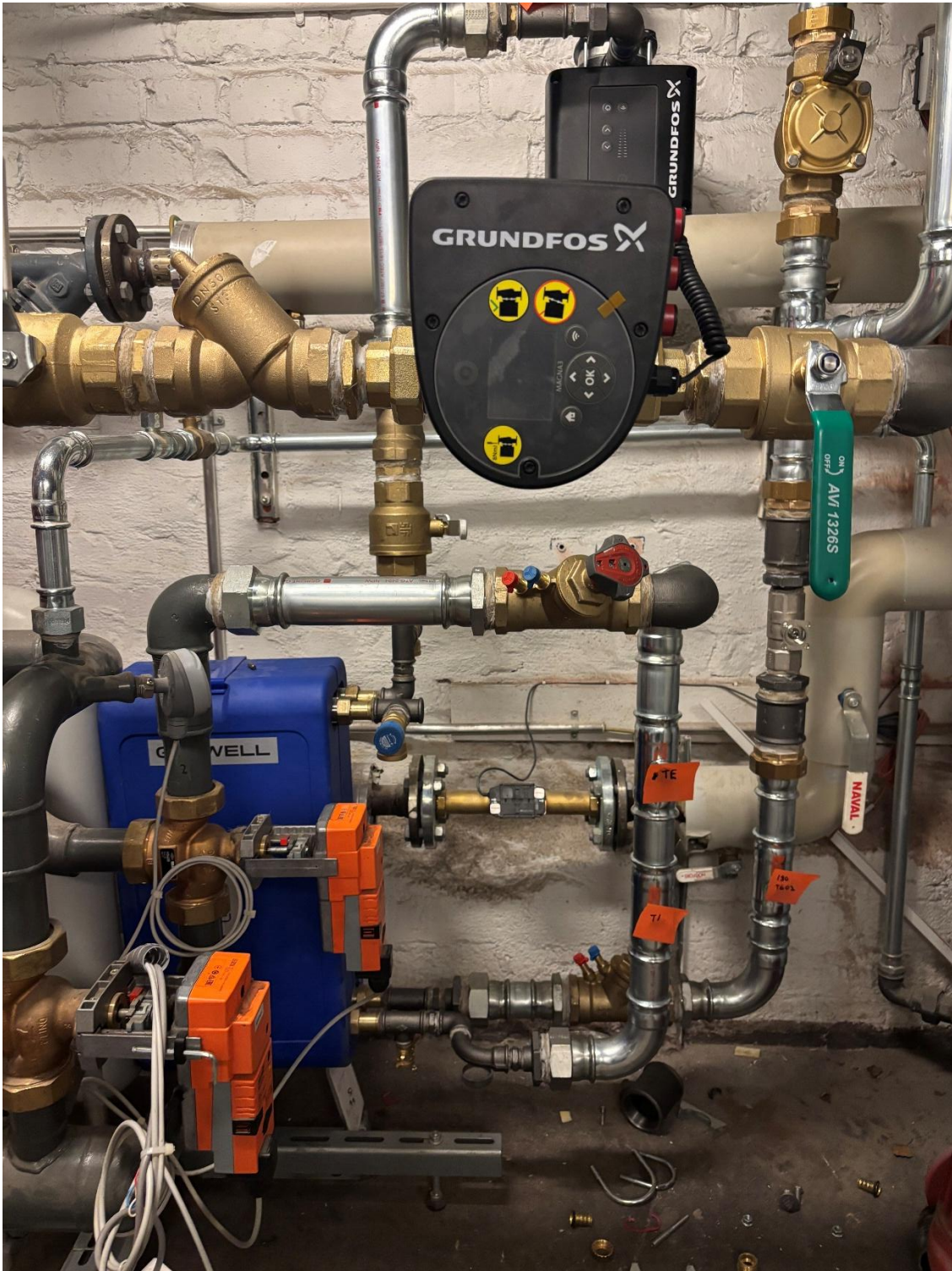
Vesipiirin putkisto yhdistää lämpövarastot rakennuksen lämmönjakoverkkoon ja mahdollistaa lämpöenergian siirtymisen järjestelmän eri osien välillä. Kuvissa 9–11 esitetään järjestelmän putkistoa ja liitännöitä asennusvaiheessa, mutta niiden lopullinen toteutus on vielä kesken.



Kuva 9. Lämpöenergian varastointiyksikön putkisto asennusvaiheessa.



Kuva 10. Testausjärjestelmän ja rakennuksen lämmönjakoverkon välinen putkisto



Kuva 11. Testausjärjestelmän putkistoa ja liitäntöjä asennusvaiheessa.

Datankeruu oli tarkoitus toteuttaa antureilla, jotka tallentavat dataa reaaliaikaisesti ja jatkuvasti analysointia varten. Mittausten tavoitteena on mahdollistaa sekä lyhyen aikavälin lämpötilaprofiilien tarkastelu että useiden lataus- ja purkusyklien toistettavuuden arviointi. Erityistä huomiota oli tarkoitus kiinnittää faasimuutosmateriaalin käyttäytymiseen toistuvissa lämpösykleissä.

Käytettävä faasimuutosmateriaali olisi ollut suolahydraatti, jonka lämpöominaisuuksia voitaisiin tarvittaessa säätää stabilointi- ja lisäaineilla faasierottumisen ja rakenteellisen epävakauden vähentämiseksi. Tämä mahdollistaa materiaalin paremman soveltuvuuden pitkäaikaiseen lämpövarastointiin ja toistuvaan käyttöön.

Mittausasetelma oli suunniteltu siten, että järjestelmä mahdollistaa toistettavat lataus- ja purkusykliä todellisissa käyttöolosuhteissa. Näin ollen tavoitteena oli muodostaa kattava kokeellinen aineisto lämpövarastointijärjestelmän suorituskyvyn arvioimiseksi rakennusten energiatehokkuuden parantamiseksi.

4.2 Mittausjärjestelmän käyttöönoton tila

Mittausjärjestelmän käyttöönotto lämpöenergian varastointijärjestelmässä ei ole toistaiseksi edennyt mittausvaiheeseen, vaan hanke on edelleen asennus- ja suunnitteluvaiheessa. Käyttöönottoa on viivästyttänyt järjestelmässä havaittu suolaliuoksen vuoto, jonka selvittäminen ja korjaaminen ovat edellyttäneet lisätoimenpiteitä sekä hidastaneet asennustöiden etenemistä. Vuodon seurauksena tarvittiin myös komponentteja ja varaosia, joiden toimituksissa on esiintynyt viiveitä, mikä on osaltaan siirtänyt hankkeen etenemistä.

Järjestelmän putkistojen asennus on käynnistynyt vasta hiljattain, ja sen toteutusvaiheessa on ilmennyt teknisiä sekä dokumentaation puutteisiin liittyviä haasteita. Käytettävissä olevat putkityöpiirustukset eivät kaikilta osin vastaa TES-järjestelmän alkuperäistä toteutusta, mikä on edellyttänyt soveltavaa suunnittelua ja

ratkaisujen löytämistä. Tilannetta vaikeuttaa lisäksi se, että järjestelmän toimittaja on yrityssaneerauksessa, eikä tarvittavia teknisiä täsmennyksiä tai suunnittelutukea ole ollut saatavilla toimittajalta.

Mikäli putkityöt saadaan valmiiksi, seuraavana vaiheena ovat sähkö- ja automaatiotyöt sekä mittausjärjestelmän integrointi osaksi kokonaisuutta. Tämän jälkeen järjestelmä voitaisiin saattaa käyttöön siten, että mittausdataa olisi mahdollista kerätä suunnitellusti.

5 Tulokset

Tuloksia tarkastellaan aiempien tutkimusten sekä suunnitellun uusien mittausten pohjalta. Aiemmat tutkimukset tarjoavat kattavan perustan faasimuutosmateriaalien lämpötekniisten ominaisuuksien ja järjestelmätason suorituskyvyn arvioinnille.

5.1 Tulokset aiemmissä tutkimuksissa

Aiemmissä tutkimuksissa faasimuutosmateriaaleihin (PCM) perustuvien lämpöenergian varastointijärjestelmien suorituskykyä on tarkasteltu erityisesti lämpötilaprofiilien, lataus- ja purkukäyrien, materiaalikäyttäytymisen sekä energiatehokkuuden näkökulmista. Tulokset osoittavat, että faasimuutosmateriaalit parantavat merkittävästi lämpöenergian varastoinnin hallittavuutta ja järjestelmätason tehokkuutta verrattuna perinteisiin vesipohjaisiin ratkaisuihin. (Sanaye ja muut, 2026; Shanmugavalli ja Rajaraman, 2026; Chopra ja muut, 2026)

5.1.1 Lämpötilaprofiilit

Tutkimuksissa havaittiin, että faasimuutosmateriaalit muuttavat rakennusten lämpötilaprofiileja tasaisemmiksi ja pidentävät lämpötilatason kestoja. Sanaye ja muut (2026) osoittivat, että suolahydraattipohjainen PCM-järjestelmä toimii korkeammassa lämpötilatasossa verrattuna vesi-jääseokseen, mikä parantaa sen yhteensopivuutta lämpöpumppu- ja jäähdytysjärjestelmien kanssa. Lisäksi Shanmugavalli ja Rajaraman (2026) raportoivat, että PCM-pohjaisessa varaajassa yli 60 °C lämpötila säilyi kaksinkertaisen ajan, mikä osoittaa lämpötilaprofiilin tasoittumista ja energian luovutuksen pidentymistä.

Aurinkolämpöjärjestelmissä Chopra ja muut (2026) havaitsivat, että paisutetulla grafiitilla vahvistettu PCM parantaa lämmönjohtavuutta ja vähentää lämpövastusta,

mikä johtaa nopeampaan lämpötilan tasapainottumiseen varastointimateriaalissa. Lisäksi EG-rakenteen muodostama lämpöä johtava verkosto tasaa lämpögradientteja koko PCM-matriisin sisällä, mikä vähentää paikallisia lämpötilapiikkejä ja edistää homogeenista faasimuutosta (Chopra ja muut, 2026).

5.1.2 Lataus- ja purkuominaisuudet

Lataus- ja purkukäyrien osalta tulokset osoittavat, että PCM tasaa ja hallitsee lämpöenergian siirtymistä järjestelmässä. Shanmugavalli ja Rajaraman (2026) raportoivat, että PCM-järjestelmä pidentää purkuvaiheen hyödyllistä lämpötehoa ja tasaa lämpötilan muutoksia sekä lataus- että purkuprosessien aikana.

Vastaavasti Chopra ja muut (2026) osoittivat, että EG-vahvistettu PCM nopeuttaa sekä sulamis- että jähmettymisvaiheita, mikä lyhentää koko lataus–purkusyklin kestoa ja parantaa järjestelmän dynaamista vasteaikaa. Lisäksi parantunut lämmönsiirto tehostaa latenttilämmön hyödyntämistä, jolloin suurempi osa varastoidusta energiasta voidaan vapauttaa hallitusti lyhyemmässä ajassa (Chopra ja muut, 2026).

5.1.3 Faasimuutosmateriaalien käyttäytyminen ja alijäähtyminen

Materiaalikäyttäytymisen osalta kirjallisuudessa tunnistetaan erityisesti sulalahydraattien alijäähtyminen, faasierottelu ja sulamis–jähmettymislämpötilojen välinen hystereesi keskeisiksi haasteiksi. Jayabal ja muut (2026) korostavat, että nämä ilmiöt heikentävät PCM-järjestelmien pitkäaikaista toimintavarmuutta, mutta niitä voidaan lieventää kapseloinnilla, stabilointiaineilla sekä rakenteellisilla ratkaisuilla. Lisäksi tutkimuksessa todetaan, että oikein optimoiduilla materiaali- ja järjestelmäratkaisuilla voidaan saavuttaa jopa 85–95 % latenttilämmön säilyminen tuhansien lämpösykliä aikana (Jayabal ja muut, 2026).

5.1.4 Energiatiheys ja lämmönsiirron tehokkuus

Energiatiheyden osalta tutkimukset osoittavat selviä eroja eri PCM-tyyppien välillä. Sanaye ja muut (2026) havaitsivat, että vesi-jääseoksella on huomattavasti korkeampi latenttilämpö verrattuna suolahydraatteihin. Toisaalta suolahydraattijärjestelmät osoittivat parempaa järjestelmätason energianhallintaa ja pienempiä elinkaarikustannuksia.

Lämmönsiirron tehostamisen osalta Chopra ja muut (2026) osoittivat, että EG-rakenteen lisääminen PCM-materiaaliin muodostaa lämpöä johtavan verkoston, joka pienentää lämpövastusta ja parantaa sekä varastointi- että purkuvaiheen tehokkuutta. Tulosten perusteella tämä näkyy käytännössä nopeampana lämpöenergian varastoitumisena ja vapautumisena, eli lyhyempinä lataus- ja purkuaikoina sekä tasaisempaa lämpötilan muutoksena materiaalissa. Lisäksi EG vähentää sulan PCM:n liikkumista ja parantaa materiaalin muotostabiilisuutta, mikä tekee järjestelmästä toimintavarmemman toistuvissa lämpösykleissä. (Chopra ja muut, 2026)

5.1.5 Järjestelmän suorituskyky

Järjestelmätason tarkastelussa PCM-teknologia parantaa energiatehokkuutta, kustannustehokkuutta ja hiilidioksidipäästöjen vähentämistä. Sanaye ja muut (2026) raportoivat, että suolahydraattijärjestelmä saavutti korkeamman eksergiatehokkuuden verrattuna vesi-jääjärjestelmään, sekä alhaisemmat vuosikustannukset ja lyhyemmän takaisinmaksuajan.

Lisäksi Shanmugavalli ja Rajaraman (2026) osoittivat, että PCM-järjestelmä paransi lämpötehokkuutta 55,6 prosentista 62,0 prosenttiin käyttöveden lämmitysovelluksessa, mikä vahvistaa PCM:n hyödyt rakennusten energiajärjestelmissä. Lisäksi PCM:n integrointi paransi myös lämpötilan hallittavuutta ja vähensi lämpöhäviöitä

varastointijärjestelmässä, mikä tukee sen soveltuvuutta jatkuvassa käytössä oleviin taloteknisiin järjestelmiin (Shanmugavalli & Rajaraman, 2026).

5.1.6 Yhteenveto aiempien tutkimusten tuloksista

Kokonaisuutena aiemmat tutkimukset osoittavat, että PCM-pohjaiset lämpöenergian varastointijärjestelmät parantavat erityisesti:

- lämpötilaprofiilien tasaisuutta ja hallittavuutta,
- lataus- ja purkuprosessien energidynamiikkaa,
- lämmönsiirtoa rakenteellisilla ratkaisuilla (esim. EG) ja
- järjestelmätason energiatehokkuutta ja kustannustehokkuutta.

Keskeiset rajoitteet liittyvät edelleen materiaalien alijäähtymiseen, faasierotteluun ja pitkäaikaiskestävyyteen, joita voidaan kuitenkin lieventää materiaaliteknisin ja rakenteellisin ratkaisuin. Lisäksi kirjallisuus osoittaa, että näiden haasteiden ratkaiseminen edellyttää materiaalien, kapselointitekniikoiden ja ohjausstrategioiden yhteisoptimointia, jotta PCM-järjestelmien täysi potentiaali voidaan hyödyntää pitkäaikaisessa ja toistuvassa käyttökuormituksessa. (Jayabal ja muut, 2026)

5.2 Tulokset uusissa mittauksissa

Tässä diplomityössä ei pystytty toteuttamaan uusia mittauksia lämpöenergian varastointijärjestelmällä. Järjestelmää tarkasteltaessa havaittiin faasimuutosmateriaalin vuotoa, mikä viittaa siihen, että järjestelmän tiiveydessä tai kapseloinnissa on puutteita.

Lisäksi lämpöenergian varastointijärjestelmän toteutettu kokoonpano ei vastannut täysin suunnittelupiirustuksia. Tämä aiheutti viivästyksiä ja vaikeutti asennustöiden etenemistä sekä järjestelmän käyttöönottoa.

Havaintojen perusteella järjestelmä ei ollut vielä siinä kunnossa, että luotettavia mittauksia tai suorituskyvyn arviointia olisi voitu tehdä. Jatkotoimenpiteinä tutkimuksessa tulisi varmistaa rakenteiden tiiviys ja kokoonpanon vastaavuus piirustuksiin ennen uusien mittausten toteuttamista.

6 Pohdinta

Tässä diplomityössä tarkasteltiin faasimuutosmateriaaleihin perustuvia lämpöenergian varastointijärjestelmiä sekä kirjallisuuden että käytännön havaintojen perusteella. Tulosten perusteella PCM-teknologialla on selkeä potentiaali parantaa rakennusten energiatehokkuutta, mutta sen käytännön toteutukseen liittyy edelleen joitain haasteita.

Kirjallisuuskatsaus ja aiemmat tutkimukset osoittavat, että faasimuutosmateriaalit parantavat erityisesti lämpötilaprofiilien tasaisuutta, lämpökuormien hallintaa sekä järjestelmätason energiatehokkuutta. Useissa tutkimuksissa on havaittu, että faasimuutosmateriaalit voivat pidentää lämpötilatason kestoja ja tasata lataus- ja purkuprosessien lämpötilavaihteluita verrattuna perinteisiin vesipohjaisiin ratkaisuihin (Sanaye ja muut, 2026; Shanmugavalli ja Rajaraman, 2026; Chopra ja muut, 2026). Tämä vahvistaa ymmärrystä siitä, että PCM-järjestelmät soveltuvat erityisesti sovelluksiin, joissa kuormitukset vaihtelevat ajallisesti, kuten talotekniikan sovelluksiin.

Toisaalta kirjallisuus osoittaa, että faasimuutosmateriaalien suorituskyky riippuu hyvin paljon materiaalivalinnasta sekä järjestelmän rakenteellisesta toteutuksesta. Esimerkiksi suolahydraateilla on hyvä energian varastointikyky ja järjestelmätason tehokkuus, mutta niiden käyttöä rajoittavat alijäähtyminen ja faasierottelu. Vesi–jääjärjestelmät puolestaan tarjoavat korkean latenttilämmön, mutta niiden käyttölämpötila on rajallinen. Näin ollen PCM-valintaa tehdessä on tarkasteltava, mitä halutaan energiatehokkuuden, käyttölämpötilan ja järjestelmän soveltuvuuden välillä toteuttaa. (Sanaye ja muut, 2026; Jayabal ja muut, 2026)

Rakenteellisilla ratkaisuilla, kuten paisutetun grafiitin käytöllä, voidaan kirjallisuuden perusteella parantaa merkittävästi lämmönsiirtoa ja järjestelmän dynaamista toimintaa. Paisutetun grafiitin käyttö muodostaa lämpöä johtavan verkoston, joka pienentää järjestelmän lämpövastusta ja nopeuttaa faasimuutosta. Tämä tarkoittaa sitä, että

materiaalivalinnan lisäksi myös rakenteellinen suunnittelu on keskeisessä roolissa järjestelmän suorituskyvyn optimoinnissa. (Chopra ja muut, 2026)

Tässä diplomityössä uuden hankkeen toteutuksessa ja sen havainnoissa nousi esiin myös käytännön toteutukseen liittyviä ongelmia. Dixitin ja muiden (2022) mukaan suolahydraateilla on havaittu vuotamisongelmaa sulassa tilassa, mikä on yksi keskeisistä käytännön haasteista PCM-järjestelmissä. Sama ongelma ilmeni myös NewHeatIntegrated-hankkeen käytännön toteutuksessa, jossa faasimuutosmateriaalin vuoto viivästytti järjestelmän asennusta ja oli yksi keskeisistä syistä mittauksen aloittamisen estymiselle.

NewHeatIntegrated-hankkeen varastointijärjestelmää tarkasteltaessa havaittiin, että lämpöenergian varastointiyksiköitä ei ollut säilytetty pystyasennossa, mikä saattoi osaltaan vaikuttaa vuodon syntymiseen. Tarkkaa vuodon ajankohtaa, syytä tai määrää ei pystytty tarkasti ilmoittamaan. Vuodon ilmetessä varastointiyksiköihin tehtiin tarkastuksia ja korjauksia, minkä jälkeen yksiköt säilytettiin pystyasennossa useiden päivien ajan ilman uusia havaintoja vuodoista. Vuodon selvittäminen ja siihen liittyvät korjaukset viivästyttivät järjestelmän asennusta useilla kuukausilla.

Taloudellisesta näkökulmasta kirjallisuus osoittaa, että PCM-järjestelmät voivat tarjota merkittäviä säästöjä erityisesti energian kulutuksen ja huipputehon tarpeen pienenemisen kautta. Toisaalta korkeammat investointikustannukset, materiaalien erityisvaatimukset sekä järjestelmien monimutkaisuus voivat hidastaa teknologian laajaa käyttöönottoa. (Suresh ja muut, 2026; Jayabal ja muut, 2026)

Aiempien tutkimusten perusteella havaittiin, että PCM-materiaalien jatkotutkimuksissa olisi suotavaa keskittyä erityisesti materiaalien pitkäaikaiskestävyyteen, faasimuutoskäyttämisen vakauteen sekä suolaliuosvuotojen ennalta ehkäisemiseen. Näiden lisäksi olisi hyvä toteuttaa jatkotutkimuksia todellisissa käyttöympäristöissä, jotta kirjallisuudessa raportoidut hyödyt voidaan varmistaa käytännönolosuhteissa. Myös

järjestelmäintegraation kehittäminen on keskeisessä roolissa PCM-tekniikan suorituskyvyn kehittämisessä ja optimoinnissa. (Jayabal ja muut, 2026; Suresh ja muut, 2026)

Kokonaisuutena faasimuutosmateriaalipohjaiset lämpöenergian varastointijärjestelmät tarjoavat selkeän potentiaalín energiatehokkuuden parantamiseen talotekniikassa, mutta niiden laajempi hyödyntäminen edellyttää käytännön toteutuksen kehittämistä sekä luotettavuuden parantamista järjestelmätasolla.

7 Johtopäätökset

Faasimuutosmateriaaleihin perustuvat lämpöenergian varastointijärjestelmät ovat kirjallisuuden ja aiempien tutkimusten perusteella hyvin soveltuvia taloteknisiin lämmitys- ja jäähdytysratkaisuihin. Niiden keskeinen etu on kyky varastoida ja vapauttaa suuria määriä lämpöenergiaa faasimuutoksen yhteydessä lähes vakioämpötilassa, mikä parantaa lämpökuormien hallintaa ja tasaa järjestelmien toimintaa vaihtelevissa käyttötilanteissa.

Kirjallisuuden perusteella faasimuutosmateriaaleihin perustuvat lämpöenergian varastointijärjestelmät parantavat lämpötilaprofiilien tasaisuutta, lataus- ja purkuprosessien hallittavuutta sekä järjestelmätason energiatehokkuutta verrattuna perinteisiin vesipohjaisiin lämpövarastoihin. Lisäksi faasimuutosmateriaalien integrointi lämpöpumppuihin ja muihin taloteknisiin järjestelmiin voi nostaa lämpöpumpun lämpökerroin-arvoa, vähentää energiankulutusta ja pienentää käyttökustannuksia, mikä vahvistaa niiden teknistaloudellista potentiaalia.

Faasimuutosmateriaalien valinnalla on kuitenkin keskeinen vaikutus järjestelmän suorituskykyyn. Suolahydraattipohjaiset faasimuutosmateriaalit tarjoavat kilpailukykyisen eksergiatehokkuuden ja soveltuvat paremmin korkeampiin käyttölämpötiloihin, mutta niiden käyttöä rajoittavat faasierottelu ja alijäähtyminen. Vesi-jääjärjestelmät puolestaan tarjoavat korkean latenttilämpökapasiteetin, mutta niiden käyttöalue on jää lämpötilan suhteen rajallisemmaksi. Kirjallisuus osoittaa, että näitä haasteita voidaan osittain hallita kapseloinnilla, stabiloinnilla ja lämmönsiirtoa tehostavilla rakenteilla, kuten grafiittipohjaisilla lisäaineilla.

Tarkastellun tutkimuskokonaisuuden perusteella faasimuutosmateriaalien hyödyntäminen lämpöenergian varastointijärjestelmien käytännön toteutuksessa talotekniikassa on herkkä suunnittelu- ja toteutusvirheille. NewHeatIntegrated-hankkeen mittausjärjestelmän käyttöönotossa havaittu faasimuutosmateriaalin vuoto

sekä rakenteelliset ja dokumentaatiopuutteet osoittivat, että materiaalien pitkäaikaiskestävyys, kapseloinnin laatu ja järjestelmäintegraation onnistuminen ovat kriittisiä tekijöitä luotettavan toiminnan kannalta.

Tutkielman tutkimuskysymykseen voidaan vastata, että faasimuutosmateriaaleilla on yleisesti hyvä tekninen soveltuvuus lämpöenergian varastointijärjestelmien taloteknisissä toteutuksissa kirjallisuustiedon perusteella. Ne parantavat järjestelmien energiatehokkuutta, lämpökuormien hallintaa ja järjestelmien toimintaa myös taloteknisissä sovelluksissa.

Faasimuutosmateriaalien käytännön soveltuvuus on ehdollista, sillä se riippuu hyvin paljon materiaalivalinnasta, kapseloinnista ja järjestelmän toteutuksen laadusta. Käytännön todellisissa järjestelmissä esiintyvät haasteet, kuten vuoto-ongelmat ja faasierottelu, voivat heikentää järjestelmien luotettavuutta ja rajoittaa niiden käyttöä.

8 Yhteenveto

Tässä tutkielmassa tarkasteltiin faasimuutosmateriaaleihin perustuvia lämpöenergian varastointijärjestelmiä erityisesti talotekniikassa. Työ perustui laajaan kirjallisuuskatsaukseen sekä NewHeatIntegrated-hankkeen lämpöenergian varastointijärjestelmän käyttöönoton tarkasteluun.

Kirjallisuuden perusteella PCM-pohjaiset lämpövarastot tehostavat lämpöenergian hallintaa mahdollistamalla energian varastoinnin ja luovutuksen lähes vakiolämpötilassa. Tämä parantaa lämpötilaprofiilien tasaisuutta ja mahdollistaa kuormien siirron ajallisesti, mikä on hyödyllistä erityisesti vaihtelevissa energiakuormituksissa. Eri PCM-materiaalien välillä havaitaan merkittäviä eroja: suolahydraatit tarjoavat korkean eksergiatehokkuuden mutta ovat alttiita faasierottelulle ja alijäähtymiselle, kun taas orgaaniset materiaalit ovat stabiileja mutta energiatiheydeltään heikompia. Rakenteelliset ratkaisut, kuten kapselointi ja lämmönjohtavuutta parantavat lisäaineet, ovat keskeisiä suorituskyvyn parantamisessa.

Tutkimusten mukaan faasimuutosmateriaalien integrointi lämpöpumppuihin voi parantaa järjestelmän COP-arvoa ja vähentää energiankulutusta sekä käyttökustannuksia. Lisäksi faasimuutosmateriaalit mahdollistavat uusiutuvan energian ja hukkalämmön tehokkaamman integroinnin järjestelmiin sekä parantaa järjestelmien toimintavarmuutta. Aurinkolämpösovelluksissa lämmönjohtavuutta voidaan tehostaa esimerkiksi grafiittipohjaisilla komposiiteilla, mikä nopeuttaa lataus- ja purkuprosesseja sekä parantaa järjestelmän dynamiikkaa.

Kokeellisten tutkimusten perusteella faasimuutosmateriaaleihin pohjautuvat lämpöenergian varastointijärjestelmät tasoittavat rakennusten lämpötilavaihteluita, pidentävät käyttökelpoisen lämpötehon kestoja ja parantavat varastoinnin hyötysuhdetta. Samalla kirjallisuudessa tunnistetaan edelleen haasteita, jotka liittyvät materiaalien pitkäaikaiskestävyyteen, faasimuutoksen epävakauteen sekä alijäähtymiseen.

Yleisesti voidaan todeta, että faasimuutosmateriaalipohjaisilla lämpöenergian varastointijärjestelmillä on merkittävä potentiaali rakennusten energiatehokkuuden parantamisessa talotekniikassa. Teknologian laajempi käyttöönotto edellyttää kuitenkin materiaalien ja kapselointitekniikoiden kehittämistä sekä järjestelmätason suunnittelun ja ohjauksen parantamista. Käytännön toteutuksessa korostuvat erityisesti luotettavuus, tiiveys ja komponenttien yhteensopivuus, jotka ovat keskeisiä järjestelmän pitkäaikaiselle toiminnalle.

Lähteet

- Cabeza, L. F., Zsembinski, G., Palomba, V., Borri, E., Lapka, P., Mateu, C., ... & Mani Kala, S. (2. tammikuuta, 2026). *Increasing the sustainability of buildings by using thermal energy storage*. *Nature Reviews Clean Technology*, 1-13. Noudettu 5.4.2026 osoitteesta <https://www.nature.com/articles/s44359-025-00123-4>
- Cao, Z., Sun, S., Ma, G., Feng, A., Kang, K., Sun, G., & Li, J. (tammikuu, 2026). *Phase change materials for efficient thermal energy storage and its potential applications in sustainable facility agriculture: A critical review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 225, 116169. Noudettu 6.4.2026 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032125008421>
- Chi, B., Li, B., Zuo, H., Xu, H., Zeng, K., Lu, Y., ... & Chen, H. (1. maaliskuuta, 2025). *Development of continuous latent and sensible heat storage device with multi-energy composition for enhancing energy density*. *Applied Thermal Engineering*, 262, 125190. Noudettu 5.4.2026 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431124028588> tai <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125190>
- Chopra, K., Pandey, A. K., Islam, A., Rajamony, R. K., Mansor, M., & Tyagi, V. V. (tammikuu, 2026). *Enhancing charging/discharging performance of solar-assisted water heater integrated with stearic acid/expanded graphite as form-stable phase change material*. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 178, 106406. Noudettu 16.5.2026 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876107025004560>
- Dixit, P., Reddy, V. J., Parvate, S., Balwani, A., Singh, J., Maiti, T. K., ... & Chattopadhyay, S. (heinäkuu, 2022). *Salt hydrate phase change materials: Current state of art and the road ahead*. *Journal of Energy Storage*, 51, 104360. Noudettu 5.4.2026

osoitteesta

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X2200384X> tai
<https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104360>

Dora, S., Kuznik, F., & Madhavan, M. K. (maaliskuu, 2026). *Phase change materials for buildings' thermal energy management: an overview*. *Thermal Science and Engineering Progress*, 104521. Noudettu 5.4.2026 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2451904926000478>

Euroopan parlamentti ja neuvosto. (19. kesäkuuta, 2018). *Direktiivi (EU) 2018/844, annettu 30 päivänä toukokuuta 2018, rakennusten energiatehokkuudesta annetun direktiivin 2010/31/EU ja energiatehokkuudesta annetun direktiivin 2012/27/EU muuttamisesta*. Noudettu 5.4.2026 osoitteesta <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0844&from=FI>

Fareedi, A. U. R., Khoso, A. Q., Buonomo, B., Manca, O., Khan, H., & Nardini, S. (30. huhtikuuta, 2026). Experimental investigation of inclination-angle effects on PCM melting in shell-and-tube thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*, 156, 121567. Noudettu 15.5.2026 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X26012314>

Gao, Z., Boudreaux, P., Shabtay, Y., Carmeli-Shabtay, N., Nawaz, K., & Vineyard, E. A. (15. tammikuuta, 2026). Novel thermal energy storage component: Development, performance, and phase transition diagnosis. *Energy Conversion and Management*, 348, 120682. Noudettu 3.5.2026 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890425012063#s0010>

García-Alonso, J. M., Peña, D. G., Fuente, M. G., & Tristán, C. A. (maaliskuu, 2026). PCM-Based Heat Exchanger for Low-Temperature Hybrid Residential Air Conditioning with Ground-Source Heat Pumps: Design and Validation. *Results in Engineering*,

109087. Noudettu 15.5.2026 osoitteesta
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123026001301>

Garg, H. P., Mullick, S. C., & Bhargava, A. K. (1985). *Sensible heat storage*. Solar Thermal Energy Storage (s. 82-153). Dordrecht: Springer Netherlands. 5.4.2026 osoitteesta https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-009-5301-7_2#rightslink

Huang, Q., Jiang, J., Hong, Y., Li, J., Coffele, F., Newall, S., ... & Li, Y. (6. tammikuuta, 2026). *Electrified thermal energy storage*. Nature Reviews Clean Technology, 1-18. Noudettu 5.4.2026 osoitteesta <https://www.nature.com/articles/s44359-025-00131-4>

Jayabal, R., Sekar, S., Leo, G. L., Ayyar, M., Soudagar, M. E. M., Santhamoorthy, M., ... & Shanmugapriya, D. (huhtikuu, 2026). *Advanced phase change material-thermal energy storage for low-carbon heat: materials, reliability, and AI-driven system integration for industry, buildings, and data centers*. Applied Energy, 409, 127479. Noudettu 6.4.2026 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261926001315>

Jian, Y., Falcoz, Q., Neveu, P., Bai, F., Wang, Y., & Wang, Z. (1. helmikuuta, 2015). Design and optimization of solid thermal energy storage modules for solar thermal power plant applications. *Applied Energy*, 139, 30-42. Noudettu 3.5.2025 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914011684>

Jyväskylän yliopisto. (n.d.). *Määrällinen tutkimus*. Noudettu 6.4.2026 osoitteesta <https://sites.app.jyu.fi/mehu/fi/metelmapolku/tutkimusstrategiat/maarallinen-tutkimus>

- Kaldeh, S. N., Yousefi, H., Abdoos, M., Shirazi, M. A., & Noorollahi, Y. (lokakuu, 2025). *Mapping thermal energy storage research in buildings (2020–2025): a bibliometric analysis of trends, themes, and global collaboration*. Energy Conversion and Management: X, 101345. Noudettu 5.4.2026 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174525004775>
- Kamstrup. (n.d.). *Product centre*. Noudettu 14.5.2026 <https://www.kamstrup.com/fi-fi/product-centre>
- Khatod, K. J., Katekar, V. P., & Deshmukh, S. S. (kesäkuu, 2022). *An evaluation for the optimal sensible heat storage material for maximizing solar still productivity: A state-of-the-art review*. Journal of Energy Storage, 50, 104622. Noudettu 5.4.2026 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X22006387>
- Kiyabu, S., Shkatulov, A., Ahmed, A., Greene, S. M., Huinink, H. P., & Siegel, D. J. (24. lokakuuta, 2025). *Materials for thermochemical energy storage and conversion: attributes for low-temperature applications*. Materials Horizons. Noudettu 5.4.2026 osoitteesta <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2026/mh/d5mh01794g>
- NewHeatIntegrated. (n.d.). *Project overview*. Noudettu 6.4.2026 osoitteesta <https://newheatintegrated.eu/>
- Odukamaiya, A., Woods, J., James, N., Kaur, S., Gluesenkamp, K. R., Kumar, N., ... & Prasher, R. (14. syyskuuta 2021). *Addressing energy storage needs at lower cost via on-site thermal energy storage in buildings*. Energy & Environmental Science, 14(10), 5315-5329. Noudettu 5.4.2026 osoitteesta <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2021/ee/d1ee01992a>

- Panchabikesan, K., Joybari, M. M., Haghghat, F., Eicker, U., Ramalingam, V. (30. maaliskuuta, 2022). *Analogy Between Thermal, Mechanical, and Electrical Energy Storage Systems*. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier. Noudettu 5.4.2026 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com/science/chapter/referencework/abs/pii/B9780128197233001438?via%3Dihub>
- Reddick, C., Sorin, M., Bonhivers, J. C., & Laperle, D. (15. maaliskuuta, 2020). *Waste heat and renewable energy integration in buildings*. Energy and Buildings, 211, 109803. Noudettu 5.4.2026 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778819319036>
- Sanaye, S., Ahmadi, B., & Borzuei, D. (2026). *4E-ANN modeling, optimizing and comparison of two proposed cold thermal energy storage systems of encapsulated water and hydrated salt*. Results in Engineering, 110388. Noudettu 6.4.2026 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123026014222>
- Shanmugavalli, P., & Rajaraman, R. (11. huhtikuuta, 2026). Experimental investigation of PCM-enhanced thermal energy storage for sustainable water heating applications. *Next Energy*, 11, 100582. Noudettu 15.5.2026 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949821X26000724>
- Siemens. (5. tammikuuta, 2026). *LOGO!Power*. Noudettu 14.5.2026 osoitteesta <https://sieportal.siemens.com/en-bg/products-services/10322153?tree=CatalogTree#categoryOverview>
- Suresh, C., Awasthi, A., Kumar, B., Lee, H., & Jeon, Y. (tammikuu, 2026). *Comprehensive review on heat pump systems integrated with phase change material-based thermal energy storage for sustainable building heating*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 226, 116197. [rajattu pääsy] Noudettu 7.4.2026

osoitteesta

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032125008706>

Tang, S., Zhang, D., Wang, W., Xi, H., Wu, X., & Guo, M. (15. maaliskuuta, 2026). *Enhancing melting-solidification performance of latent heat thermal energy storage units with twisted fins*. *Renewable Energy*, 125250. Noudettu 5.4.2026 osoitteesta

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148126000753>

Thermtest. (13. joulukuuta 2024). *Understanding phase change materials (PCM)*. Noudettu 5.4.2026 osoitteesta <https://thermtest.com/phase-change-material-pcm>

Tilastokeskus. (4. joulukuuta, 2025a). *Suomen virallinen tilasto (SVT): Asumisen energiankulutus*. Noudettu 5.4.2026 osoitteesta <https://stat.fi/fi/tilasto/asen>

Tilastokeskus. (11. marraskuuta, 2025b). *Suomen virallinen tilasto (SVT): Sähkön ja lämmön tuotanto*. Noudettu 5.4.2026 osoitteesta <https://stat.fi/fi/tilasto/salatuo>

Widera, B., Skiba, M., & Sztubecka, M. (8. elokuuta 2025). *Energy Storage and Energy Efficiency in Buildings and Cities*. *Energies*, 18(16), 4210. Noudettu 5.4.20256 osoitteesta <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/16/4210>

Yadav, V. K., Ghosh, P., & Sarkar, J. (huhtikuu, 2026). Experimentation and optimization of a novel PCM-based thermal storage-cum-exchanger using steel wire mesh. *Applied Thermal Engineering*, 130100. Noudettu 15.5.2026 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431126004084>

Yang, Z. L., Walvekar, R., Wong, W. P., Sharma, R. K., Dharaskar, S., & Khalid, M. (15. toukokuuta, 2024). *Advances in phase change materials, heat transfer*

enhancement techniques, and their applications in thermal energy storage: A comprehensive review. Journal of Energy Storage, 87, 111329. Noudettu 5.4.2026 osoitteesta

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X24009149>

Ympäristöministeriö. (n.d.). *Rakennusten energiatehokkuus.* Noudettu 5.4.2026 osoitteesta <https://ym.fi/rakennusten-energiatehokkuus>

Yousef, B. A., Elsaid, K., & Abdelkareem, M. A. (1. lokakuuta, 2021). *Potential of nanoparticles in solar thermal energy storage.* Thermal Science and Engineering Progress, 25, 101003. Noudettu 30.1.2026 osoitteesta

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2451904921001645>