

Opinnäytetyö (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

2023

Mariella Jaakkola

Kylmäenergian varastointi

– Kylmävarasto osana pakastusprosessia



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Energia- ja ympäristötekniikka

2023 | 40 sivua

Mariella Jaakkola

Kylmäenergian varastointi

- Kylmävarasto osana pakastusprosessia

Opinnäytetyössä tutkittiin soveltuvia kylmäenergian varastointiteknologioita, joilla mahdollistetaan energiankäytön siirtäminen vuorokauden aikoihin, jolloin sähkön hinta on edullisinta. Tutkimuksen tarkoituksena oli tehdä esiselvitystyö kylmävaraston kannattavuudesta osaksi nykyistä pakastusprosessia. Työn toimeksiantajana toimi Finess Energy Oy.

Kylmäenergian varastointi on prosessi, jossa energiaa varastoidaan sähkön kysynnän ja hinnan ollessa alhaiset. Tätä varastoitua energiaa käytetään jäähdyttämiseen ja pakastamiseen sähkön kysynnän ja hinnan ollessa taas korkeammalla tasolla. Kylmävaraston avulla sähköntuotantoa pystytään tasaamaan.

Kylmävarastojen soveltuvuus on hyvin rajoitettu, erityisesti niiden käyttölämpötilan ja energiatehokkuuden vuoksi. Tarvitaan lisätutkimusta varastointitekniikan käyttäytymisestä, jotta varmistetaan tekniikan toimivuus ennustetulla tavalla.

Asiasanat:

Kylmäenergia, varastointi, jäähdytys, pakastus, ammoniakki

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Energy and environmental technology

2023 | 40 pages

Mariella Jaakkola

Cold thermal energy storage

- Cold storage in freezing process

In this thesis, cold thermal energy storage technologies which enable the transfer of energy use to times of the day when the price of electricity is the cheapest were researched. The purpose of this thesis was to devise a preliminary study on the profitability of cold storage as part of the current freezing process. The thesis was commissioned by Finess Energy Oy.

Cold thermal energy storage is a process that relies on storing thermal energy when the demand and price of electricity are low. The stored energy is then used for cooling and freezing when the demand and price of electricity are at a higher level. Electricity production can be balanced with cold storage.

The applicability of cold storages is very limited, especially due to their operating temperature and energy efficiency. Further research on the behavior of the storage technology is needed to ensure that the technology functions as predicted.

Keywords:

Cold energy, storage, cooling, freezing, ammonia

Sisältö

Käytetyt lyhenteet tai sanasto	7
1 Johdanto	8
2 Kylmäprosessi	9
2.1 Kylmäaineet	10
2.2 Pakastusprosessi kalanjalostuslaitoksessa	11
3 Ammoniakki (NH₃)	12
3.1 Ammoniakki kylmäaineena	12
3.2 Ammoniakin haasteet käytössä	14
4 Kylmäenergian varastointi	16
4.1 Sähköakku	17
4.2 Massavaraaja	17
4.3 Faasimuutosmateriaalit	19
4.3.1 Faasimuutoslämpötilat	21
4.3.2 Hiilidioksidin käyttö faasimuutosmateriaalina	23
4.3.3 Kuivajää	24
4.4 Absorptiojäähdytin	25
4.4.1 Ammoniakkivesi	27
4.5 Nestemäisen ilman energiavarasto	27
4.6 Muut menetelmät	29
5 Tulokset	30
5.1 Energiavarastojen tulevaisuuden kehitysnäkymät	31
5.2 Käyttökustannukset	32
5.3 Sähkön hinta	32
5.4 Mahdollinen saavutettava säästö	33
6 Yhteenveto	35
Lähteet	37

Kaavat

Kaava 1. Faasimuutokseen varastoitava lämpömäärä. (Regin et al. 2008.)	19
Kaava 2. Lämpökertoimen laskenta.	27

Kuvat

Kuva 1. Kylmäprosessin kuvaus.	9
Kuva 2. Ammoniakin log p,h- tilapiirros. (Kianta 2013, 21.)	13
Kuva 3. Ammoniakin faasidiagrammi. (muokattu Sariola 2020, 16.)	14
Kuva 4. Tuntuvan lämmön ja latenttilämmön ero. (Kushwah et al. 2020, 82)	20
Kuva 5. PCM-ryhmien faasimuutoslämpötilat ja sulamisentalpiat. (Kushwah et al. 2020, 85.)	22
Kuva 6. Hiilidioksidin kolmoispiste. (Verpe 2018.)	24
Kuva 7. Absorptiojäähdyttimen toimintaperiaate. (Lin 2019.)	26
Kuva 8. Nestemäisen ilman varastointiprosessi. (mukaillen Vecchi et al. 2021.)	28

Kuviot

Kuvio 1. Sähkön hinnan muodostuminen kuukausitasolla.	33
---	----

Taulukot

Taulukko 1. Kylmäaineen toivottavat ominaisuudet. (Kaappola et al. 2012.)	10
Taulukko 2. Ammoniakin ominaisuudet.	12
Taulukko 3. Altistumisen raja-arvot ammoniakille. (Linde 2020.)	15
Taulukko 4. Sähköakun tiedot.	17
Taulukko 5. Varaajan tiedot.	18
Taulukko 6. Faasimuutosmateriaalien luokittelu. (mukaillen Laitinen et al. 2016.)	20

Taulukko 7. Kaupallisesti saatavilla olevat materiaalit.	23
Taulukko 8. Energiavarastojen investointikustannukset.	30
Taulukko 9. Varastointiteknologioiden kehitysnäkymä. (IRENA 2020, 27.)	31
Taulukko 10. Säästöjen tarkastelu.	34

Käytetyt lyhenteet tai sanasto

Absorptio	Prosessi, jossa jokin ainesosa liukenee kaasusta nesteeseen
CFC-kylmäaine	Klooria, hiiltä ja fluoria sisältävä halogeenihiilivety. Yhdisteiden käyttö on ollut kiellettyä uusissa laitoksissa vuodesta 1995 lähtien. (Kianta 2013.)
COP	Lämpökertoimen lyhenne (Coefficient Of Performance)
CTES	Kylmäenergian varastointi (Cold Thermal Energy Storage)
GWP	Luku, joka ilmaisee kylmäaineen kasvihuonehaitallisuuden (Global Warming Potential)
Kysyntäjousto	Sähkönkäytön siirtämistä korkean kulutuksen ja hinnan tunneilta edullisempaan aikaan. (Fingrid.)
LAES	Nestemäisen ilman energiavarasto (Liquid Air Energy Storage)
ODP	Luku, joka ilmaisee kylmäaineen suhteellisen otsonihaitallisuuden (Ozone Depletion Potential)
PCM	Faasimuutosmateriaali (Phase Change Material)
RSW-säiliö	Jäähdytettyyn meriveteen (Refrigerated Sea Water) perustuva järjestelmä, jota käytetään kalastusaluksissa saaliiden säilyttämiseen.
Sähköfutuurit	Johdannaisia, jotka luovat ennustettavuutta sähkön tuleville spot-hinnoille. Niiden avulla sähköyhtiöt suojautuvat markkinariskeiltä. (Halvin sähkösopimus 2023.)

1 Johdanto

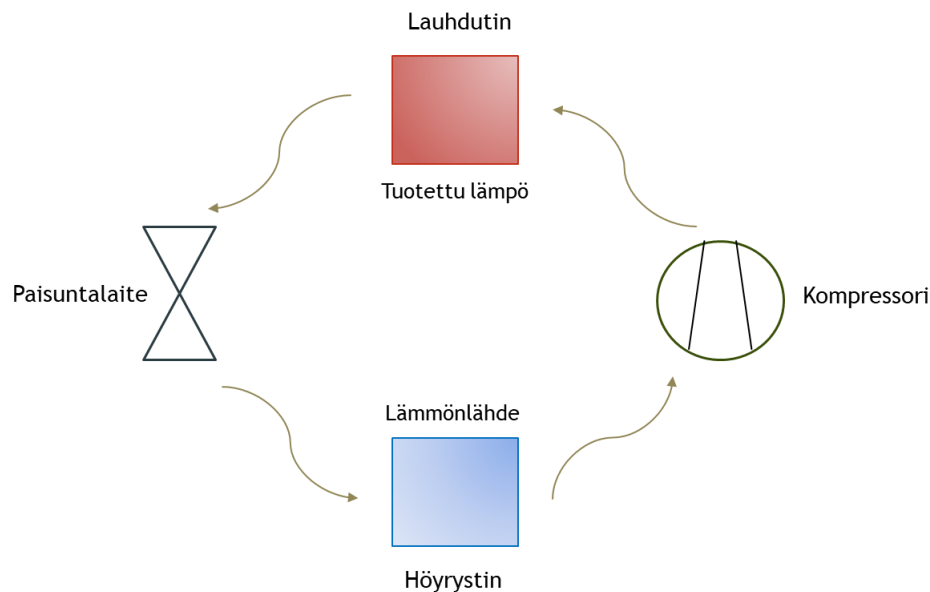
Energiakriisin myötä tarve tutkia vaihtoehtoisia kylmävarastoja osana pakastusprosessia kasvaa. Tulevaisuudessa energian varastointi tulee olemaan avainasemassa, koska tehokkaat varastointiratkaisut tukevat energijärjestelmän tasapainottamista. Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää soveltuvia ratkaisuja kylmäenergian varastointiin, jotta suurin osa pakastamisen energiankäytöstä tapahtuisi päiväsajan sijasta yöaikaan. Täten mahdollistetaan sähkön edullisempien hintojen hyödyntäminen ja saavutetaan taloudellista säästöä.

Tässä työssä tutkitaan mahdollisuutta optimoida pakastusprosessia asentamalla kylmävarasto osaksi jäähdytysjärjestelmää. Tutkimus toteutetaan teoreettisesti olemassa olevan jäähdytyskoneen tietoja hyödyntäen. Tulosten perusteella analysoidaan kylmävaraston rakentamisen kannattavuutta. Opinnäytetyössä selvitetään vaihtoehtoisia varastointimenetelmiä, niiden toimintaa ja kannattavuutta. Työssä syvennyttään viiteen eri teknologiaan ja otetaan huomioon niiden soveltuvuus ja investointikustannukset. Tarkasteluun valitaan sähköakku, massavaraaja, faasimuutosmateriaalit, absorptiojäähdytin ja nestemäisen ilman energiavarasto. Kustannustarkastelua varten selvitetään valmistajien edustajilta investointikustannuksia. Kerätyn tiedon perusteella laaditaan vertailutaulukko.

Opinnäytetyön taustalla on hanke, jonka tavoitteena on kalan pakastuksen kannattavuuden parantaminen. Kalanjalostuslaitoksessa suuri määrä kalaa pakastetaan lyhyessä ajassa, mikä tuottaa sähkön korkean kysynnän. Pakastus ajoittuu aamupäivään, jolloin sähkön hinta on korkeimmillaan. Pakastus aiheuttaa kannattamattomuutta erityisesti halvemmalle kalatuotteelle. Tämä luo tarpeen selvittää mahdollisia tapoja siirtää energiankäyttö yöaikaan tapahtuvaksi. Energiavaraston lataus- ja purku-aika on kuusi tuntia. Jäähdytystarpeen kasvaessa varastoitua energiaa voidaan käyttää kalan pakastamiseen. Työssä tarkastellaan energian varastointia -40°C :n lämpötilassa.

2 Kylmäprosessi

Kylmäprosessi perustuu kylmäaineen kiertoon koneistossa, jonka aikana aine höyrystyy ja lauhtuu sekä muuttaa olomuotoonsa nesteen ja kaasun välillä. Kylmäaineen avulla lämpöenergiaa siirretään matalammasta lämpötilasta korkeampaan lämpötilaan. Höyrystimessä oleva kylmäaine höyrystyy ympäristöä matalammassa lämpötilassa. Höyrystynyt kylmäaine kulkeutuu kompressoriin, jossa kaasu puristuu ja paine sekä lämpötila nousevat. Tulistettu höyry kulkeutuu paineputkea pitkin lauhduttimeen, jossa kylmäainehöyry lauhtuu takaisin nesteeksi ympäristöä korkeammassa lämpötilassa luovuttaen lämpöä. Kylmäaine siirtyy paisuntalaitteelle, jossa nestemäinen kylmäaine muuttuu nestehöyryksi ja paine ja lämpötila laskevat. Höyrystimelle saavuttaessa kylmäaine höyrystyy ja kiertoprosessi alkaa uudelleen. (Kaappola et al. 2012.) Kylmäprosessi esitetään kuvassa 1.



Kuva 1. Kylmäprosessin kuvaus.

2.1 Kylmäaineet

Kylmäaineet ovat nesteytettyjä kaasuja, joita käytetään väliaineina lämmönsiirtämiseen kylmäkoneistoissa. Ne muuttavat olomuotoa nesteestä kaasuksi absorboimalla lämpöä ympäristöstään tai kaasusta nesteeksi luovuttaessaan lämpöä. (Kianta 2013.) Kylmäaineet voidaan jakaa yksikomponenttisiin-, atseotrooppisiin- ja tseotrooppisiin kylmäaineisiin. Yksikomponenttinen kylmäaine muodostuu nimensä mukaisesti vain yhdestä aineesta, jonka höyrystyminen ja lauhtuminen tapahtuvat vakio- lämpötilassa. Atseotrooppisella kylmäaineella tarkoitetaan kahden tai useamman yksikomponenttisen kylmäaineen seosta. Höyrystyminen ja lauhtuminen tapahtuvat atseotrooppisella kylmäaineella myös vakio- lämpötilassa. Tseotrooppinen kylmäaine eroaa atseotrooppisesta siten, että höyrystymisen ja lauhtumisen yhteydessä tapahtuu lämpötilan muutos vakio- lämpötilan sijaan. Tähän vaikuttaa seoskylmäaineiden komponenttien erisuuruiset höyrystymislämpötilat. (Kaappola et al. 2012, 21.)

Kylmäaine valitaan käyttökohteen mukaisesti ja valintaa tehtäessä otetaan huomioon sen termodynaamiset, kemialliset ja fysiologiset ominaisuudet. Kylmäaineen toivottavat ominaisuudet esitetään taulukossa 1. Kaikilla kylmäaineilla on omat haittapuolensa, ja mikään kylmäaine ei kata jokaista hyvää ominaisuutta.

Taulukko 1. Kylmäaineen toivottavat ominaisuudet. (Kaappola et al. 2012.)

Termodynaamiset	Kemialliset	Fysiologiset
Suuri höyrystymislämpö	Stabiilius	Myrkyttömyys
Pieni viskositeetti	Palamattomuus	Vuodot helppo havaita
Hyvät lämmönsiirto- ominaisuudet	Ei- aktiivinen reagointikyky	Vähäinen ärsyttävyys iholla

Valintaan vaikuttaa myös kylmäaineen ympäristövaikutukset ja kustannustehokkuus. Ympäristövaikutuksia merkitään ODP- ja GWP-luvuilla. Mitä suurempia luvut ovat, sitä suuremmat ympäristöhaitat kylmäaineella on. Luonnossa esiintyvät kylmäaineet eivät ole haitallisia ilmakehän otsonikerrokselle, ja niiden kasvihuonehaitallisuus on minimaalinen. Luonnollisiin kylmäaineisiin lukeutuu muun muassa ammoniakki, hiilidioksidi ja puhtaat hiilivedyt. (Kaappola et al. 2012, 32–35.)

2.2 Pakastusprosessi kalanjalostuslaitoksessa

Laadun säilymiseksi kala vaatii alhaisen lämpötilan koko kylmäketjussa kulkemansa ajan. Kalojen pyynnin jälkeen kalat laitetaan RSW-säiliöön, jossa ne jäähdytetään alhaiseen lämpötilaan $-0,5^{\circ}\text{C}$ – 2°C välille. RSW-säiliöt asennetaan kalastusaluksiin, troolareihin. RSW on yleinen menetelmä suurten kalamäärien nopeaan jäähdyttämiseen ja niiden toiminta perustuu jäähdytettyyn meriveteen. Mitä nopeammin kala saavuttaa pakastuslämpötilan, sitä parempaa on kalan laatu. (Söylemez et al. 2022)

RSW-järjestelmässä merivettä kierrätetään pumppujen avulla säiliöiden ja jäähdytysjärjestelmän läpi. Ennen säiliöihin tuloa vesi jäähdytetään kylmäkoneistolla. Jäähtynyt merivesi kulkee ylöspäin säiliön ja kalojen läpi pitäen kalan puolikelluvana ja samalla jäähdyttäen sitä. Järjestelmässä voidaan käyttää kylmäaineena esimerkiksi ammoniakkia sen matalan höyrystyslämpötilansa vuoksi. Säiliöt eristetään kunnolla lämmön pääsyn rajoittamiseksi. (Heinen & Hopman nd.)

Levypakastus on tehokas pakastusmenetelmä kalan jäähdytyksessä. Kala asetetaan levyjen väliin ja metallilevyissä kiertävä nestemäinen kylmäaine absorboi lämmön tuotteesta. Tässä käyttökohteessa kylmäaineena toimii ammoniakki, jolla tuotetaan -40°C lämpötilataso. Levypakastimella on suhteellisen lyhyt jäätymisaika. (Verpe 2018.) Alhainen lämpötila lyhentää kalan jäätymisaikaa, mutta se myös alentaa järjestelmän tehokkuutta. (Verpe et al. 2019.)

3 Ammoniakki (NH₃)

Jo 1900-luvun alkupuolella kylmlaitteissa käytettiin kylmäaineina yleisimmin ammoniakkia (NH₃), hiilidioksidia (CO₂) ja rikkidioksidia (SO₂). Käytössä ilmeni, että ne ovat myrkyllisiä ja helposti syttyviä, joten kehitettiin CFC-yhdisteitä korvaamaan luonnolliset kylmäaineet. CFC-yhdisteet yleistyivät 1960- ja 1970-luvuilla, mutta CFC-yhdisteiden käyttöä rajoitettiin, koska huomattiin niiden tuhoavan otsonikerrosta. (Oinonen & Soimakallio 2001.) Ilmakehän otsonikerrosta haittaamaton kylmäaine ei saa sisältää klooria (Cl) eikä bromia (Br). (Aittomäki 2012, 107–109)

Teollisuudessa ammoniakki on yksi vanhimmista kylmäaineista, ja sitä käytetään edelleen useissa jäähdytyssovelluksissa, varsinkin suurissa järjestelmissä sen hyvien termodynaamisten ominaisuuksiensa vuoksi. Ammoniakilla on korkea höyrystymisentalpia sekä hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet ja se on hinnaltaan lisäksi kustannustehokas. Kylmäaineena se soveltuu käytettäväksi sekä kylmä- että pakastevarastojen lämpötiloissa. (Oinonen & Soimakallio 2001.)

3.1 Ammoniakki kylmäaineena

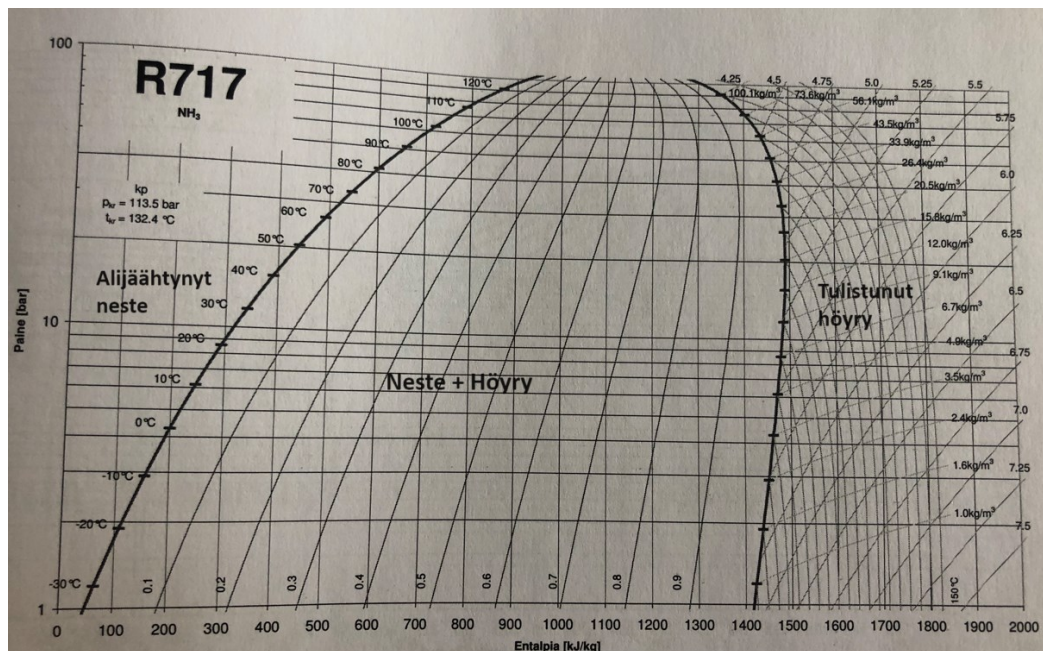
Ammoniakkia voidaan käyttää pakastusta vaativissa kohteissa, koska se soveltuu alle 0°C höyrystymislämpötiloille. Taulukossa 2 esitetään ammoniakkin sulamis- ja kiehumispiste.

Taulukko 2. Ammoniakin ominaisuudet.

Molekyylikaava	NH ₃
Moolimassa [g/mol]	17,03
Sulamispiste [°C]	-78
Kiehumispiste [°C]	-33

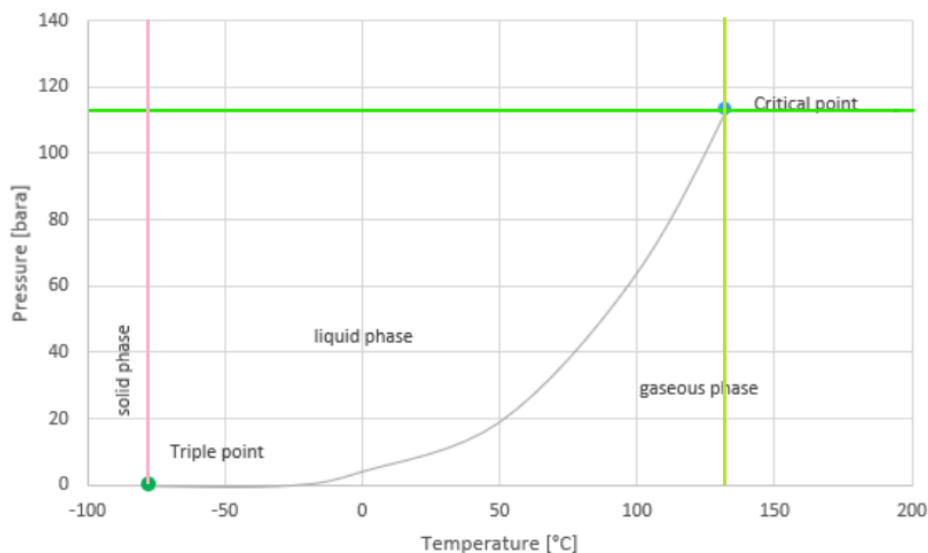
Ammoniakista käytetään R717 kylmäainenumeroa jäähdytysprosesseissa. Epäorgaanisilla yhdisteillä tunnuksen loppuosa muodostuu aineen moolimassan arvosta. Epäorgaaniset yhdisteet muodostuvat yhdestä aineesta. Ammoniakin sekä ODP- että GWP-luku on nolla, joten sen ympäristövaikutukset ovat vähäiset.

Kylmätekniinen kiertoprosessi esitetään kaikille kylmäaineille paine- entalpia-tilapiirroksen avulla. Piirrosta kutsutaan yleisesti log p,h- tilapiirroksiksi. Pystysuoralla akselilla kuvataan paine ja vaakasuoralla akselilla entalpia. (Kaappola et al. 2012.) Kuvassa 2 esitetään ammoniakin log p,h- tilapiirros, jossa vasemmalla puolella kylmäaine on alijäähtynyttä nestettä ja oikealla puolella tulistunutta höyryä. Alijäähtymisellä tarkoitetaan nesteen jäähtymistä alle höyrystyslämpötilansa kun taas tulistumisella tarkoitetaan höyryn lämpenemistä yli lauhtumislämpötilansa. Rajaviivojen keskelle jää kylläinen alue, jossa lauhtuminen ja höyrystyminen tapahtuvat. (Aittomäki 2012.)



Kuva 2. Ammoniakin log p,h- tilapiirros. (Kianta 2013, 21.)

Ammoniakilla on suhteellisen korkea kriittinen piste $132,4^{\circ}\text{C}$, $113,5\text{ bar}$. Kuvasta 3 nähdään, että rajakäyrien yhtymäkohdassa on niin kutsuttu kriittinen piste. Kriittisen pisteen yläpuolella neste- ja kaasufaasi ovat sulautuneet toisiinsa, eikä niiden välistä muutosta voi erottaa toisistaan. (Kianta 2013.)



Kuva 3. Ammoniakin faasidiagrammi. (muokattu Sariola 2020, 16.)

3.2 Ammoniakin haasteet käytössä

Ammoniakilla, samoin kuin muilla kylmäaineilla, on käyttöä rajoittavia tekijöitä. Ensinnäkin se on erittäin myrkyllistä ja tietyissä rajoissa syttyvä ja räjähdysherkkä aine (16–25 til.-%) ilman kanssa. (Oinonen & Soimakallio 2001.) Esimerkiksi happi, kulta ja hopea ovat vaarallisia ammoniakin kanssa, koska ne voivat muodostaa räjähtävän reaktion. Ammoniakkia on käytetty kylmäaineena jo yli 120 vuoden ajan, joten ammoniakin vaaroihin sekä kemikaalin käyttöön liittyvät turvallisuusvaatimukset tunnetaan hyvin. (Sariola 2020.)

Ammoniakki aiheuttaa syöpymistä tietyissä metalleissa, kuten alumiinissa ja kuparissa sekä niiden seoksissa. Tästä syystä kuparia ei voida käyttää laitteistomateriaalina esimerkiksi ammoniakkivesi-absorptiojäähdytysprosesseissa. Näissä prosesseissa käytetään rakennemateriaalina pääasiassa joko terästä tai ruostumatonta terästä.

Käytettäessä terästä useimpiin sovelluksiin tarvitaan korroosionestoaineita, koska ne muodostavat suojaavan oksidikerroksen metallin pinnalle. (Koljonen & Sipilä 1998.) Lisäksi alipaine on alle -34°C :n lämpötiloissa, joten etenkin suuriin laitoksiin tarvitaan automaattinen ilmanpoisto, jolla lauhduttimeen kerääntynyt ilma poistetaan tietyin väliajoin. (Aittomäki 2012, 119.)

Pienemmälle määrälle altistuessa (pitoisuudella 150–200 ppm) ammoniakki aiheuttaa ärsytystä hengitysteissä ja silmissä. Kohtalokkaat vaikutukset alkavat pitoisuudessa 2000–3000 ppm. (Aittomäki 2012, 117.) Ammoniakille on laadittu raja-arvot altistumisen ehkäisemiseksi, jotka ovat luettavissa taulukosta 3.

Taulukko 3. Altistumisen raja-arvot ammoniakille. (Linde 2020.)

HTP-arvot 8 h	20 ppm	14 mg/m^3
HTP-arvot 15 min	50 ppm	36 mg/m^3

Ammoniakkivuodon sattuessa lyhytaikainenkin altistuminen ammoniakkihöyrylle voi johtaa jopa kuolemaan tietyn rajan ylimenevässä pitoisuudessa (yli 5000 ppm). Ammoniakki on kuitenkin erittäin voimakkaanhajuinen, ja sen pystyy haistamaan jo 5 ppm:n pitoisuuksilla. (Kaappola et al. 2012.)

4 Kylmäenergian varastointi

Kylmäenergian varastointi (Cold Thermal Energy Storage, CTES) on prosessi, joka mahdollistaa energian säästämisen ja kysyntäjouaston tehostamisen. Kylmävaraston käyttöönoton tarkoituksena on vähentää jäähdytysenergian kysynnän ja tarjonnan välistä epätasapainoa. (Verpe 2018.)

Sähkön hintojen vaihdellessa huomattavasti vuorokauden aikana on kannattavaa tuottaa kylmäenergiaa yöllä ja käyttää varastoitua energiaa jäähdytykseen päivällä. Jotkut prosessit pystyvät varastoimaan kaiken tarvittavan energian yön aikana, jotta päivä sähköä ei tarvitse käyttää jäähdytykseen. (Verpe 2018.) Mitä suurempi ero matalan ja korkean lämpötilan välillä on, sitä enemmän sähköä tarvitaan saman lämpö määrän siirtämiseen. (Selvnes 2022.)

Energian varastointitekniikoiden uskotaan yleistyvän tulevina vuosina. Vielä energiavarastoiden kehitys on ollut hidasta, ja niiden kasvussa on eroavaisuuksia maiden välillä. Nopein kehitys on tapahtunut kiinteistökohtaisessa energian varastoinnissa. (Remes 2020.) Olemassa olevia energian varastointitekniikoita ovat esimerkiksi akut, varaajat ja erilaiset aineet, joihin sidotaan energiaa. Suurimpana esteenä kylmävarastoinnin nopealle kasvulle ovat järjestelmien investointikustannukset, sillä varastointimenetelmät ovat edelleen liian kalliita suhteessa niistä saavutettavaan hyötyyn.

Varastointisykli koostuu energian latauksesta, varastoinnista ja purkauksesta. Kylmäenergiaa varastoidaan yleensä vuorokausisyklisesti, joten kylmävarastot luokitellaan lyhytaikaiseen energian varastointiin. (Alanen et al. 2003.) Materiaalit, joiden faasimuutoslämpötilat ovat välillä -40°C - -60°C , ovat merkittäviä tämän tutkimuksen kannalta.

4.1 Sähköakku

Akku on laite, joka varastoi sähköenergiaa kemiallisessa muodossa. Akkujen toiminta perustuu elektronien virtaukseen anodilta katodille muodostaen samalla sähkövirran. Energiamurroksen edetessä akkuenergiavarastojen rooli on tullut yhä keskeisemmäksi energiasektorilla. Tekniikan yleistymisen myötä akkujen hinnat ovat laskeneet vuosikymmenen aikana. (Motiva 2020.)

Kulutushuippuja voidaan tasoittaa akkujen avulla, joihin varastoidaan sähköenergiaa, kun kulutus on pienempää ja tuotanto halvempaa.

Akkuenergiavarastoa voidaan tarvittaessa myös käyttää sähköverkon taajuussäätöön, kysyntäjoustoon ja tasesähkömarkkinoilla.

Kalanjalostuslaitoksessa energiamäärä yhdessä syklissä on 9 MWh. Taulukosta 4 käy ilmi, että energiavaraston hinta on noin 2,5 miljoonan euron luokkaa sisältäen akkukontit, invertterit, muuntajat, apumuuntajat, EMS-järjestelmä, käyttöönotto ja käyttöopastus. (Yksityinen tiedonanto, Business Unit Manager)

Taulukko 4. Sähköakun tiedot.

Energiamäärä [MWh]	9
Investointikustannus [€]	2 500 000

Sähköakku on kallis investointi, joten tässä selvityksessä sähköakun hankinta ei tule pakastuslaitokselle kannattavaksi, jos sitä ei pystytä hyödyntämään millään muulla tavoin kuin kylmävarastona. Laskelmat esitetään luvussa 5.4. Asiakas pysyy opinnäytetyössä salaisena, joten osa tutkimukseen liittyvistä asioista ovat salattuja.

4.2 Massavaraaja

Massavaraajan fyysinen toimintaperiaate perustuu siihen, että latausjakson aikana jäädytetään säiliössä olevaa ainetta halvan sähkön aikaan. Varastoitu energia vapautetaan aamupäivällä kalan pakastamista varten. Yleensä

kalanjalostuslaitoksissa pakastaminen alkaa aamulla ja kestää koko aamupäivän eli juuri sähkön hinnan ollessa korkeimmillaan. Varaaja on yksinkertainen varastointitapa, joka on helposti toteutettavissa eri käyttökohteissa. Aineena voidaan käyttää ainoastaan pakkasta kestävää liuosta. Taulukossa 5 esitetään liuosten osalta varaajan ominaisuudet. Aineeksi valitaan etyleeniglykoli, koska se soveltuu hyvin pakastustason lämpötiloille ja on hinnaltaan suhteellisen edullinen. Vertailun perusteella valitaan toiseksi aineeksi ammoniakkivesi, jolla on korkeampi ominaislämpökapasiteetti eli se pystyy sitomaan suuremman määrän energiaa.

Taulukko 5. Varaajan tiedot.

	Etyleeniglykoli	Ammoniakkivesi
Jäätymispiste [°C]	-50	-50
Pitoisuus [til-%]	56,3	30,0
Pitoisuus [p-%]	59,8	23,7
Kylmäteho [kW]	1500	1500
Ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg·K]	2,68	4,34
Tilavuus [m ³]	2430	1500
Lämpötilaero [K]	5	5
Aika [h]	6	6
Korkeus [m]	31	19
Energia [kWh]	9000	9000
Kustannus [€/l]	1,4	

Tulosten perusteella molemmissa tapauksissa säiliön tilavuus on aivan liian suuri, joten niiden rakentaminen ei ole mahdollista toteuttaa tässä mittakaavassa. Jotta tällainen varaaja pystytään rakentamaan, tarvitsee olla moninkertaisesti enemmän pinta-alaa käytettävissä. Säiliöiden yksi suurimmista ongelmista on niiden tilantarve. Vaikka NH₃-H₂O sitoo enemmän energiaa verrattuna glykoliin ja säiliön kokoa saadaan pienemmäksi, tilavuus ei muutu riittävästi, jotta se olisi teknisesti toteutettavissa.

4.3 Faasimuutosmateriaalit

Faasimuutosmateriaalit (Phase Change Materials, PCM) hyödyntävät latenttilämpöä energian varastoinnissa, ja niiden toiminta perustuu olomuodon muutokseen. Faasimuutos tapahtuu useimmiten nesteestä kiinteäksi tai vastaavasti kiinteästä nesteeksi, jonka aikana aine luovuttaa tai sitoo suuren määrän energiaa. (Selvnes et al. 2021.) Materiaalin faasimuutoksen energian varastointikyky voidaan laskea kaavalla 1.

$$Q = m \left[\int_{T_A}^{T_D} C_{ps}(T) dT + L + \int_{T_E}^{T_F} C_{pl}(T) dT \right] \quad (1)$$

Kaava 1. Faasimuutokseen varastoitava lämpömäärä. (Regin et al. 2008.)

Jossa:

Q = varastoitava lämpömäärä faasimuutosmateriaalissa

m = materiaalin massa

C_{ps} = lämpökapasiteetti kiinteässä tilassa

C_{pl} = lämpökapasiteetti sulassa tilassa

L = sulamiseen kulunut lämpö

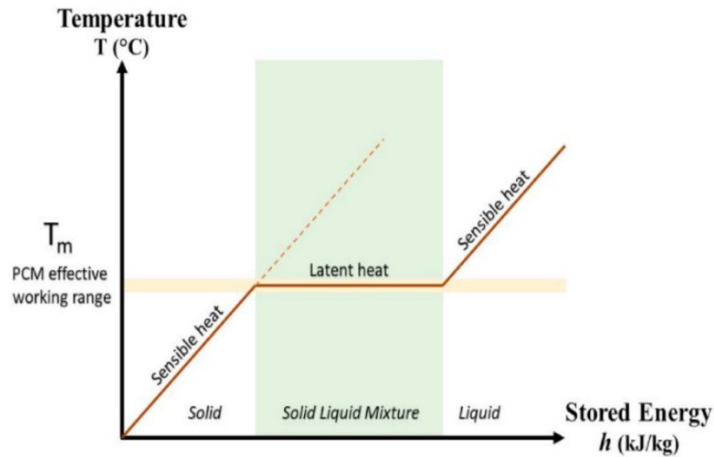
T_A = lämpötila lämmityksen alkaessa

T_D = materiaalin sulamislämpötila

T_F = lämpötila sulamisen jälkeen

T_E = lämpötila lämmönsiirron päättyessä

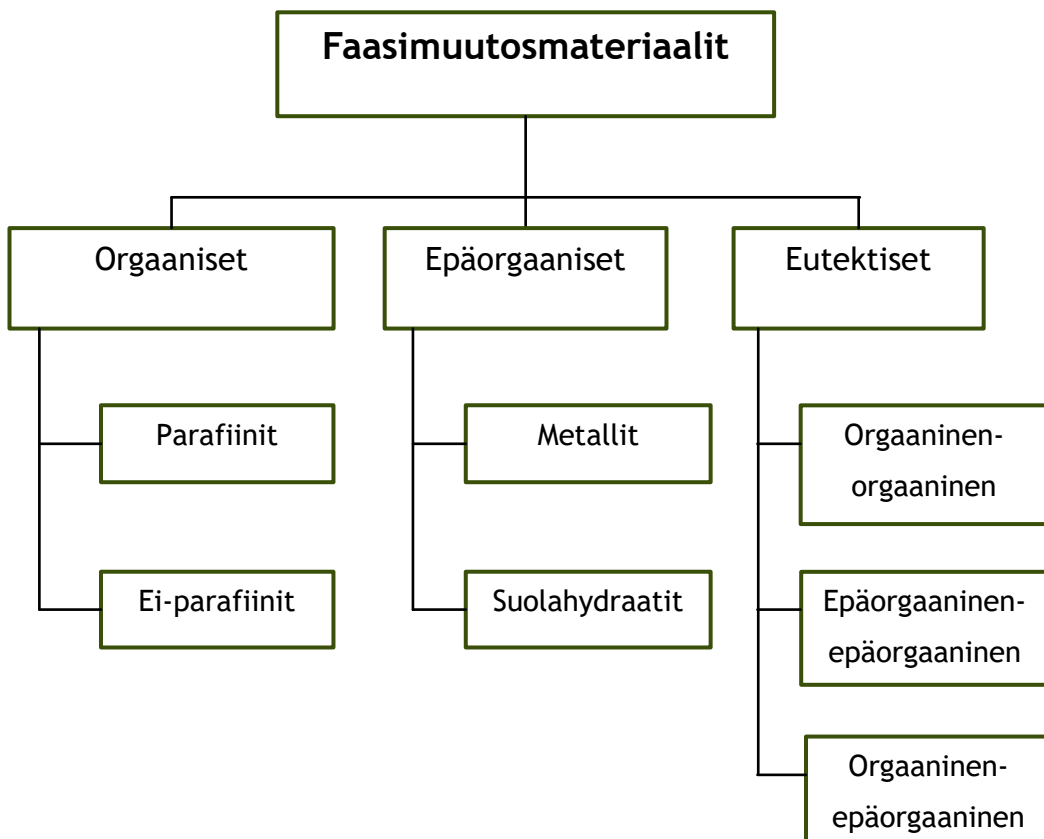
PCM:n tärkein etu jäähdytysjärjestelmissä on niiden mahdollisuus varastoida ja vapauttaa lämpöenergiaa vakio­lämpötilassa. (Kushwah et al. 2020.) Kuvasta 4 käy ilmi, miten latenttilämpöön perustuva varastointi tapahtuu vakio­lämpötilassa.



Kuva 4. Tuntuvan lämmön ja latenttilämmön ero. (Kushwah et al. 2020, 82)

Faasimuutosmateriaalit voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan niiden kemiallisen koostumuksen mukaan: orgaanisiin, epäorgaanisiin ja eutektisiin materiaaleihin, kuten taulukossa 6 esitetään.

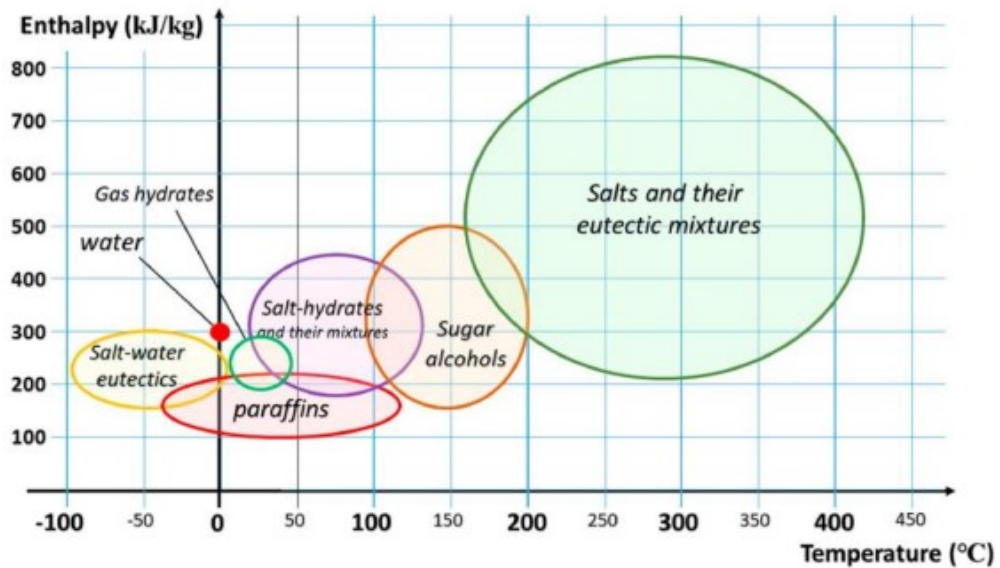
Taulukko 6. Faasimuutosmateriaalien luokittelu. (mukaillen Laitinen et al. 2016.)



Orgaaniset materiaalit voidaan edelleen luokitella parafiini- ja ei-parafiiniyhdisteisiin. Ei-parafiineihin lukeutuu muun muassa alkoholit ja rasvahapot. Epäorgaaniset materiaalit jaetaan suolahydraatteihin ja metalleihin. (Selvnes et al. 2021.) Alle nollan lämpötilan (sub-zero) PCM:t ovat joko yksikomponenttisia tai koostuvat kahden tai useamman materiaalin seoksesta. Eutektiset seokset määritellään komponenttien seokseksi. Orgaaniseen aineeseen voidaan sekoittaa jotain epäorgaanista ainetta, jolloin ne soveltuvat paremmin eri sovelluksiin. Esimerkiksi suolaveden eutektinen seos tuotetaan liuottamalla suoloja veteen liuoksen muodostamiseksi. Suolaveden eutektisessä koostumuksessa on 27 % natriumkloridia (NaCl) liuotettuna veteen, jonka ansiosta jäätymislämpötila on $-21,1^{\circ}\text{C}$. Pienemmät suolapitoisuudet vedessä johtaisivat korkeampaan jäätymislämpötilaan. Pakastustason faasimuutoslämpötilat ovat hyödyllisiä sovelluksissa, joissa vaaditaan normaalia kylmempiä lämpötiloja. (IRENA 2020, 59.)

4.3.1 Faasimuutoslämpötilat

Faasimuutosmateriaaliryhmillä on eri toiminta-alueet, ja niiden sulamisentalpiat ja faasimuutoslämpötilat vaihtelevat huomattavasti (kuva 5). Käyttökohteen mukaan valitaan sopiva faasimuutosmateriaali. Tyypillisesti epäorgaanisilla materiaaleilla on korkeampi lämmönjohtokyky ja suurempi lämmönvarastointikapasiteetti kuin orgaanisilla materiaaleilla. (Selvnes et al. 2021.)



Kuva 5. PCM-ryhmien faasimuutoslämpötilat ja sulamisentalpiat. (Kushwah et al. 2020, 85.)

Faasimuutosmateriaalit ovat edistäneet lämpö- ja kylmävarastointiteknologian kehitystä, mutta tekniikan käyttö eri sovelluksissa vaatii vielä tutkimusta ja kehittämistä. (Ailanen et al. 2003.) Matalassa lämpötilassa toimivien faasimuutosmateriaalien saatavuus on rajallista. Myöskään niiden hinta suhteessa saatuun käyttökustannussäästöön ei ole ollut riittävä.

Vesi on hyvä energian varastointiaine sen korkean ominaislämpökapasiteetin ($4,19 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$) ja ominaissulamislämmön (333 kJ/kg) vuoksi. Lisäksi se on yksinkertainen, halpa ja helposti saatavilla oleva tuote. Kuitenkin veden toiminta-alue $0\text{--}100^\circ\text{C}$, rajoittaa sen käyttöä useissa käyttökohteissa. Vesi ei sovellu pakastustason lämpötila-alueille, mutta on mahdollista päästä alle 0°C sekoittamalla veteen esimerkiksi suolaa tai glykolia. Suola alentaa veden jäätymispistettä. (Selvnes 2017.)

Jotta pystytään tuottamaan -40°C , tarvitsee selvittää tuote, jolla on käyttökohteeseen soveltuva faasimuutoslämpötila. Lämpötilaerona käytetään 5K , koska pakastamon koneet eivät pysty tuottamaan kylmempää. Taulukossa 7 on luettelo kaupallisesti saatavilla olevista faasimuutosmateriaaleista, jotka kestävät kylmävaraston vaaditun lämpötilan. Faasimuutosmateriaalien

valmistajia ovat esimerkiksi PCM Products, Rubitherm, PureTemp LLC ja Axiotherm. PCM products valmistaa PlusICE Eutectic -materiaaleja, joita on saatavilla 0°C - -74°C lämpötiloille. (PCM Products Ltd 2021.)

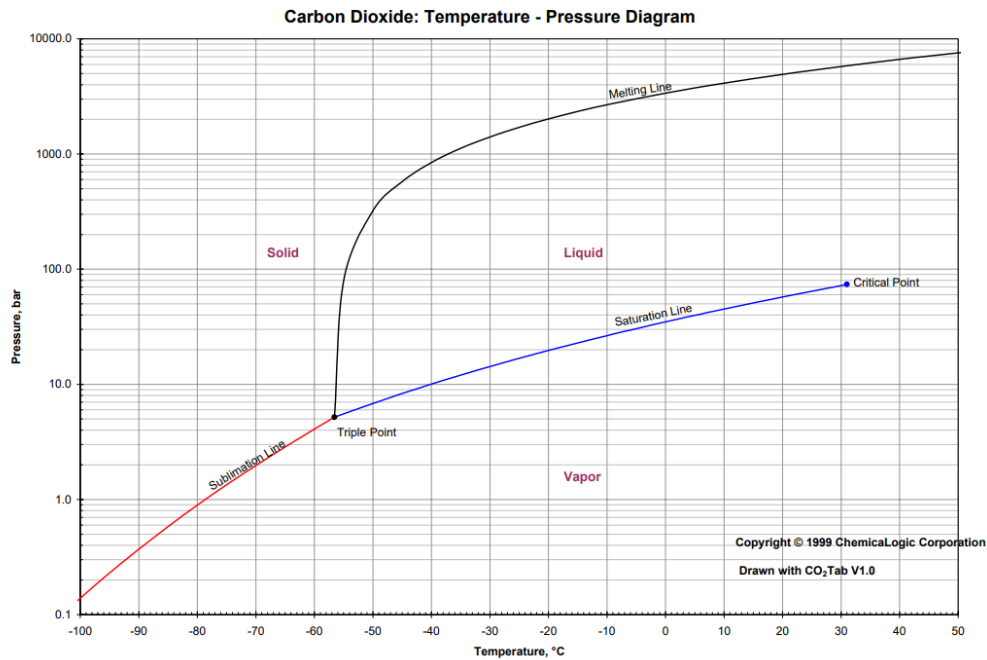
Taulukko 7. Kaupallisesti saatavilla olevat materiaalit.

PCM	Sulamislämpö °C	Latenttilämpö kJ/kg	Ominaislämpö- kapasiteetti kJ/kg·K	Valmistaja
E-65	-65	240	3,15	PCM Products
HS65N	-65	172	-	PLUSS
ATS-63	-63	190	3,00	Axiotherm
SP-50	-52 - -48	190	2,00	Rubitherm
RE-50	-52 - -48	180	2,00	RuhrTech
-50G	-50	-	-	va-Q-tec
ATS-50	-50	220	3,00	Axiotherm
E-50	-50	175	3,28	PCM Products
E-48	-48	202	3,28	PCM Products
ATS-40	-40	180	3,00	Axiotherm
E-37	-37	225	3,15	PCM Products
PureTemp -37	-37	145	1,99	PureTemp LLC

4.3.2 Hiilidioksidin käyttö faasimuutosmateriaalina

Varastoitaessa energiaa matalaan lämpötilaan, voidaan valita PCM:ksi myös luonnollinen aine CO₂, jolla on korkea sulamislämpö (340 kJ/kg) sekä korkea varastointitiheys (400 MJ/m³). Hiilidioksidi on myös hinnaltaan

kustannustehokas. Sitä käytettäessä kuitenkin pitää välttää liian alhaista painetta, koska se tarkoittaa, että kompressorin kapasiteetti on suurempi kuin lämpökuorma, ja saattaa tuottaa kiinteää hiilidioksidia vastaanottimeen sekä jäähdyttimeen. (Verpe 2018.) CO₂ sublimoituu ja haihtuu kuvan 6 mukaisilla paine- ja lämpötilatasoilla. Hiilidioksidin kriittinen piste on 31,0°C, 73,8 bar ja kolmoispiste on -56,6°C, 5,2 bar.



Kuva 6. Hiilidioksidin kolmoispiste. (Verpe 2018.)

4.3.3 Kuivajää

Kuivajäätä käytetään jäähdytykseen eri käyttökohteissa, yleisimmin lihan ja elintarvikkeiden jäähdyttämiseen kuljetuksen aikana. Se on kiinteää hiilidioksidia ja sillä on erittäin alhainen lämpötila, -78°C. (Linde nd.) Käytettäessä kuivajäätä faasimuutosmateriaalina sublimoituminen tapahtuu, kun lämpötila on kolmoispisteen alapuolella. Kuivajään lämpötilan noustessa se sublimoituu eli muuttuu suoraan kiinteästä kaasuksi ilman nestemäistä välitilaa eikä höyrystymistä ja lauhtumista näin ollen voi tapahtua. (Verpe 2018.)

Kuivajään käyttöä faasimuutosmateriaalina on teknisesti tutkittu liian vähän saavuttaakseen suosiota kaupallisella tasolla. Hiilidioksidin käyttöön liittyviä haasteita on tunnistettava ja ratkaistava ennen kuin tekniikan laaja käyttöönotto voi tapahtua. Tarvitaan lisää tutkimusta erityisesti hiilidioksidin käyttäytymisestä faasimuutoksen aikana. (Hafner et al. 2011.)

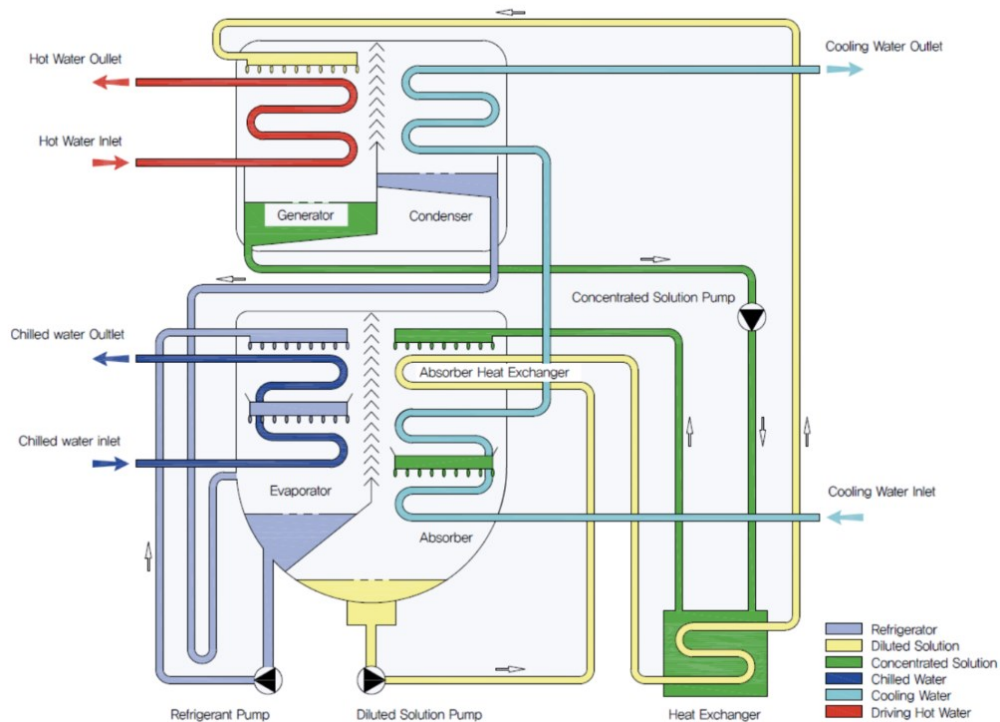
4.4 Absorptiojäähdytin

Sorptioprosessit ovat olleet 1800-luvun loppupuolelta asti käytössä teollisuudessa. Sorptioprosesseihin lukeutuvat absorptio-, adsorptio- ja desorptiojäähdytysprosessi. Absorptiolaitteissa kaasumainen kylmäaine liukenee nesteeksi ja adsorptiolaitteissa kylmäaineen imeytymisenä toimii kiinteä aine. (Oinonen & Soimakallio 2001.) Tässä opinnäytetyössä käsitellään tarkemmin absorptiojäähdytintä ja sen toimintaa.

Jäähdytysaineen valinta tehdään käyttökohteen mukaisesti. Tyypillisimmät työaineparit absorptiojäähdytysprosessissa ovat ammoniakkivesi ja vesi-litiumbromidi. (Lin 2019.) Vesi-litiumbromidin käyttö luo haasteita jäähdytysjärjestelmissä, koska sitä käyttävällä prosessilla saavutetaan vain 5°C jäähdytyslämpötila. (Oinonen & Soimakallio 2001.) Käyttökohteeseen kylmäainepariksi soveltuu ammoniakkivesi, koska sen ominaisuudet mahdollistavat alhaisen höyrystyslämpötilan, ja näin ollen se soveltuu hyvin pakastuslaitoksiin.

Absorptiojäähdyttimen toiminta perustuu työaineparin kiertoon laitteessa ja näiden väliseen absorptioon. Toimintaperiaate esitetään kuvassa 7. Absorptiojäähdyttimet hyödyntävät laitteiston käyttöenergiana muiden prosessien hukkalämpöä ja tämä on yksi niiden tärkeimmistä eduista. Ne eivät lisää laitoksen huippukulutusta, koska niissä ei ole sähkökompressoreita. Järjestelmän pääkomponentit ovat kompressorin sijaan kehitin, lauhdutin, höyrystin, imeytin ja lämmönvaihdin. Arvioitaessa absorptiojäähdyttimen soveltuvuutta on otettava huomioon, että ne tarvitsevat suuren ja tasaisen hukkalämpövirran toimiakseen. (Lin 2019.)

SINGLE EFFECT HOT WATER DRIVEN ABSORPTION CHILLER



Kuva 7. Absorptiojäähdyttimen toimintaperiaate. (Lin 2019.)

Absorptiojäähdytin jäähdyttää vettä äkillisen paineen muutoksen kautta. Ammoniakki ja vesi sekoittuvat imeytimessä ja liuotessa vapautuu lämpöä. Paineen nousun myötä liuos siirtyy lämmönvaihtimeen, joka lämmittää liuosta. Työaineparin erottaminen tapahtuu keittimessä ulkoisen lämmönlähteen avulla. Keittimessä ilmanpaine on korkea. (Oinonen & Soimakallio 2001.) Putkea pitkin höyry kulkeutuu höyrystimeen, jossa ilmanpaine on alhainen. Sitten höyry jäähtyy ja muuttuu välittömästi kylmäksi vedeksi. (Lin 2019.)

Suuren energiatihedyyden ja pienten lämpöhäviöiden ansiosta absorptiojäähdyttimessä on mahdollista varastoida kylmäenergiaa jäähdyttämiseen sekä lyhyitä että pitkiä ajanjaksoja. (IRENA 2020, 26.)

Absorptiojäähdyttimen käyttökustannukset muodostuvat pääosin lämmön tuotannon kustannuksista. Käytettäessä käyttölämpönä hukkalämpöä on absorptioprosessi halpa tuotantotapa jäähdytykselle. Jotta absorptiojäähdyttimen hyödyntäminen tässä käyttökohteessa olisi kannattavaa,

täytyy olla ilmaista tai vähintään edullista lämpöenergiaa saatavilla.
Absorptiojäähdyttimelle COP saadaan kaavalla 2.

$$COP = \frac{Q_e}{Q_g + P_{sähkö}} \quad (2)$$

Kaava 2. Lämpökertoimen laskenta.

Jossa:

Q_e = Höyrystimestä saatava jäähdytys

Q_g = Keittimeen kuljetettu lämpö

$P_{sähkö}$ = Jäähdyttimen tarvitsema sähkö

4.4.1 Ammoniakkivesi

Ammoniakkivesi on tyypillisin työainepari absorptiojäähdyttimissä, jotka vaativat alhaisen höyrystymislämpötilan. Ammoniakkivesi-absorptiojäähdyttimissä on suuret paine-erot, ja ne toimivat korkeissa paineissa. Ammoniakilla ja vedellä on suhteellisen pieni höyrystymislämpötilojen ero, minkä vuoksi vettä kulkeutuu pienissä määrin keittimeltä höyrystimeen. Veden kasaantuminen höyrystimessä kasvattaa kiehumispistettä. Tämän välttämiseksi tehdään ammoniakkihöyryn rektifikaatio eli tislauk ja näin ollen saadaan puhdasta ammoniakkia.

Jäähdytysaineen ja liuottimen höyrystymislämpötilojen erona suositellaan 200-300K, ammoniakilla ja vedellä ero on vain 133K. (Koljonen & Sipilä 1998.)

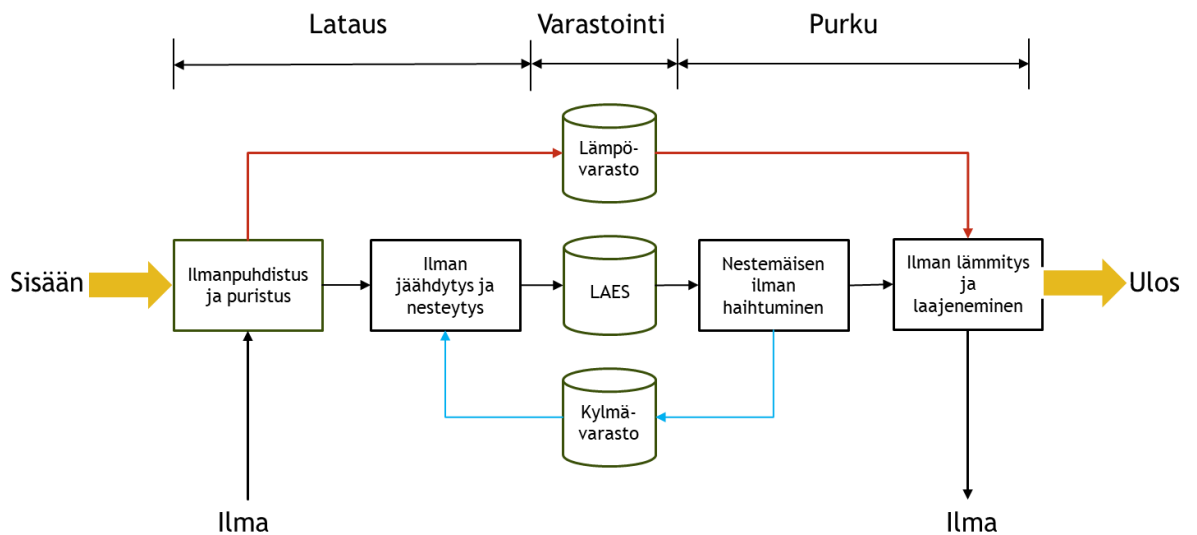
4.5 Nestemäisen ilman energiavarasto

Nestemäisen ilman energiavarastointi (engl. Liquid Air Energy Storage, LAES) on prosessi, jossa sähköä varastoidaan nestemäisen ilman muodossa

kryogeenisissä lämpötiloissa – alle -150°C . LAES-prosessissa hyödynnetään uusiutuvia energianlähteitä tai huippukulutuksen ulkopuolella tuotettua energiaa. Varastointi tapahtuu jäähdyttämällä ilmaa -190°C lämpötilaan, jolloin aine muuttuu nesteeksi, joka varastoidaan säiliöön. Energian vapautumiseksi nestemäinen ilma lämmitetään lämmönsiirtimillä lähelle ympäristön lämpötilaa, minkä seurauksena aine laajenee ja muuttuu jälleen kaasuksi. Höyrystynyt ilma kulkeutuu turbiiniin, joka puolestaan tuottaa sähköä. (Vecchi et al. 2021.)

Prosessi esitetään kuvassa 8.

LAES-prosessin katsotaan olevan potentiaalinen suuremman kokoluokan mittakaavoissa. Optimaalinen teho tällaiselle tekniikalle on vähintään 10 MW suuruusluokkaa. Tekniikan huonona puolena ilmenee alhainen kokonaishyötysuhde, joka on noin 50–60 %. (Borri et al. 2021.)



Kuva 8. Nestemäisen ilman varastointiprosessi. (mukaillen Vecchi et al. 2021.)

Highview Power yrityksen toimesta Iso-Britanniassa otettiin käyttöön järjestelmä, joka käyttää energiavarastoaineenaan nestemäistä ilmaa. Järjestelmän käyttöönoton tarkoituksena oli saada lisää tietoa LAES-tekniikasta ja sen soveltuvuudesta. Nestemäinen ilma on 700 kertaa ympäristön ilmaa tiheämpää, joten suuren energiatihetyensä vuoksi säiliön kokoa saadaan

pienemmäksi. Tutkimusryhmän mukaan LAES-järjestelmän rakentamisen arvioidaan maksavan 300–600 €/kWh. (Bellini 2021.)

4.6 Muut menetelmät

Edeltävissä kappaleissa käsitellään kylmävarastoa osaksi jäähdytysjärjestelmää, ja sen mahdollisia vaikutuksia pakastuslaitoksen kannattavuuden parantamiseksi. Kylmävaraston lisäksi muita vaihtoehtoisia energiansäästöratkaisuita ovat hyötysuhteen tehostaminen, reservimarkkinat ja hiilidioksidilla toimiva jäähdytysjärjestelmä. Jos lauhdelämpöä on mahdollisuus hyödyntää jälkikäteen tai sille on löydettävissä asiakas, saadaan tuloja sitä kautta.

Hiilidioksidijärjestelmän käyttöönotto mahdollistaa alhaisemmat höyrystymislämpötilat ja nopeammat jäätymisajat verrattuna nykyiseen ammoniakki-jäähdytysjärjestelmään. Käytettäessä hiilidioksidia höyrystymislämpötilat -50°C asti ovat mahdollisia. Kuitenkin CO_2 alentaa järjestelmän tehokkuutta eli ammoniakki-järjestelmillä COP-arvo on korkeampi. (Verpe 2018.)

5 Tulokset

Opinnäytetyö toteutetaan teoreettisesti hyödyntäen olemassa olevan jäädytyskoneen tietoja sekä aikaisempaa kirjallisuutta aiheesta. Esiselvitys koskee pakastuslaitosta, jonka energiankäyttö on vuodessa noin 1000 MWh, energiamäärä yhdessä syklissä on 9 MWh ja laitos tarvitsee kylmätehoa 1,5 MW. Selvitystyössä osa tuloksiin liittyvistä asioista ovat salattuja.

Energiavarastojen investointikustannukset selvitetään tuotteiden valmistajilta, ja ne esitetään taulukossa 8.

Taulukko 8. Energiavarastojen investointikustannukset.

Energiavarasto	Investoinnin kokonaiskustannus (miljoonaa euroa)
Sähköakku	2,5
Massavaraaja (etyleeniglykoli)	3,4
PCM	2
Absorptiojäädytin	1,8
LAES	2,7–5,4

Faasimuutosvaraajan tilavuudeksi saadaan alle 200 m³, joten se on teknisesti järkevän kokoinen, ja säiliö itsessään ei ole kovin kallis hankinta (1000 €/m³). Tuotteen hinta kuitenkin maksaa noin 200 €/kWh, joten kokonaiskustannukseksi saadaan 1,8 M€. Faasimuutosvaraajien yleistymistä on odoteltu pitkään, mutta ainakaan toistaiseksi sitä ei ole vielä tapahtunut. PCM:n hinta suhteessa saavutettavaan käyttökustannussäästöön on liian alhaisella tasolla, joten niiden ei uskota saavuttavan suurta kasvua vielä lähivuosina. (Laitinen et al. 2016.)

Massavaraaja todetaan mahdottomaksi toteuttaa tähän käyttökohteeseen suuren tilavuutensa sekä korkean investointikustannuksensa vuoksi.

Etyleeniglykoli ei ole kovin kallista (1,4 €/l), mutta varastointiainetta vaaditaan erittäin runsas määrä säiliön suuren koon puolesta, joten sen hankinta ei ole kannattavaa.

Absorptiokone maksaa noin 1000 €/kW eli 1,5 M€ ja lämpövarasto 320 000 €. Investointikustannukseksi saadaan näille yhteensä yli 1,8 miljoonaa euroa eli todetaan prosessin tulevan liian kalliiksi tähän käyttökohteeseen. (kts. luku 5.4.)

5.1 Energiavarastojen tulevaisuuden kehitysnäkymät

Kehityksen myötä uskotaan järjestelmien tehokkuuden paranevan ja käyttöön liittyvien kustannusten alenevan tulevaisuudessa. Nestemäisen ilman energiavarastojen uskotaan seuraavien kymmenien vuosien aikana lisääntyvän kylmätekniikassa ja tarjoavan uusia sovellusmahdollisuuksia. (IRENA 2020, 27.) Taulukossa 9 esitetään vertailu vaihtoehtoisista energiavarastoista, jotta saadaan selkeämpi ja yksinkertaisempi kokonaiskuva teknologioiden kehitysnäkymästä.

Taulukko 9. Varastointitekniologioiden kehitysnäkymä. (IRENA 2020, 27.)

	PCM		Absorptio		LAES	
	2018	2030	2018	2030	2018	2030
Kustannus (USD/kWh)	58–230	45–185	12–150	12–120		
Hyötysuhde (%)	>90	>92	COP 0.6–0.8		50–60	
Energiatiheys (kWh/m ³)	30–92		180–310		78	
Käyttöikä (vuotta)	5–20	10–25	20	20–25	20–40	
Käyttölämpötila (°C)	-115 – +8	-150 – +8	5–30		-150	

5.2 Käyttökustannukset

Massavaraajan käyttökustannukset määrittyvät pumppauskustannuksista, jotka ovat minimaaliset. Absorptioprosessilla optimaalisiin hyöty saavutetaan, jos tuotetulle lämmölle on käyttöä tai vaihtoehtoisesti käyttölämpöä on ilmaiseksi saatavilla. Silloin laitteet tuottavat energiasäästöjä ja kasvattavat kokonaishyötysuhdetta. Sähköakkujen melko yleinen mitoitusikä on 15 vuotta. Faasimuutosmateriaalien osalta käyttökustannuksia ei suurelta osin synny. (Yksityinen tiedonanto, Business Unit Manager)

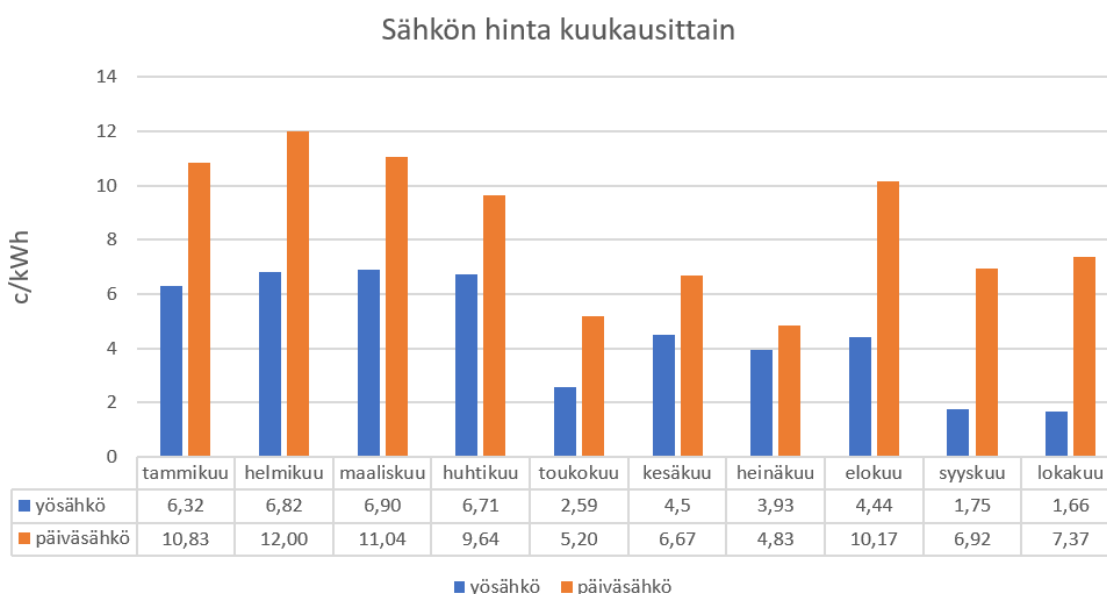
Vaihtoehtoisia ratkaisuja tarkasteltaessa sähköakku todetaan parhaaksi menetelmäksi pakastuslaitoksen energiavarastoksi. Sähköakku on kallis investointi, mutta sitä on mahdollista hyödyntää muutenkin kuin kylmävarastona. Jos sähköakkuun investoidaan, on mahdollista saada tuloja esimerkiksi myymällä ylimääräinen energia verkkoon eli osallistumalla sähkömarkkinoihin. Vaihtoehtona on myös osallistua säätö- ja reservimarkkinoihin ja tulojen saanti niiden kautta.

5.3 Sähkön hinta

Spot-markkinoilla kysyntä ja tarjonta määrittävät sähkön hinnan seuraavalle vuorokaudelle. Olkiluoto 3:n ydinvoimalalla on merkittävä rooli tulevissa sähkön hinnoissa. Mikäli tuotanto toimii ongelmitta, sähkön hinta pysyy maltillisena. OL3 poistuminen verkosta on hyvä esimerkki markkinariskien toteutumisesta. Vikatilanteissa on erittäin todennäköistä, että sähkön hinnassa esiintyy koviakin hintapiikkejä. Riskejä vastaan sähkönmyyjät suojautuvat ostamalla johdannaisia, kuten optioita, sähköfutuureja ja forwardoja. Johdannaismarkkinoiden periaatteena on luoda ennustettavuutta sähkömarkkinoilla. (Linna & Nuutinen 2012.) On kuitenkin otettava huomioon, että ennusteet muuttuvat lyhyessäkin ajassa huomattavasti. Tällä hetkellä markkinatilanne on epävakaata, minkä takia johdannaisten saatavuus on heikompaa ja vaihtelevuus suurempaa verrattuna aikaisempaan tilanteeseen. (Halvin sähkösopimus 2023.)

Tässä opinnäytetyössä käytetään vuoden 2023 tammikuun-lokakuun yö- ja päiväsähkön hintojen keskiarvoa, joka on luettavissa kuvioista 1.

Energiavaraston lataus- ja purkuaika on kuusi tuntia. Kuukausien sähkön hinnan keskiarvo lasketaan klo 00–06 ja 06–12 väliselle ajalle. Laskelmissa ei huomioida sähkön siirtomaksuja tai veroja, ainoastaan spot-hinta.



Kuvio 1. Sähkön hinta kuukausitasolla.

Tuloksista käy ilmi yösähkön olevan edullisempaa kuin päiväsähkön.

Siirrettäessä energiankäyttö yöaikaan tapahtuvaksi saadaan säästettyä jäähdytyskustannuksissa, ja saadaan kannattavuutta parannettua.

5.4 Mahdollinen saavutettava säästö

Selvitystyön kannalta haasteita luo sähkön hinnan jatkuva muuttuminen. On vaikeaa arvioida tarkasti, kuinka paljon kylmävarastolla saadaan säästöjä aikaan tulevaisuudessa. Taulukossa 10 lasketaan vuoden 2023 spot-hinta kerrottuna pakastamon energiankäytöllä, jolloin saadaan selvitettyä mahdolliset säästöt vuositason tasolla. On hyvä huomioida, että laskelmat tehdään kuukausien

sähkön hinnan keskiarvon mukaisesti, joten heilahtelua voi olla suuntaan tai toiseen.

Taulukko 10. Säästöjen tarkastelu.

	Spot-hinta klo 00–06	Spot-hinta klo 06–12	Ero
Keskiarvo [c/kWh]	4,56	8,47	3,91
Yhteensä [€]	45 600	84 700	39 100

Pakastamon energiankäyttö on noin 1000 000 kWh vuodessa, joten energiakulut ovat suuret. Tulosten perusteella saadaan selvitettyä, että siirrettäessä energiankäyttö yöaikaan tapahtuvaksi saadaan säästettyä vuodessa 39 100 €.

Jos pakastuslaitos investoi sähköakkuun, joka maksaa 2,5 miljoonaa euroa, takaisinmaksuaika on siten $2,5 \text{ M€} / 39\,100 \text{ €} = 64$ vuotta.

Absorptiojäähdyslaitteelle takaisinmaksuaika on $1,8 \text{ M€} / 39\,100 \text{ €} = 46$ vuotta.

Tässä takaisinmaksuajan laskennassa ei huomioida korkoja.

Varastointimenetelmien tekninen käyttöikä on liian lyhyt, joten ne eivät maksa itseään takaisin. Energiavaraston hyödyntäminen jäähdytysprosessissa säästää kustannuksissa, mutta tulosten perusteella todetaan investoinnin olevan kannattamaton pakastuslaitokselle.

6 Yhteenveto

Tämä opinnäytetyö on kylmäenergian varastointitekniikoita koskeva esiselvitysprojekti. Energian varastointiin liittyvä teknologia on herättänyt runsaasti kiinnostusta energia-alalla, koska energiavarastot tarjoavat joustavuuden käyttää sähköä silloin, kun se on markkinoiden halvinta. Myös vikatilanteissa on mahdollista käyttää varastoitua energiaa. Energian varastointitekniikkaa valittaessa otetaan erityisesti huomioon soveltuvuus käyttökohteeseen ja investointikustannukset.

Jäähdytys- ja pakastusprosesseissa haasteena on, että kylmän tuottaminen kasvattaa sekä kustannuksia että sähkön kulutusta. Toisin sanoen mitä kylmempää halutaan saada, sitä enemmän se kuluttaa sähköä. Kylmävaraston todellinen potentiaali tulee esille tilanteissa, joissa pakastusprosessit voivat hyödyntää yöaikaan tuotettua sähköä käyttöenergiakseen. Energian varastoinnin hyödyntäminen on avainasemassa niin teollisuudessa kuin kotitalouksissa.

Faasimuutosvaraajat ovat edistäneet kylmä- ja lämpöenergian varastointitekniologian kehitystä, ja niitä on tutkittu erityisesti viime vuosina. Niiden käyttö perustuu kykyyn sitoa ja vapauttaa energiaa vakio-tilassa. Faasimuutosmateriaaleilla saadaan tilavuutta pienemmäksi, mutta niiden hinta suhteessa saavutettavaan käyttökustannussäästöön on suurimpana esteenä. Myös muiden varastointitekniikoiden kehitys on edelleen liian alhaisella tasolla saavuttaakseen kasvua suuremmissa mittakaavoissa. Kylmäenergian varastointi kaipaa lisätutkimuksia, sillä se tukee energiamurroksen kehitystä Suomen teollisuudessa. Yritykset päättävät itse lopulta investoivatko teknologiaan vai eivät, joten varastointitekniikan on oltava kilpailukykyinen ja kustannustehokas. Tarvitaan lisätutkimusta varastointitekniikan käyttäytymisestä, jotta varmistetaan tekniikan toimivuus ennustetulla tavalla.

Kylmävarastojen soveltuvuus on hyvin rajoitettu, erityisesti niiden käyttölämpötilan ja energiatehokkuuden vuoksi. Lisähaasteita luo sähkön hinnan jatkuva muuttuminen. Ei pystytä arvioimaan tarkasti, kuinka paljon

kylmävarastolla saadaan realistisia säästöjä aikaan. Jos sähkön hinta tulevaisuudessa laskee, tällaisen kylmävaraston hankinta ei ole tarpeellista. Silloin ei ole merkitystä, mihin aikaa energiaa tuotetaan jäähdytykseen.

Absorptioprosessit ovat energiatehokkaita erityisesti, kun hukkalämpöä on riittävästi saatavilla prosessien käyttöenergiaksi. Kiinnostava selvityskohta on sähköakun mahdollinen hyödyntäminen muutenkin kuin kylmävarastona esimerkiksi sähkömarkkinoihin osallistumalla.

Lähteet

Aittomäki, A., 2012. Kylmäteknikka. 4. painos. Helsinki: Suomen Kylmähdistus ry

Alanen, R., Koljonen, T., Hukari, S., Saari, P., 2003. Energian varastoinnin nykytila. VTT Tiedotteita 2199. Viitattu 11.7.2023. Saatavilla:

<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2003/T2199.pdf>

Axiotherm. Axiotherm PCM. Viitattu 20.7.2023. Saatavilla:

<https://www.axiotherm.de/en/produkte/axiotherm-pcm/>

Bellini, E., 2021. A closer look at liquid air energy storage. pv magazine. Viitattu 23.8.2023. Saatavilla: <https://www.pv-magazine.com/2021/08/02/a-closer-look-at-liquid-air-energy-storage/>

Borri, E., Tafone, A., Romagnoli, A., Comodi, G., 2021. A review on liquid air energy storage: History, state of the art and recent developments. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 137, 110572.

Fingrid. Kysyntäjousto. Viitattu 7.9.2023. Saatavilla:

<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyssahkomarkkinoiden-kehityshankkeet/kysyntajousto/>

Hafner, A., Nordtvedt, T.S., Rumpf, I., 2011. Energy saving potential in freezing applications by applying cold thermal energy storage with solid carbon dioxide. Procedia Food Science, 1, pp. 448–454.

Halvin sähkösopimus. 2023. Sähkön hintaennuste 2024: Sähkön hinta nyt ja tulevaisuudessa. Viitattu 21.11.2023. Saatavilla: <https://xn--halvinshksopimus-1nb04a.fi/sahkon-hintaennuste/>

Heinen & Hopman. RSW System. Viitattu 9.11.2023. Saatavilla:

<https://www.heinenhopman.com/products/rsw-system/>

IRENA. 2020. Innovation outlook: Thermal energy storage. Viitattu 16.10.2023.

Saatavilla: <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Innovation-outlook-Thermal-energy-storage>

Kaappola, E., Hirvelä, E., Jokela, M., Kianta, J. 2012. Kylmäteknikan perusteet. 2. tarkistettu painos. Helsinki: Opetushallitus

Kianta, J. 2013. Kylmätekniiikan käsikirja. 1. painos. Tampere: Eräsalon Kirjapaino Oy

Koljonen, T., Sipilä, K., 1998. Uudemman absorptiotekniikan soveltaminen kaukojäähdytyksessä. VTT Energia. Viitattu 4.7.2023. Saatavilla:

<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/1998/T1926.pdf>

Kushwah, A., Pandit, R., Gaur, M., 2020. The role of phase change materials for lifetime heating of buildings in cold climatic conditions. International Journal of Built Environment and Sustainability. pp. 81–96.

Laitinen, A., Rämä, A., Airaksinen, M., 2016. Jäähdytyksen teknologiset ratkaisut. VTT. Viitattu 17.10.2023. Saatavilla:

https://energia.fi/files/1359/Jaahdytysteknologiaselvitys_VTT_221216.pdf

Lin, Y., 2019. How absorption chillers work. Energy Link. Viitattu 10.7.2023.

Saatavilla: <https://goenergylink.com/blog/how-absorption-chillers-work/#:~:text=In%20short%2C%20the%20absorption%20chiller,the%20air%20pressure%20is%20low.>

Linde. 2020. Ammoniakki, vedetön. Käyttöturvallisuustiedote. Viitattu 9.11.2023.

Saatavilla: https://www.linde-gas.fi/fi/images/Ammoniakki_vedet%C3%B6n_R717_2.3_FI_tcm634-551639.pdf

Linde. Kuivajää (hiilihappojää). Viitattu 25.7.2023. Saatavilla: https://www.linde-gas.fi/fi/products_ren/dry_ice/index.html

Linna, J., Nuutinen, J., 2012. Energiaopas pienille ja keskisuurille yrityksille.

Elinkeinoelämän keskusliitto. Viitattu 21.11.2023. Saatavilla: <https://ek.fi/wp-content/uploads/energiaopas.pdf>

Motiva. 2020. Akut. Viitattu 20.11.2023. Saatavilla:

https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/valitse_auto_viis_aasti/ajoneuvotekniikka/akut

Oinonen, T., Soimakallio, S., 2001. HFC- ja PFC-yhdisteiden sekä SF₆:n päästöjen tekniset vähentämiskeinot ja niiden kustannukset Suomessa. VTT Energia. Viitattu 3.7.2023. Saatavilla:

<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2001/T2099.pdf>

PCM Products Ltd. 2021. Viitattu 23.8.2023. Saatavilla:

<https://www.pcmproducts.net/>

PLUSS technology for a better world. 2022. Viitattu 14.7.2023. Saatavilla:

<https://pluss.co.in/save-pcms-product-range/>

RAL Quality Association PCM. PureTemp LLC. Viitattu 14.7.2023. Saatavilla:

<https://www.pcm-ral.org/pcm/en/members/puretemp-llc/>

Regin, A.F., Solanki, S.C., Saini, J.S., 2008. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), pp. 2438–2458.

Remes, M., 2020. Energian varastointi alkaa kannattaa. Onninen. Viitattu

10.7.2023. Saatavilla: <https://www.onninen.fi/artikkelit/energian-varastointi-alkaa-kannattaa>

Rubitherm Technologies GmbH. 2023. Viitattu 23.8.2023. Saatavilla:

<https://www.rubitherm.eu/en/>

RuhrTech. 2023. Inorganic-Based Series PCM (RE). Viitattu 14.7.2023.

Saatavilla: <https://ruhrtech.global/products/phase-change-material/inorganic-based-re>

Sariola, L. 2020. Safe use of ammonia as ICE fuel. Master's thesis. Vaasan yliopisto.

Selvnes, H., 2017. Saving the cold for later: Decoupling supply and demand. Annual Report. HighEFF. pp. 17–18.

Selvnes, H., 2022. Cold thermal energy storage. SINTEF. Viitattu 23.8.2023.

Saatavilla: <https://blog.sintef.com/sintefenergy/energy-efficiency/cold-thermal-energy-storage/>

Selvnes, H., Allouche, Y., Manescu, R., Hafner, A., 2021. Review on cold thermal energy storage applied to refrigeration systems using phase change materials. *Thermal Science and Engineering Progress*, 22.

Söylemez, E., Widell, K.N., Gabriellii, C.H., Ladam, Y., Lund, T., Hafner, A., 2022. Overview of the development and status of carbon dioxide (R-744) refrigeration systems onboard fishing vessels. *International Journal of Refrigeration*, 140, pp. 198–212.

Va-Q-tec. Va-Q-accu-50G. Viitattu 23.8.2024. Saatavilla: <https://va-q-tec.com/en/business-areas/healthcare-and-logistics/products/>

Vecchi, A., Li, Y., Ding, Y., Mancarella, P., Sciacovelli, A., 2021. Liquid air energy storage (LAES): A review on technology state-of-the-art, integration pathways and future perspectives. *Advances in Applied Energy*, 3, 100047.

Verpe, E.H., 2018. Low temperature plate freezing of fish on boats using R744 as refrigerant and cold thermal energy storage. Master thesis at Norwegian University of Science and Technology

Verpe, E.H., Tolstorebrov, I., Sevault, A., Hafner, A., Ladam, Y., 2019. Cold thermal energy storage with low-temperature plate freezing of fish on offshore vessels. International Institute of Refrigeration.