



# Selvitysraportti: Sähköistämällä energiatehokkuutta teollisuudessa.

12/2024

# Selvitysraportti: Sähköistämällä energiatehokkuutta teollisuudessa

---

Ei julkaista painotuotteena

Sähköistämällä energiatehokkuutta teollisuudessa  
Julkaisija Motiva Oy

Copyright Motiva Oy, Helsinki, joulukuu 2024

## Esipuhe

---

Fossiilisiin polttoaineisiin ja polttoon perustuvia prosesseja sähköistämällä voidaan teollisuudessa saavuttaa merkittäviä säästöjä primäärienergian käytössä sekä päästövähennyksiä, kun sähkön tuotanto perustuu uusiutuviin ja päästöttömiin energialähteisiin.

Sähköistämällä energiatehokkuutta teollisuudessa -yhteishankkeessa energiatehokkuussopimuksessa mukana olevat teollisuusyritykset, laitetoimittajat ja asiantuntijat hakevat yhdessä ratkaisuja eri teollisuusprosessien sähköistämiseen ja hukkalämmönlähteiden hyödyntämiseen. Yhteishanke on osa energiatehokkuussopimuksen toimeenpanoa ja osarahoittajana toimii Energiavirasto. Yhteishankkeen tarkoituksena on lisätä tietoisuutta tällä hetkellä markkinoilla olevista teknologioista ja mahdollisuuksista prosessien sähköistämiseen liittyen. Yhteishankkeen organisoivat ja toteutti Motiva Oy, josta projektiryhmään kuuluivat projektipäällikkö Sophia Havulinna, Erja Saarivirta, Tomi Kiuru, Juhamatti Meetteri, Sirpa Mustonen sekä Marjo Savinainen.

Tämän selvitysraportin sekä kenttämittaukset kohteissa on tehnyt A-Insinöörit Suunnittelu Oy, josta projektiryhmässä mukana ovat olleet projektipäällikkö Anna-Maria Kolhinen, Joonas Takala, Henna Rautio, Anssi Jaakkola, Markus Laine, Kimmo Närhi, Samu Pitkäniemi, Sami Rantanen, Niko Puranen ja Jarmo-Keski-Opas.

# Sisällysluettelo

---

<b>Esipuhe</b>	<b>3</b>
<b>Sisällysluettelo</b>	<b>4</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>7</b>
<b>2 Sähköistämisen edellytyksiä yrityksessä</b>	<b>8</b>
<b>3 Korkeiden lämpötilojen tuottaminen sähköllä</b>	<b>9</b>
<b>4 Sähkökattilat</b>	<b>10</b>
<b>4.1 Vastuskattilat</b>	<b>11</b>
<b>4.2 Elektrodikattilat</b>	<b>11</b>
<b>5 Korkean lämpötilan lämpöpumput</b>	<b>13</b>
<b>5.1 Kylmäaineet ja lämpöpumput</b>	<b>13</b>
5.1.1 Synteettiset kylmäaineet	15
5.1.2 Uusi F-kaasuasetus	16
5.1.3 Esimerkkejä teollisuuden sovelluskohteista synteettisillä kylmäaineilla	17
5.1.4 Hiilidioksidi	18
5.1.5 Ammoniakki	21
5.1.6 Hiilivedyt, isobutaani ja propaani	22
<b>5.2 Höyryn tuottaminen hukkalämmöistä</b>	<b>24</b>
5.2.1 Suora MVR-kytkentä ilman lämpöpumppua	24
5.2.2 Lämpöpumpun ja höyrykompressorin yhdistelmä	26
5.2.3 Höyryn tuotanto lämpöpumpulla	29
<b>6 Sähköstä lämmöksi -teknologiat ja lämmön varastointi</b>	<b>30</b>
<b>6.1 Tuntuvan lämmön varastointi</b>	<b>30</b>
<b>6.2 Latentin lämpöenergian varastot</b>	<b>32</b>
<b>6.3 Sähköterminen lämpövarasto</b>	<b>33</b>
<b>6.4 Termokemiallisen lämpöenergian varasto</b>	<b>34</b>
<b>7 Energiatehokkuus ja älyratkaisut</b>	<b>35</b>
<b>7.1 Energianhallintajärjestelmät</b>	<b>36</b>
<b>7.2 Reservimarkkinat ja kulutusjoustoos osallistuminen</b>	<b>36</b>
7.2.1 Reservimarkkinatuotteet	37
7.2.2 Reservimarkkinoille osallistuminen	39

7.2.3	Reservimarkkinoille pyrkivän yrityksen pohdittavia asioita	40
<b>8</b>	<b>Mittauskohteet</b>	<b>41</b>
<b>8.1</b>	<b>Peab – materiaalivaraston lämmitysjärjestelmän sähköistäminen</b>	<b>41</b>
8.1.1	Tavoite	41
8.1.2	Vaihtoehto 1: uuden kuumaöljysähkökattilan hankinta	41
8.1.3	Vaihtoehto 2: kuumaöljyn korvaaminen höyryllä, sähkötoiminen höyrykattila	41
<b>8.2</b>	<b>Canatu -prosessilämmöntalteenottopotentialin selvittäminen</b>	<b>42</b>
8.2.1	Tavoite	42
8.2.2	Tilojen lämmitys, jäähdytys ja ilmanvaihto	42
8.2.3	Mittaukset	42
8.2.4	Jatkomietintää	42
<b>8.3</b>	<b>Purso – prosessilämmöntalteenottopotentialin selvittäminen</b>	<b>43</b>
8.3.1	Tavoite	43
8.3.2	Jatkotoimenpiteet	45
<b>8.4</b>	<b>Metsä Board – hukkalämpöjen hyödyntäminen Simpeleen kartonkitehtaalla</b>	<b>46</b>
8.4.1	Metsä Board Simpele	46
8.4.2	Tavoite	46
8.4.3	Voimalaitoksen hukkalämmöt	46
8.4.4	Kattilan ulospuhalluslauhde	48
8.4.5	Savukaasut	48
8.4.6	Hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämmön tuotannossa lämpöpumpulla	48
8.4.7	Yhteenveto ja yleistä pohdintaa	49
<b>8.5</b>	<b>Boliden – haihdutusprosessin sähköistäminen Harjavallan tehtaalla</b>	<b>50</b>
8.5.1	Boliden Harjavalta	50
8.5.2	Tavoite	50
8.5.3	Tunnistetut lämmitysvaihtoehdot	50
8.5.4	Koko tehdasalueen ratkaisuvaihtoehto yleisesti	52
<b>9</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>53</b>
<b>9.1</b>	<b>Sähkökattilat yhteenveto</b>	<b>53</b>
<b>9.2</b>	<b>Lämpöpumput yhteenveto</b>	<b>53</b>
<b>9.3</b>	<b>Kulutusjousto ja älyratkaisut yhteenveto</b>	<b>55</b>
<b>9.4</b>	<b>Mittausten yhteenveto</b>	<b>55</b>
	<b>Lähteet</b>	<b>57</b>

# Termit

aFRR	Taajuuden palautusreservi
COP	Coefficient of Performance, lämpökerroin, tuotetun lämmön ja käytetyn sähkön suhde.
ETES	Electro-thermal Energy Storage, sähköterminen lämmön varastointi
FFR	Nopea taajuusreservi
FCR-D	Taajuusohjattu häiriöreservi
FCR-N	Taajuusohjattu käyttöreservi
GWP	Global Warming Potential, lämmityspotentiaali, kasvihuonekaasujen lämpöenergian ilmakehään sitomista kuvaava lukuarvo, jonka referenssinä on hiilidioksidi, jonka GWP-arvo on 1.
HTHP	High Temperature Heat Pump, korkean lämpötilan lämpöpumppu.
HFC	Fluorihilivety (engl. Hydrofluorocarbon)
HFO	Osittain halogenoitu hiilivety (engl. Hydrofluoro-Olefin), matalan GWP-arvon kylmäaineita.
IVLP	Ilma-vesilämpöpumppu
KJV	Kulutuksen järjestelmätekniset vaatimukset
LTO	Lämmöntalteenotto
mFRR	Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat
MVR	Höyryn mekaaninen komprimointi (engl. Mechanical Vapour Re-compression), höyryprosessi, jossa kiertoaineena on vesi.
PCM	Faasimuutosmateriaali (engl. Phase Change Materials)
PFAS	Per- ja polyfluoratut alkyylilyhdisteet, tuhansien synteettisten kemikaalien joukko, erittäin pysyviä ja hitaasti hajoavia hiilivetyjä, joissa osa vetyatomeista tai kaikki ovat korvattu fluorilla. Tunnetuimpia PFAS -yhdisteiden käyttökohteita ovat paistinpannujen pinnoitteet, vettä hylkivät vaatteet ja suksivoiteet.
RDH	RotoDynamic Heater (Coolbrook™)
RDR	RotoDynamic Reactor (Coolbrook™)
SHS	Sensible Heat Storage, tuntuvan lämmön varasto
SJV	Sähkövarastojen järjestelmätekniset vaatimukset
TCES	Thermo-chemical Energy Storage, termokemiallinen lämmön varastointi
VJV	Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset

Teollisuuden sähköistämisellä voidaan saavuttaa merkittäviä vaikutuksia energian käytön tehostumiseen sekä fossiilisten polttoaineiden korvaamisen kautta ilmastovaikutuksiin. Yleisesti sähköistymisellä tarkoitetaan sähkön käytön absoluuttista lisäämistä ja sähkön käyttösovellusten laajentamista eri toiminnan alueilla.

Teollisuudessa sähköistyminen voidaan jakaa suoraan sähköistymiseen, lämpöpumppuja hyödyntäviin sähköistymisratkaisuihin sekä epäsuoraan sähköistymiseen, jossa sähköllä valmistetaan esimerkiksi vetyä tai synteettisiä polttoaineita (Motiva, 2023a). Suurimmalta osaltaan sähköistämispotentiaali keskittyy lämpöä käyttävien prosessien sähköistämiseen. Teollisuuden sähköistymisen tarjoaa jo nyt teollisuudelle mahdollisuuden siirtyä päästöttömiin prosesseihin laajasti erilaisissa lämpöä vaativissa prosesseissa, lukuun ottamatta kaikkein korkeimpia, yli 1000 celsiusasteen lämpötiloja vaativia prosesseja (Motiva 2024).

Tämän raportin syventymiskohteita ovat hankkeen alkuvuodesta 2024 julkaistussa kirjallisuusselvityksessä (Motiva, 2024) tarkastellut teknologiat: korkean lämpötilan lämpöpumput, sähkökattilat ja suorat sähköistysratkaisut sekä sähköstä lämmöksi -teknologiat, kuten lämmön varastointi. Lisäksi tarkastelussa on mukana älyratkaisut osana energiatehokkuuden hallintaa.

Raportissa tutustutaan aluksi korkeiden lämpötilojen tuottamiseen sähköllä yleisesti, jonka jälkeen perehdytään tarkemmin sähkökattiloihin, lämpöpumppuihin, lämpövarastoihin ja lopuksi tämänhetkisiin markkinoihin.

Eri tekniikoiden jälkeen esitellään yleisellä tasolla mukana olleissa yrityksissä tehdyt selvitykset, huomioiden yrityskohtaiset salaustarpeet. Esimerkkikohteita oli tässä hankkeessa mukana Peab Oy:ltä, Purso Oy:ltä, Metsä Board Oy:tä, Canatu Oy:ltä sekä Boliden Harjavalta Oy:ltä.

Yhteishankkeessa ovat olleet mukana teollisuusyritykset Canatu Oy, Metsä Board, Boliden Harjavalta, Peab Industri Oy, Purso Oy, Mäkelä Alu Oy, Lempeä Lämpö Oy, Saarioinen Oy, STEP Oy, Valmet Automotive Oyj ja BEWI RAW Oy. Toimijoita hankkeessa edustivat ABB Oy, Siemens Oy, Elstor Oy, Rasol Oy ja Calefa Oy. Lisäksi mukana olivat Aalto-yliopisto ja LUT-yliopisto sekä Energiavirasto hankkeen osarahoittajana.

Työn tilaajana ja yhteishankkeen toteuttajana toimi Motiva Oy, josta projektiryhmään kuuluivat projektipäällikkö Sophia Havulinna, Erja Saarivirta, Tomi Kiuru, Juhamatti Meetteri, Sirpa Mustonen sekä Marjo Savinainen.

Tämän selvitysraportin sekä kenttämittaukset kohteissa on tehnyt A-Insinöörit Suunnittelu Oy, josta projektiryhmässä mukana ovat olleet projektipäällikkö Anna-Maria Kolhinen, Joonas Takala, Henna Rautio, Anssi Jaakkola, Markus Laine, Kimmo Närhi, Samu Pitkäniemi, Sami Rantanen, Niko Puranen ja Jarmo-Keski-Opas.



Toiminnan sähköistämisen edellytyksenä on riittävän sähkönjakelukyvyn takaaminen ja toteuttaminen eli sähkön saatavuuden ja oikean kapasiteetin varmistava sähköliittymä. Liittynnän suunnittelu ja toteutus vaatii hyvää yhteydenpitoa ja tietojen toimittamista osapuolten välillä projektin aikana. Liittymäprojekti voidaan jakaa vaiheisiin, toteutusvaihe käynnistyy liittymissopimuksen allekirjoituksen jälkeen. Liittymäprojektiä suunniteltaessa on selvitettävä seuraavat asiat

- Verkkoyhtiön tarjoamat mahdolliset tavat tuoda sähköä tontille.
- Mahdollisen nykyisen liittymän kapasiteetti. Kapasiteetin ylittyessä verkkoa vahvistetaan verkkoyhtiön toimesta.
- Suunnitellaan kaapelireitti uudelle syöttökaapelille.
- Noudatettava verkkoyhtiökohtaisia liittymisehtoja.
- Lisäksi noudatetaan Fingridin asettamia vaatimuksia kulutus- ja voimalaitoksille sekä sähkövarastoille vaatimusmäärittelyissä ”Kulutuksen järjestelmätekniset vaatimukset” (KJV) ja ”Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset” (VJV) sekä ”Sähkövarastojen järjestelmätekniset vaatimukset” (SJV).
- Lisäksi hybridiliittymien osalta sovelletaan kantaverkkoyhtiön julkaisemaa ja voimassa olevaa ohjetta ”Järjestelmätekniisten vaatimusten soveltaminen hybridivoimalaitoksiin”.

Kun edellytykset sähköliittymälle on selvitetty, on suunniteltava itse liittymäpiste. Liittymispisteellä tarkoitetaan kohtaa, jossa eri sähkölaitteiston haltijoiden omistusrajat sijaitsevat ja jossa asiakkaan laitteisto liitetään verkkoyhtiön sähköverkkoon. Liittymispiste sovitaan liittymille tapauskohtaisesti liittymän kanssa ja kirjataan liittymissopimukseen. Suurjännitteisen jakeluverkon liittymät tarkastellaan tapauskohtaisesti ja liittymistapa ja -paikka määritetään tarkastelun perusteella ottaen huomioon:

- Liittynnän sijainti, teho ja tyyppi (kulutus/tuotanto/sähkövarasto).
- Vaikutus suurjännitteiseen jakeluverkkoon, ympäristöön ja asiakkaisiin.
- Tekniset toteutusvaihtoehdot ja kustannukset.
- Kytkinlaitos- tai voimajohtoliityntä.
- Sähkölaitteistojen suojaus ja yhteensopivuus.
- Energian mittausta ja tietoliikenneyhteydet.
- Tekniset ohjeet liittynnästä.

Sähkönjakelu optimoidaan verkon simulointiohjelmalla. Sähkönjakeluverkon tärkeimpiä ominaisuuksia ovat:

- muuntajien koko ja tyyppi
- keskusten ja suojalaitteiden nimellisvirrat

- komponenttien oikosulkukestoisuus
- kaapelien poikkipinta-ala
- jännitteenalenema
- loistehon kompensointi
- suojaus ja sen selektiivisyys.

Sähkönjakeluun liittyvien muutosten toteuttamiseen on hyvä varata vähintään puoli vuotta aikaa, hankkeen läpiviemisen nopeus riippuu paljon liittyjän alueen kantaverkon rakenteesta ja sekä myös komponenttien toimitusajoista.

### 3 Korkeiden lämpötilojen tuottaminen sähköllä

---

Teollisuudelle on usein ominaista vaativa toimintaympäristö, joka edellyttää korkeita lämpötiloja ja painetasoja sekä tarkkaa olosuhteiden hallintaa. Teollisuuden sähköistymisen yhtenä esteenä onkin riittävän korkeiden lämpötilatasojen saavuttaminen sähköä käyttävillä lämmitysteknologioilla. Ongelman ratkaisemiseksi kehitys lämpöpumpuissa on tällä hetkellä nopeaa ja korkean lämpötilan lämpöpumppuja (yli 90°C lämpötilatasot) on vuosi vuodelta paremmin saatavilla eri valmistajilta ja eri kylmäaineilla (Motiva, 2024).

Lämpöpumpputekniikka perustuu lämmön siirtämiseen lämmönlähteestä lämpönieluun termodynamiikan reunaehtoja noudattaen. Lämpöpumppujen taloudellinen käyttöalue rajoittuu noin 200°C tienoille riippuen lämmönlähteen lämpötilatasosta. Käytännössä 200°C lämpötilataso vaatii joko ylikriittisen hiilidioksidi- tai heliumprosessin käyttämistä tai lämpöpumpun ja MVR-tekniikan yhdistämistä. Tällä hetkellä markkinoilla olevilla synteettisiä kylmäaineita käyttävillä lämpöpumpuilla päästään käytännössä 160°C lämpötilatasolle. (Zühlsdorf, Neksa and Elmegaard, 2024)

Lämpöpumppuinvestointien vaatimien korkeiden pääomien vuoksi on syytä huomioida lämpöpumpulla tuotetun lämpöenergian tuotantokustannusten nousu mitä korkeampia lämpötiloja tuotetaan, koska lämpöpumpun hyötysuhde ja kapasiteetti pienenee mitä suurempi lämpötilanosto lämpöpumpun kiertoprosessilla tehdään suhteessa lämmönlähteen lämpötilaan.

Korkeammilla lämpötilatasoilla lämmöntuotannossa täytyy tukeutua suoraan sähkönkäyttöön. Yksinkertaisin tapa käyttää sähköä suoraan lienee resistiiviset sähkövastukset, joilla lämmitetään esimerkiksi ilmaa tai vettä. Ilman lämmityksessä sähkövastuksilla päästään 600°C lämpötilatasolle ja tarvittaessa jopa 800°C asti. Suoralla sähkönkäytöllä prosessiin tuodaan energiaa ulkopuolelta, joten suoran sähkökäytön tapauksessa on myös hyvä pohtia hukkalämpöjen hyödyntämistä.

Tulevaisuudessa yli 1000°C lämpötilojen tuottaminen suoralla sähköllä voi tulla kyseeseen esimerkiksi Coolbrookin RotoDynamic Heater™ -tekniikalla (RDH), jolla kaasuja voidaan lämmittää jopa 1700°C asti. RDH-tekniikka perustuu turbotekniikkaan ja on eräänlainen käännteinen turbiini,

jossa sähkömoottorilla pyöritetään roottoria. Toinen Coolbrookin tekniikka on nimeltään Roto-Dynamic Reactor™ (RDR), joka toimii nimensä mukaisesti reaktorina, jossa lämpö tuodaan kemiallisiin reaktioihin suoraan turbotekniikan avulla, eikä epäsuorasti höyrykattilan tuottamalla höyryllä. Perinteiseen höyrykrakkausprosessiin verrattuna RDR-tekniikalla voidaan saavuttaa korkeampia lämpötiloja ja lyhyempiä viipymäaikoja, minkä takia reaktioiden saannot ovat parempia ja näin tuottavuus olisi korkeampi. Tekniikat ovat tällä hetkellä testausasteella. (Coolbrook Oy, 2024).

## 4 Sähkökattilat

---

Sähkökattilat ovat yleistyneet ja yleistyvät vauhdilla Suomessa. Tekniikkansa puolesta sähkökattilat voidaan jakaa kahteen: elektrodikattiloihin ja vastuskattiloihin. Nyrkkisääntönä elektrodikattilat sopivat noin 5–10 megawatin tehosta ylöspäin ja vastuskattilat sopivat pienemmille, alle 10 MW:n tehoille (Liimatainen, 2024; Mäntynen, 2024).

Sähkökattilat ovat yleistyneet viime vuosina eri teollisuuden aloilla, kuten metsäteollisuudessa, jossa sähkökattiloilla voidaan korvata höyryntuotannossa fossiilisia polttoaineita ja osallistua kulutusjoustolla myös sähkömarkkinoille erilaisilla tuotteilla. Esimerkiksi UPM siirsi Kaipolan jo suljetulta paperitehtaalta 50 MW:n sähkökattilan Tervasaaren tehtaalle Valkeakoskelle vuonna 2022 ja syksyllä 2023 Tervasaareissa otettiin käyttöön uusi 60 MW:n sähkökattila. UPM investoi vuonna 2023 sähkökattiloihin myös Raumalla ja Jämsänkoskella. Stora Enso puolestaan investoi vuonna 2023 uuteen 60 MW:n sähkökattilaan Anjalankosken paperitehtaalla. (Kouvolan Sanomat, 2023; Satakunnan Kansa, 2023; UPM Oyj, 2023)

Kaukolämmön tuotanto on tyypiesimerkki sähkökattiloiden yleistymisestä ja niihin liittyvän yleisen tietoisuuden lisäämisessä. Hankkeita on toteutettu ja uusia hankkeita on vireillä eri puolella Suomea. Energiayhtiöt tyypillisesti investoivat sähkökattilan yhteydessä myös kaukolämpöakkuun, jolloin sähkökattila-kaukolämpöakkuyhdistelmällä saadaan hyödynnettyä parhaiten halvat sähkön tuntihinnat. Tyypillinen esimerkki päivätason sähkön hintojen vaihtelusta on ladata kaukolämpöakkuja yöllä halvempien tuntien aikana, kun kaukolämmön kulutus on pienimmillään ja purkaa akkua aamulla alkavan kaukolämmön ja sähkön kysyntäpiikkien aikana. (EPV Energy Oy, 2021; Helen Oy, 2023; Fortum Oyj, 2024a; Tampereen Energia, 2024)

Sen lisäksi että sähkökattilat mahdollistavat höyryn- ja lämmöntuotannon päästöjen pienentämisen, turvaavat ne myös teollisuuslaitosten toimitusvarmuutta. Tämä nousi esille 2022, kun Ukrainan sodan myötä energiamarkkinat kokivat myllerryksen. Teollisuudella oli ja on edelleen vahva intressi vähentää riippuvuuttaan maakaasusta sekä muista fossiilisista polttoaineista, minkä vuoksi esimerkiksi metsäteollisuudessa toteutettiin investointeja nopealla aikataululla.

#### 4.1 Vastuskattilat

---

Vastuskattila toimii perinteisillä sähkövastuksilla, joiden määrä riippuu kattilan tehosta. Yksittäisten vastusten teho voi vaihdella muutamasta kymmenestä kilowatista muutamaan sataan kilowattiin. Vastuskattilat toimivat 400 V tai 690 V jännitteellä, mikä tarkoittaa sitä, että suurilla tehoilla sähkökeskuksen ja muuntajan virrat ja koko kasvavat suuriksi, mikä kasvattaa kustannuksia. Isoilla tehoilla elektrodikattilat ovatkin edullisempi vaihtoehto kuin vastuskattilat.

Vastuskattiloiden etuna on yksinkertainen tekniikka. Yhden vastuksen hajotessa tehosta putoaa pois vain yhden vastuksen teho, joka voi olla esimerkiksi 50–200 kW. Vastuskattilat eivät myöskään vaadi lämmitettävältä vedeltä suolanpoistoa.

Jos kattilan sijainti on sähköverkon päässä ja sähköä ei ole aina saatavilla, niin vastuskattilaan voidaan yhdistää poltin, jolloin puhutaan hybridikattilasta, joka voi tuottaa lämpöä myös maakaasulla, biokaasulla, nestekaasulla tai polttoöljyllä. Vastuskattilaa voidaan ohjata sähkön ja polttoaineiden hinnan mukaan ja sillä voidaan osallistua reservimarkkinoille. (Finess Energy Oy, 2024a)

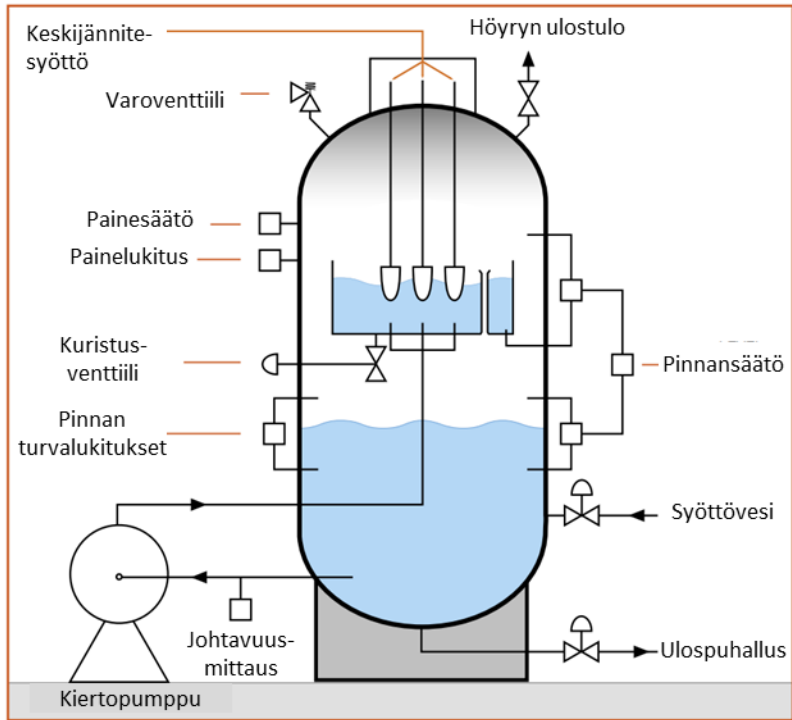
#### 4.2 Elektrodikattilat

---

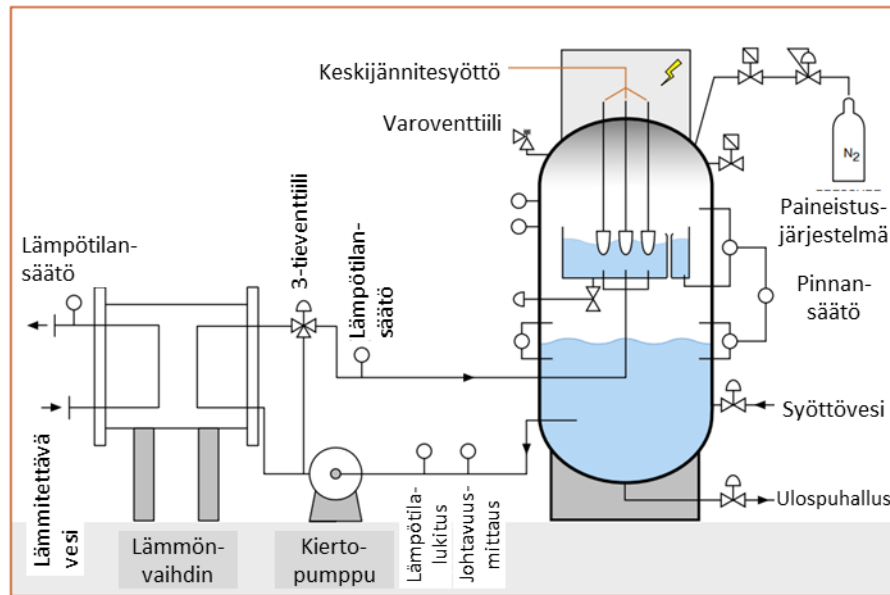
Elektrodikattilassa sähkövirta johdetaan veden läpi korkeajännitteiseltä elektrodilta tähtipisteen elektrodille. Elektrodikattilassa tähtipiste on kelluva, mikä tarkoittaa sitä, että kattila on maadoitettu muuntajan kautta ja vaatii muuntajalta tähtipistemaadoituksen. Kattilassa itsessään ei siis ole suoraan maadoitusta. Tähtipistemaadoitetun muuntajan osuus kattilainvestoinnin kokonaiskustannuksista voi olla noin 10 %. (Mäntynen, 2024)

Elektrodikattilalla voidaan tuottaa höyryä, kuumaa vettä tai jopa molempia kattilalla, jonka tuotantomuoto voidaan vaihtaa automaattisesti tarpeen mukaan (PARAT, 2021). Höyryä tuottavan elektrodikattilan periaatekaavio näkyy kuvassa 1. Kattilan kiertopumppu syöttää vettä elektrodeille, jotka höyrystävät vettä, kun sähkövirta kulkee veden läpi elektrodien välillä. Elektrodikattilat vaativat täyssuolanpoistetun kiertoveden.

Kuumaa vettä tuottavan elektrodikattilan periaatekuva näkyy kuvassa 2. Kuvassa näkyvä typpikäyttöinen paineistusjärjestelmä pitää huolen siitä, että kattilaan ei kerry vetyä ja happea, jotka voivat sopivissa olosuhteissa muodostaa räjähtävän seoksen. Elektrodikattilassa vedyltä ei voida täysin välttyä, sillä pieni vedynmuodostus on elektrodikattilan ominaisuus, kun sähkövirta kulkee veden läpi. Koska kuumaa vettä tuottava kattila ei tuota höyryä, niin sitä täytyy ”tuulettaa”, jotta vetyä ei kerry kattilaan.



**Kuva 1** Periaatekaavio höyryä tuottavasta sähkökattilasta. Muokattu lähteestä. (PARAT, 2021)



**Kuva 2** Periaatekaavio lämmintä vettä tuottavasta kattilasta. Muokattu lähteestä. (PARAT, 2021)

Korkean lämpötilan lämpöpumppusovelluksilla (engl. HTHP, High Temperature Heat Pump) tarkoitetaan kohteita, joissa lämpöpumput tuottavat lämpöä hukkalämmöistä tai muista lämmönlähteistä noin 90–100°C lämpötilatasosta noin 160°C lämpötilatasolle asti perinteisellä lämpöpumpputekniikalla. (Arpagaus *et al.*, 2018; Motiva, 2024)

Tässä luvussa lämpöpumppuja käsitellään kylmäainekohtaisesti, sillä lämpöpumpussa käytössä oleva kylmäaine ja öljy määrittävät lämpötilatason, johon lämpöpumpulla teoriassa voidaan päästä. Lämpöpumppujen todelliset toiminta-alueet riippuvat kylmäaineen termodynaamisten ominaisuuksien lisäksi valmistajasta ja kompressorityypistä. Termodynamiikan lakeja ei pysty lämpöpumpuillakaan rikkomaan. Mitä korkeampia lämpötiloja tuotetaan ja mitä alemmissä lämpötilatasoissa olevia lämmönlähteitä hyödynnetään, sitä alempi hyötysuhde lämpöpumppujärjestelmällä on. Toisin sanoen mitä korkeampia lämpötiloja lämpöpumpuilla halutaan tuottaa, sitä korkeampilämpötilaisia hukkalämmönlähteitä tulisi olla käytettävissä, jotta lämpöpumppuinvestoinnit ovat taloudellisesti kannattavia. Suuremmissa teollisuuskohteissa energiankulutusta ja hukkalämpöjä tulisikin tarkastella kokonaisuutena lämpötilatasojen ja kulutuspisteiden käyttämien energiamäärien osalta.

Lämpötilatarpeet sekä investointikyvyn ja ympäristönäkökulmien keskinäinen painotus vaikuttavat siihen, millainen lämpöpumppujärjestelmä kuhunkin sovelluskohteeseen sopii. Lämpöpumppuinvestointien kohdalla käyttökustannuksia ja takaisinmaksuaikoja tarkastellessa on syytä huomioida eri kylmäaineiden suorituskyky kyseisessä sovelluskohteessa sekä tarkastella järjestelmän elinkaarikustannuksia ja kylmäaineisiin liittyviä poliittisia ja taloudellisia riskejä laitteiston suunnittelun käyttöänsä aikana. Esimerkiksi ammoniakkilämpöpumput ovat raportin kirjoitushetkellä investointikustannuksiltaan tyypillisesti kalliimpia verrattuna vastaavan tehoisiin HFO-lämpöpumppuihin, mutta ne ovat hyötysuhteeltaan parempia ammoniakkin hyvien termodynaamisten ominaisuuksien ansiosta. Takaisinmaksuaikoihin sekä elinkaarikustannuksiin vaikuttaa hyötysuhteen ja investointikustannusten lisäksi käytetyn sähkön hinta.

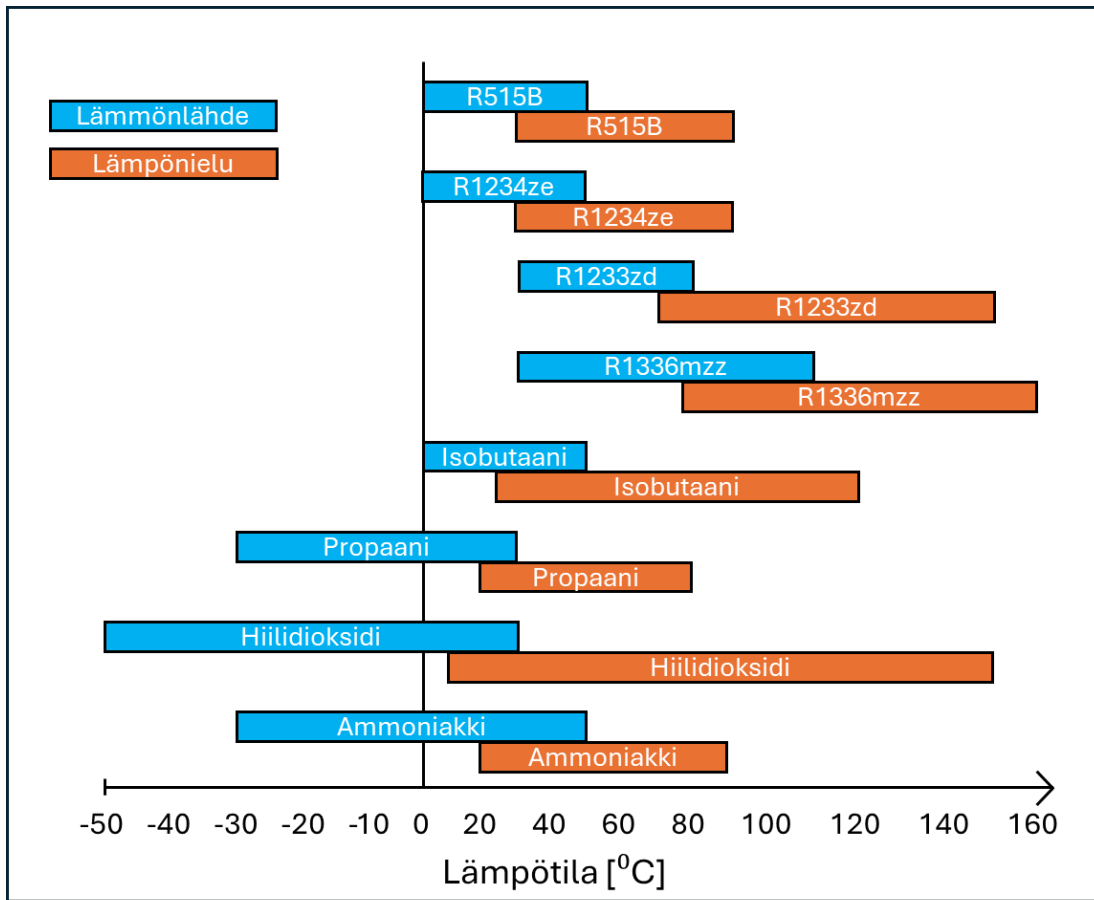
### 5.1 Kylmäaineet ja lämpöpumput

---

Lämpöpumpussa käytettävän kylmäaineen termodynaamiset ominaisuuden määrittävät reunaehdot lämpöpumpun mahdollisille toimintalämpötiloille, eli kuinka kylmässä lämpötilassa kylmäaine voi höyrystyä ja kuinka lämpimässä lämpötilassa kylmäaine voi lauhtua ja lämmittää prosessia tai esimerkiksi vettä, joka siirtää lämmön kohteeseen.

Kylmäaineita voidaan jaotella monella tavalla. Jako voidaan tehdä synteettisten ja luonnollisten kylmäaineiden välille tai esimerkiksi kylmäaineiden turvaluokkien mukaan. Kuvassa 3 näkyy tällä

hetkellä ja tulevaisuudessa lämpöpumpuissa käytössä olevien kylmäaineiden käyttölämpötila-alueet lämmönlähteiden ja lämpönielujen osalta.



**Kuva 3 Tulevaisuudessa lämpöpumpuissa käytössä olevien kylmäaineiden toiminta-alueita.**

Kuvasta 3 näkee, että luonnollisilla kylmäaineilla propaanilla, hiilidioksidilla ja ammoniakilla on laajat käyttöalueet. Korkean lämpötilan lämpöpumppukäytössä on kuitenkin huomattava, että jos lämpöä kerätään pakkaslämpötiloissa, niin prosessi vaatii tyypillisesti kaksiportaisen puristuksen. Tulevaisuudessa propaanin ja isobutaanin kaskadikytkentä voi olla yksi tapa tuottaa lämmintä vettä tai jopa höyryä yhden kylmäaineen kaksiportaisen puristuksen sijaan.

Korkean lämpötilan lämpöpumppusovelluksiin tarkoitettuilla synteettisillä kylmäaineilla sekä isobutaanilla ei voi operoida alhaisissa pakkaslämpötiloissa. Esimerkiksi kylmäaineet R1233zd ja R1336mzz vaativat korkeahkon, noin 40°C hukkalämmön lämpötilatason, joten ne eivät sovi esimerkiksi teollisuuskohteisiin, joissa hukkalämmöt hyödynnetään jo tehokkaasti.

Edellä esitettyjen kylmäaineiden turvaluokat näkyvät taulukossa 1. Turvaluokassa kirjain A tarkoittaa myrkytöntä ja B myrkyllistä ainetta. Turvaluokan numero merkitsee palavuutta: 1 tarkoittaa ilmassa palamatonta, palavuusluokan 2L aineilla on alempi syttyvyys ilmassa, luokan 2 aineet ovat syttyviä ja palavuusluokan 3 aineilla on suurempi syttyvyys.

**Taulukko 1 Käytössä olevien kylmäaineiden GWP-arvoja ja turvaluokkia.**

Kylmäaine	GWP	Turvaluokka
<b>Synteettiset</b>		
R515B	293	A1
R1233zd	1	A1
R1234ze	7	A2L
R1336mzz	2	A1
<b>Luonnolliset</b>		
R744 - Hiilidioksidi	1	A1
R290 - Propani	3	A3
R600a - Isobutaani	3	A3
R717 - Ammoniakki	0	B2L

#### 5.1.1 Synteettiset kylmäaineet

Synteettisillä kylmäaineilla tarkoitetaan yleisesti suurta halogenoitujen hiilivetyjen joukkoa. Halogenoidut hiilivedyt ovat laajalti kylmäainekäytössä olevia synteettisiä yhdisteitä. HFC-yhdisteet (engl. Hydrofluorocarbon) ovat fluorihiihivetyjä, joissa fluori on korvannut yhden tai useamman vedyn hiilivetyketjusta. HFC-yhdisteiden ongelmana ovat korkeat GWP-arvot (Global Warming Potential), minkä vuoksi HFO-aineita on kehitetty korkean GWP-arvon HFC-aineiden korvaajiksi. Osa HFO-yhdisteistä on heikosti syttyviä, jolloin ei saavuteta samaa turvallisuustasoa kuin syttymättömillä saman sovelluskohteen HFC-aineilla. Matalan GWP-arvon HFO-kylmäaineet (engl. Hydrofluro-Olefin) ovat myös fluorihiihivetyjä, mutta niissä on vähintään yksi kaksoissidos kahden hiiliatomin välillä.

Synteettisten kylmäaineiden etuina ovat niiden turvallisuusominaisuudet, sillä ne eivät ole ihmiselle välittömästi myrkyllisiä, eikä ne ole palavia tai ne ovat heikosti palavia. Etuna voidaan pitää myös sitä, että synteettisiin kylmäaineisiin perustuvat lämpöpumput ovat tähän asti olleet investointikustannuksiltaan edullisempia, kuin luonnollisiin kylmäaineisiin perustuvat lämpöpumput, koska niitä on ollut hyvin saatavilla ja niissä on ollut enemmän kilpailua valmistajien kesken.

HFC- ja HFO-aineet kuuluvat laajaan PFAS-yhdisteiden (Per- ja polyfluoratut alkyylilyhdisteet) joukkoon, joista tunnetuin on luultavasti PTFE (Polytetrafluorieteeni), eli Teflon. PFAS-yhdisteiden ongelmat liittyvät ilmakehään päästessään erittäin pysyviin hajoamistuotteisiin, jotka kertyvät ympäristöön ja ihmisiin tai ne voivat muodostaa vaarallisia happoja.

Synteettiset kylmäaineet ovat kilohinnoiltaan kalliimpia kuin luonnolliset kylmäaineet (hiilidioksidi, ammoniakki, propani, butaani) ja niiden hintakehitystä on vaikea ennustaa F-kaasuasteuksen tiukentuvien rajoitusten myötä. Tähän asti synteettisten kylmäaineiden kilohinnat ovat olleet nousussa ja niiden hinnat todennäköisesti nousevat jatkossakin. Lisäksi suuria teollisuuskokoluokan lämpöpumppuja koskee myös säännölliset vuototarkastukset 3:n, 6:n tai 12 kk välein riippuen



kylmäainetäytöksen määrästä. Taulukkoon 2 on koottu synteettisten kylmäaineiden hyviä ja huonoja puolia.

**Taulukko 2 Synteettisten kylmäaineiden hyviä ja huonoja puolia.**

Hyvät puolet	Huonot puolet
Turvallisuusominaisuudet, yleensä palamattomia A1 luokan kylmäaineita	F-kaasuasetuksen rajoitukset korkean GWP-arvon kylmäaineille
Koeteltua tekniikkaa, markkinoilla paljon valmistajia ja kilpailua	Poliittiset riskit: Mahdollinen PFAS-kielto viireillä. Voiko F-kaasuasetus vielä tiukentua tulevaisuudessa?
Paljon vaihtoehtoja eri sovelluskohteisiin	Hintariski: synteettisten kylmäaineiden hintakehitystä on vaikea ennustaa, kun markkinoilla siirrytään enenevässä määrin regeneroituihin, eli talteen otettuihin ja kierrätettyihin kylmäaineisiin.

### 5.1.2 Uusi F-kaasuasetus

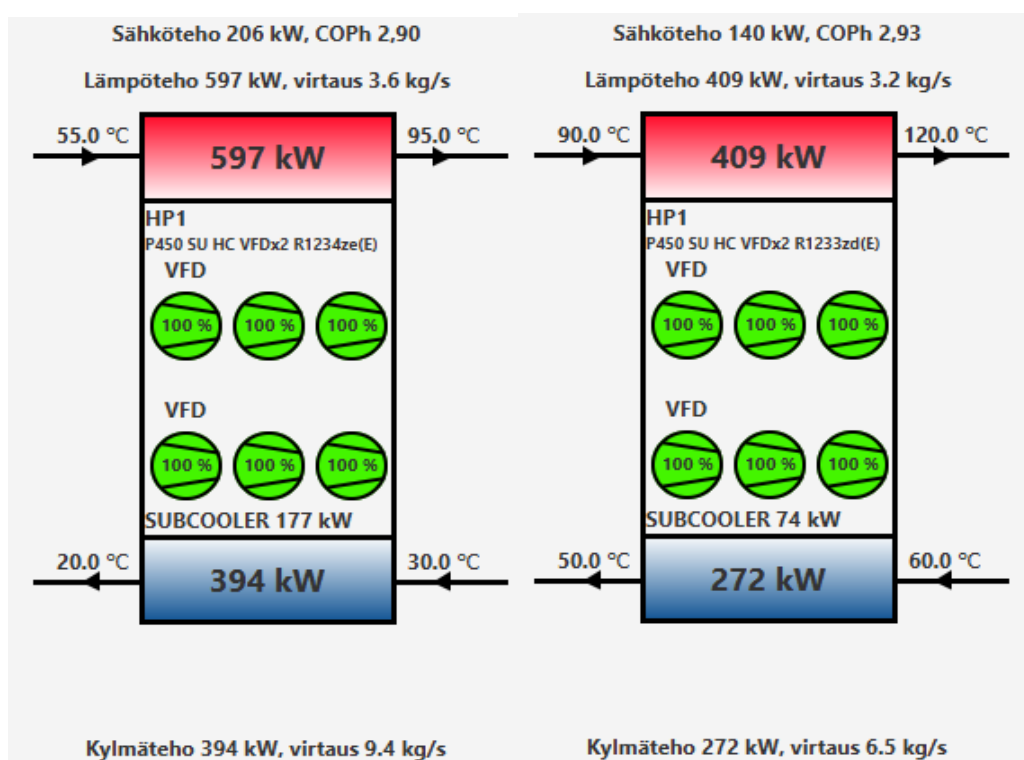
11.3.2024 voimaan astunut F-kaasuasetus (EUROOPAN PARLAMENTTI, 2024) kumoaa edellisen, 1.1.2015 voimaan tulleen asetuksen (EUROOPAN PARLAMENTTI, 2015) ja tulee rajoittamaan ns. F-kaasujen, eli fluorattujen hiilivetyjen käyttöä nopealla aikataululla ja lopettamaan niiden käytön kokonaan uusissa asennuksissa vuodesta 2050 alkaen.

F-kaasuasetusta ei tule sekoittaa EU:n kemikaaliasetus REACH:iin (engl. Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals), johon on esitetty rajoituksia PFAS-yhdisteiden valmistukseen, markkinoille saattamiseen ja käyttöön (ECHA, 2023). Jos esitetty PFAS-kielto astuisi tulevaisuudessa voimaan, niin se kieltäisi myös fluorattuihin hiilivetyihin perustuvat kylmäaineet.

F-kaasuasetus ei kiellä PFAS-yhdisteitä, vaan rajoittaa kylmäainekäytössä olevien synteettisten kylmäaineiden EU:n markkinoille saattamista enimmäismäärän kautta. Fluorihiiivedyille on määritetty asetuksessa vuosittain tiukentuva enimmäismäärä markkinoille saattamiseen, joka laskeaan hiilidioksidiekvivalenttonneina. Lisäksi kylmäaineiden käyttöä tiukennetaan eri sovelluskohteissa GWP-arvoihin perustuen. Uusi F-kaasuasetus on melko vaikeaselkoinen ja siinä esitetyt taulukot ja poikkeukset GWP-arvoihin eri sovelluskohteissa on luettava tarkkaan, kun asetusta tulkitaan.

### 5.1.3 Esimerkkejä teollisuuden sovelluskohteista synteettisillä kylmäaineilla

Tyypillinen teollisuuden lämpöpumppusovellus tuottaa lämmintä vettä ja hyödyntää lämmönlähteenään viileämpää vettä, jolloin puhutaan neste-neste lämpöpumpuista. Parhaimmillaan teollisuuden lämpöpumpuilla tuotetaan jäähdytys ja lämmitys yhdistetysti samalla lämpöpumpulla. Kuvassa 4 on esimerkki Oilon P450 -lämpöpumpun toiminnasta kylmäaineilla R1234ze (vasemmalla) ja R1233zd (oikealla) eri lämpötilatasoilla. Lämpötilaerot jäähdytetyn ja lämmitetyn veden välillä on 70 tai 75 astetta. Höyrystimellä tapahtuvassa lämmöntalteenotossa lämpötilaero on molemmilla 10 astetta ja lämpökerroin on molemmissa tapauksissa noin 2,9. Vaikka samalla lämpöpumpulla tuotettu lämpötilannosto ja hyötysuhde ovat molemmissa tapauksissa lähes samat, niin R1234ze:llä lämpöpumpun teho on 46 % suurempi kuin R1233zd:llä, mikä havainnollistaa hyvin eri kylmäaineiden eroja ja suorituskykyä, vaikka niitä käytettäisiin niille sopivilla lämpötila-alueilla.



Kuva 4 Esimerkki saman Oilon P450 -lämpöpumpun toiminnasta eri kylmäaineilla eri toimintalämpötiloissa. (Oilon Technology Oy, 2023)

Fortumin Vermon ilma-vesilämpöpumppulaitos Espoossa (Fortum Oyj, 2024; Suomen Kylmäyhdistys, 2024) on esimerkki edellä esitetyn neste-neste lämpöpumpun ja ilma-vesilämpöpumpun yhdistelmästä. Laitoksessa on 12 kpl Mitsubishi Electric NX2-N-G06-0344-0808 ilma-vesilämpöpumppua, joiden keräämä lämpö jalostetaan kaukolämmöksi Oilon ChillHeat S580 ja P450 -lämpöpumpuilla, joita molempia on laitoksessa 6 kpl. Vermon laitos otettiin käyttöön vuonna 2023 ja sen kaukolämpöteho on 11 MW ja kaukojäähdytysteho 8 MW.

Calefan toimittamat lämpöpuput Sinituotteelle, Mäkelä Alulle ja Kiillolle ovat hyviä esimerkkejä teollisuuden hukkalämpöjen hyödyntämisestä. Sinituotteella hukkalämmön uusiokäyttöjärjestelmä jäähdyttää ruiskuvalukoneissa käytettävää jäähdytysvettä ja siirtää lämmön kiinteistön lämmitykseen. Mäkelä Alulla lämpöpumput hyödyntävät alumiinin puristuslinjan sekä anodisointilaitoksen jäähdytyksestä saatavaa lämpöä ja tuottavat lämpöä takaisin prosessiin ja kiinteistön lämmitykseen. Kiillon Lempäälän tehtaalla on toteutettu kolme lämpöpumppuinvestointia, joista vuonna 2018 valmistunut Retrofit-lämpöpumppujärjestelmä tuottaa liimanvalmistuksen hukkalämmöistä käyttövettä ja kiinteistölämmitystä, vuonna 2019 valmistunut järjestelmä hyödyntää sulateliiman valmistuksen hukkalämmöt ja vuonna 2022 valmistunut AmbiHeat-lämpöpumppulaitos tuottaa lämpöä tehtaan hukkalämmöistä ja ulkoilmasta ilma-vesilämpöpumppuna. Kiillon AmbiHeat-laitos tuottaa lämpöä kesäaikaan myös Lempäälän Lämmölle, jonka kanssa käydään investoinnin jälkeen kaksisuuntaista lämpökauppaa. (Calefa, 2020, 2022b, 2022a, 2024)

#### 5.1.4 Hiilidioksidi

Suomessa hiilidioksidin käyttö on yleistynyt laajemmin vasta 2010-luvulla lähinnä kaupan kylmä- ja jäähallisovelluksissa. Kaupan kylmäkalusteet ja -huoneet ovat tyypillisiä esimerkkejä suorahöyrysteisistä järjestelmistä. Lämmönkeruu suorahöyrysteisellä hiilidioksidijärjestelmällä on energiatehokkaampaa kuin välillisellä järjestelmällä, koska järjestelmässä on vähemmän lämpötilaeroja. Muilla kylmäaineilla suorahöyrysteiset järjestelmät eivät ole niin yleisiä suuremman täytmäärän ja kylmäaineen korkeamman hinnan vuoksi. Ammoniakin ja hiilivetyjen tapauksissa halutaan rajoittaa kylmäainetäytös erilliseen konehuoneeseen.

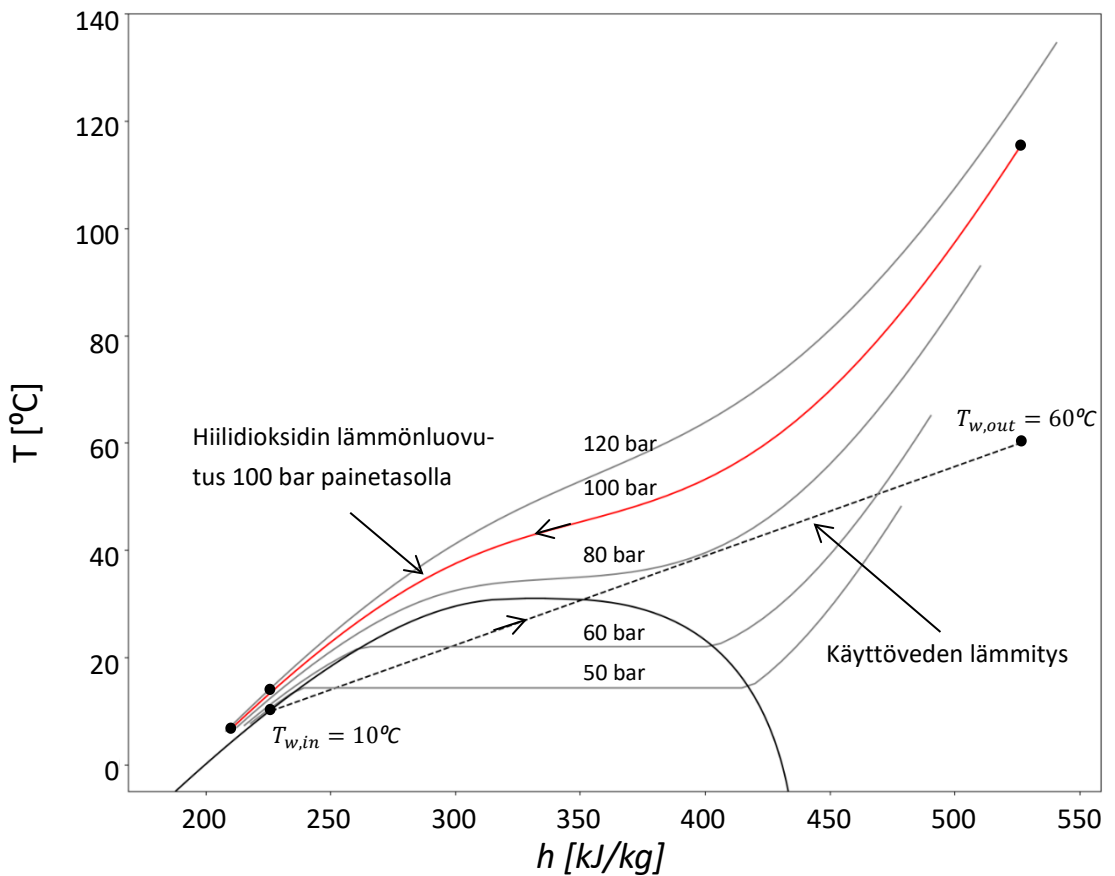
Hiilidioksidijärjestelmien hinnat ovat tulleet alaspäin ja ne ovatkin edullisempia kuin esimerkiksi vastaavan tehoiset ammoniakijärjestelmät, mutta todennäköisesti hieman kalliimpia tai samaa hintaluokkaa kuin HFC-järjestelmät tällä hetkellä. Taulukossa 3 on lueteltu hiilidioksidilämpöpumppujärjestelmien hyviä ja huonoja puolia.

**Taulukko 3 Hiilidioksidin hyviä ja huonoja puolia lämpöpumppukäytössä.**

Hyvät puolet	Huonot puolet
Luonnollinen kylmäaine, GWP-arvo 1 (muiden kylmäaineiden referenssi), ei poliittisia riskejä	Alhainen kriittisen pisteen lämpötila (31,1°C, 73,8 bar), lämpöpumppukäytössä ylikriittinen prosessi
Palamaton ja edullinen A1 luokan kylmäaine	Korkeat painetasot
Laaja käyttöalue, sopii lämpöpumppukäytössä erityisen hyvin suureen veden lämpötilannostoon, esim. 20°C → 90°C	Ylikriittinen lämpöpumppuprosessi vaatii alhaisen paluulämpötilan, korkeintaan n. 35–45°C lämmitettävältä nesteeltä, jotta hyötysuhde olisi hyvä tai kohtuullinen.

Ylikriittinen hiilidioksidiprosessi eroaa tavallisesta alikriittisestä prosessista lämmönluovutuksen osalta. Siinä lämpötila laskee liukuvasti, eikä lauhtumista tapahdu. Tästä syystä lämmönluovutuspiirin paluulämpötila vaikuttaa ylikriittisen hiilidioksidiprosessin hyötysuhteeseen enemmän kuin menolämpötila. Tavallisissa kylmäprosesseissa tilanne on päinvastainen, eli menolämpötila vaikuttaa hyötysuhteeseen eniten, koska se määrittää pitkälti korkeapainetason.

Kuvassa 5 näkyy ylikriittisen hiilidioksidiprosessin lämmönluovutus ja käyttöveden lämmitys 10°C:sta 60°C:een 100 baarin korkeapainetasolla. Suuren lämpötilan noston sijaan lämpöä voidaan luovuttaa myös kahdessa tai kolmessa vaiheessa eri lämpötilatasoissa eri käyttökohteisiin. Korkeapainetasosta riippuvan liukuvan lämmönluovutuksen lämpötilan takia **ylikriittinen hiilidioksidiprosessi ei sovellu höyryntuotantoon**.



**Kuva 5 Ylikriittisen hiilidioksidiprosessin lämmönluovutus 100 bar painetasolla. Muokattu lähteestä. (Takala, 2024)**

Esimerkkejä teollisuuden sovelluskohteista hiilidioksidilla on yhdistetty jäädytys ja lämmitys ja veden lämmitys suurella lämpötilaerolla. Lisäksi markkinoille on ilmestynyt hiilidioksidilla toimivia ilma-vesilämpöpumppuja. IVLP esimerkkejä ovat Finess Energy Oy:n toimittama 340 kW ilma-vesilämpöpumppujärjestelmä Riihimäen Kaukolämpö Oy:lle, joka näkyy kuvassa 6 (Finess Energy Oy, 2024) ja Advansor A/S:n 600 kW ValueBox 600 ilma-vesilämpöpumppu Advansorin tehtaalla

Tanskassa, joka näkyy kuvassa 7 (Advansor A/S, 2024). Finess Energyn IVLP-järjestelmä koostuu kolmesta 100 kW ja yhdestä 40 kW ilma-vesilämpöpumpusta sekä varaajista sähkövastuksilla. Advansorin ValueBox 600 on tehdasvalmisteinen ja valmis työmaalle tuotava kokonaisuus, eli ns. Plug&Play -tyyppinen ratkaisu, johon kytketään sovelluskohteessa nesteputket. ValueBox 600 maksimilämpötila menovedelle on 95°C ja se on lämpötehoaan 600 kW, kun ulkolämpötila on +2°C ja noin 450–470 kW, kun ulkolämpötila on -20°C.

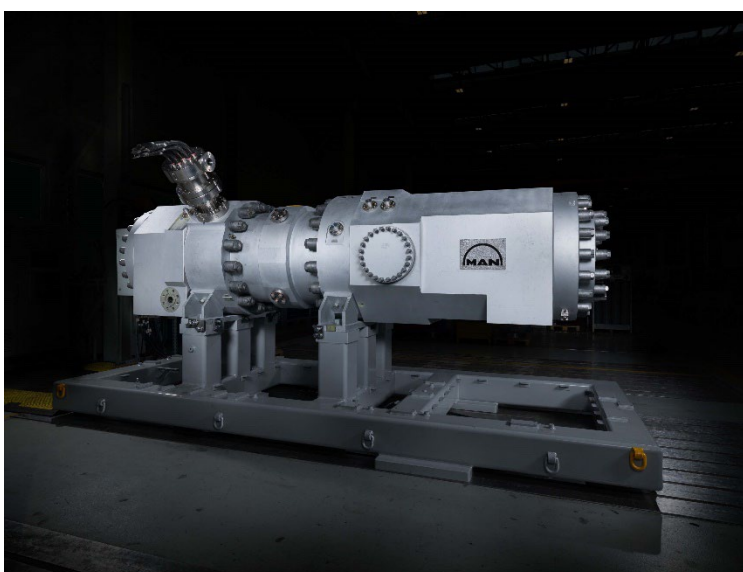


**Kuva 6 Kolme 100 kW:n CO<sub>2</sub> -ilmavesilämpöpumpua Riihimäellä. (Finess Energy Oy, 2024)**



**Kuva 7 Advansor ValueBox 600. (Advansor A/S, 2024)**

Edistyneintä CO<sub>2</sub>-tekniikkaa edustaa MAN Energy Solutionsin HOFIM® CO<sub>2</sub>-kompressori, joka on öljytön ja magneettilaakeroitu turbokompressori. Sen korkeapainetta ja kuumakaasun lämpötilaa ei siten rajoita kompressoreissa käytettävien öljyjen lämpötilankesto. Tähän uuteen kompressoritekniikkaan perustuvia lämpöpumppuesimerkkejä ovat Tanskassa Aalborg Forsyningille rakennettu maailman suurin kaukolämpöä tuottava 134 MW merivesilämpöpumppulaitos (MAN Energy Solutions, 2023a), joka tuottaa 1-15°C merivedestä kaukolämpöä 98°C lämpötilaan asti sekä Helenille Helsinkiin toimitettava maailman suurin, 33 MW ilma-vesilämpöpumppulaitos (MAN Energy Solutions, 2024a), joka tuottaa ilmasta lämpöä 90°C lämpötilaan asti. Näillä kompressoreilla ja lämpöpumppujärjestelmillä on kyky osallistua sähkön säätömarkkinoille ja sähköverkon tasapainottamiseen. Kompressorin ylösajo 50 %:n tehosta 100 %:n tehoon vie alle 30 sekuntia ja verkon tasapainotustoiminnon aktivointi ja alasajo 100 %:n moottoritehosta 25 %:n moottoritehoon vie alle 30 sekuntia. MAN Energy Solutionsin HOFIM® CO<sub>2</sub>-kompressori näkyy kuvassa 8.



**Kuva 8 MAN HOFIM® CO<sub>2</sub>-kompressori (MAN Energy Solutions, 2024a).**

#### 5.1.5 Ammoniikki

Ammoniakin sovelluskohteet löytyvät tyypillisesti teollisuudesta, jossa ammoniakkikylmäkoneiden/-lämpöpumppujen tehot ovatkin tyypillisesti muutamasta sadasta kilowatista aina megawattiluokkaan asti. Ne eivät sovellu pieniin kilowattiluokan järjestelmiin suhteellisen korkeiden investointikustannusten vuoksi. Itse kylmäaineammoniakin hinta on huomattavasti edullisempi kuin HFC-kylmäaineiden, eikä ammoniakin käyttöön liity poliittisia riskejä.

Esimerkkejä ammoniakkikylmäkone/-lämpöpumppujärjestelmistä teollisuudesta ovat elintarviketeollisuuden jäähdytys- ja lämmityssovellukset sekä kaukolämmön ja lämpimän veden tuotanto. Ammoniakkijärjestelmät ovat tyypillisesti neste-neste lämpöpumppuja, jolloin kylmäaineen täytösmäärä pysyy pienenä ja rajautuu konehuoneeseen. Elintarviketeollisuuden ammoniakkilämpöpumppuesimerkkinä toimii Valion Seinäjoen tehtaan uusi lämpöpumppujärjestelmä, jonka lämpöteho on 2,8 MW ja jäähdytysteho 2,2 MW (Valio Oy, 2024). Lämpöpumppu kerää

lämpöä kylmälaitoksen lauhdekierrosta, jota se samalla jäähdyttää sekä maidon haihdutusprosessin jäähdytysjärjestelmästä, joista se tuottaa 80°C menovettä lämmitysverkostoon. Taulukossa 4 on ammoniakkilämpöpumppujärjestelmien hyviä ja huonoja puolia.

**Taulukko 4 Ammoniakin hyviä ja huonoja puolia lämpöpumppukäytössä.**

Hyvät puolet	Huonot puolet
Luonnollinen kylmäaine, GWP-arvo 0, ei poliittisia riskejä	Myrkyllinen ja lievästi syttyvä B2L luokan kylmäaine
Energiatehokas ja edullinen kylmäaine	Korkeat painetasot lämpöpumppukäytössä
Laaja käyttöalue, sopii lämpöpumppukäytössä noin 90°C lämpötilatasolle asti tällä hetkellä	Investointikustannus ammoniakkilämpöpumpuissa on tyypillisesti korkeampi kuin muilla kylmäaineilla vastaavilla tehoilla.
Koeteltua tekniikkaa jäähdytyssovelluksissa	

#### 5.1.6 Hiilivedyt, isobutaani ja propaani

Hiilivedyt ovat luonnollisia kylmäaineita ja niillä toimivien lämpöpumppujen kysyntä ja tarjonta on lisääntynyt viime vuosina luonnollisten kylmäaineiden poliittisesti vakaan tulevaisuuden takia. Hiilivetyjen käyttöä ja kehitystä on rajoittanut niiden syttyvyys ja palavuus, mutta siirtymä kohti luonnollisia kylmäaineita alkaa näkyä myös hiilivedyillä toimivien lämpöpumppujen kehityksessä ja saatavuudessa.

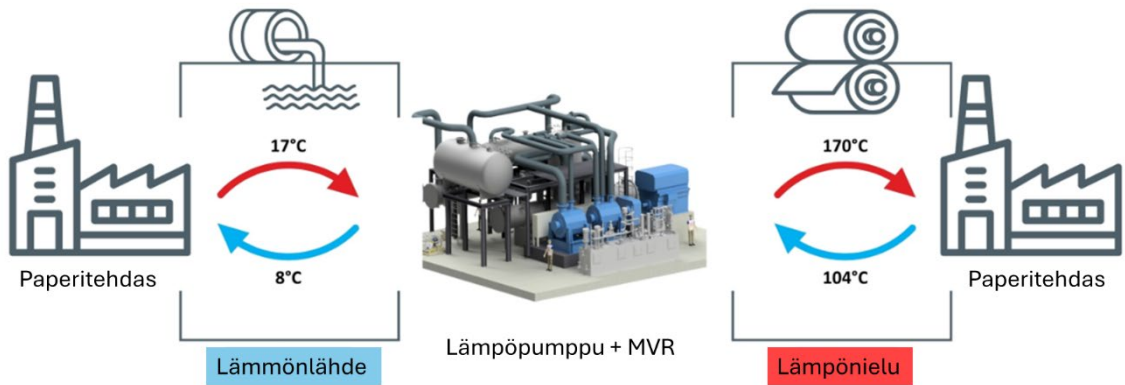
Hiilivedyistä yleisimpiä kylmäainekäytössä ovat propaani (R290) ja isobutaani (R600a). Isobutaanilla toimivia lämpöpumppuja ei ole vielä kovin paljoa markkinoilla, mutta kehitystyö niiden parissa on kovassa vauhdissa ja lähivuosina on odotettavissa uusia hiilivetyihin perustuvia lämpöpumppuja. Näistä propaani toimii alemmissa lämpötiloissa ja sopii esimerkiksi kiinteistöjen lämmitykseen. Propaanilla toimivia lämpöpumppuja löytyy jo markkinoilta kiinteistön lämmitystaroituksiin. Alemmilla lämpötilatasoilla toimivalla propaanilämpöpumpulla voidaan myös tuottaa lämpöä lämmönkeräyspiiriin, jonka isobutaanilla toimiva lämpöpumppu jalostaa noin 100°C lämpötilaan. Hiilivedyillä toimivat teollisuuskokoluokan lämpöpumput ovat ja tulevat olemaan tyypillisesti neste-neste lämpöpumppuja.

Esimerkkejä teollisuuden sovelluskohteista on kaukolämmön ja lämpimän veden tuotanto sekä tulevaisuudessa mahdollisesti höyryntuotanto isobutaanilämpöpumpun ja höyrykompressorin yhdistelmällä. Italialaisella lämpöpumppu- ja ORC-järjestelmien valmistaja Turbodenillä on meillä projektin Pohjois-Euroopassa, jossa isobutaania ja isopentaania käyttävän lämpöpumpun



ja höyrykompressorin (MVR) yhdistelmällä paperitehtaan hukkalämmöistä tuotetaan 3,5 bar höyryä. Lämpöpumpun ja höyrykompressorin yhdistelmän hyötysuhde (COP) on 2 (Thapa, 2023; Turboden S.p.A., 2024). Kuvassa 9 on havainnollistava kuva kyseisestä projektista ja taulukkoon 5 on koottu Isobutaanin ja propaanin hyviä ja huonoja puolia lämpöpumpunkäytössä.

Metsäteollisuusyhtiön kohde (Rakenteilla)



**Kuva 9 Lämpöpumpun ja höyrykompressorin yhdistelmän periaatekuva rakenteilla olevasta paperitehdas-kohteesta. Muokattu lähteestä. (Turboden S.p.A., 2024)**

**Taulukko 5 Isobutaanin ja propaanin hyviä ja huonoja puolia lämpöpumpunkäytössä.**

Hyvät puolet	Huonot puolet
Luonnollisia kylmäaineita, GWP-arvot 3, ei poliittisia riskejä	Korkean syttyvyyden A3 luokan kylmäaineita
Sopivat kohteisiin, joissa lämmönlähteessä ja lämmönluovutuksessa on pienet lämpötilaerot	Kehitystyö vielä käynnissä, eikä isobutaanilla toimivia korkean lämpötilan lämpöpumppuja ole vielä paljoa markkinoilla. Näitä kuitenkin tullaan todennäköisesti näkemään lähitulevaisuudessa enemmänkin.
Isobutaanilla ja propaanilla omat selkeät käyttöalueet, isobutaani sopii lämpöpumpunkäytössä jopa yli 100°C lämpötilatasoille asti ja propaani alemmille tasoille 70°C menolämpötiloihin asti.	Propaanilla ja isobutaanilla toimivat lämpöpumput kytkettävä sarjaan tai kaskadikytkennällä, jos halutaan tuottaa korkeita lämpötiloja matalalämpöisistä lämmönlähteistä. Tämä monimutkaistaa kytkentää.



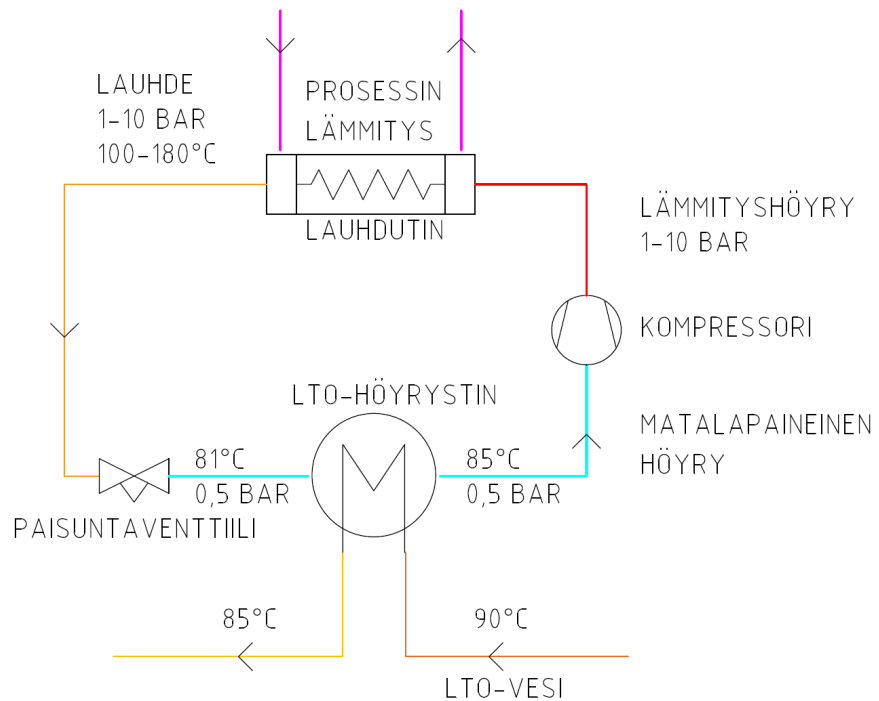
### 5.2.1 Suora MVR-kytkentä ilman lämpöpumpua

Hukkalämpöjen hyödyntäminen höyryn tuotannossa onnistuu ilman lämpöpumpua, jos hukkalämpöjä on tarjolla suhteellisen korkeilla lämpötilatasoilla. Kun lämpötilataso on noin 80-90°C, on höyryn tuotanto suoralla MVR-kytkennällä (engl. Mechanical Vapor Recompression), eli höyrykompressorilla teknisesti yksinkertaisin ja hyötysuhteeltaan paras ratkaisu. Prosessi on periaatteessa samanlainen kuin lämpöpumpuilla, eli kyseessä on teknisessä mielessä lämpöpumpu, mutta kierto-/kylmäaineena käytetään vettä (R718).

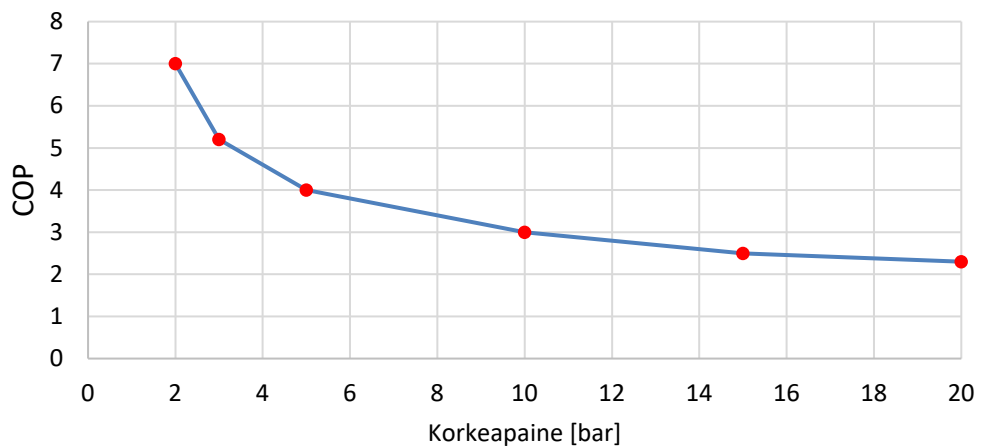
Kiertoprosessissa vesi höyrystetään LTO:n avulla hieman alipaineisena ja puristetaan kompressorilla haluttuun paine- ja lämpötilatasoon. Höyrystyslämpötiloissa 80°C ja 90°C veden painetasot ovat noin 0,5 ja 0,7 bar. Höyryn tuotanto komessoreilla onnistuu noin 20 bar painetasolle asti, mutta painesuhde vaikuttaa laitteiston kokoon ja puristusportaiden määrään.

Alemmilla paineilla ja höyrystyslämpötiloilla veden ominaistilavuus kasvaa, mikä tarkoittaa, että kompressorin ja laitteiston koko kasvaa puristettavaa massavirtaa kohden ja investointikustannukset kasvavat. Alempien lämpötilojen hukkalämpöjen hyödyntäminen suoralla höyrykompressorikytkennällä ei ole välttämättä kovin kannattavaa, vaan silloin kyseeseen voi tulla lämpöpumpun ja höyrykompressorin yhdistelmä. (MAN Energy Solutions, 2023b, 2024c; Piller Blowers & Compressors GmbH, 2024)

Kuvassa 10 on periaatekuva suorasta höyrykompressorikytkennästä, jossa hyödynnetään 90°C:ssa olevaa hukkalämpöä höyrystämällä vettä 81°C:ssa. Kiertoprosessin COP riippuu puristussuhteesta, eli mitä korkeampipaineista höyryä tuotetaan, sitä huonompi COP kiertoprosessilla on. Kuvassa 11 näkyy vesihöyryprosessin COP-arvot eri korkeapaineilla, kun höyrystyminen tapahtuu lämpötilassa 81°C (0,494 bar), tulistus ja alijäähdytys on 5 K, kompressorin isentrooppinen hyötysuhde on 0,85 ja sähkömoottorin hyötysuhde on 0,9.



**Kuva 10** Prosessikaavioesimerkki suorasta MVR-kytkennästä



**Kuva 11** Vesihöyryprosessin COP korkeapaineen funktiona, kun höyrytymislämpötila on 81°C.

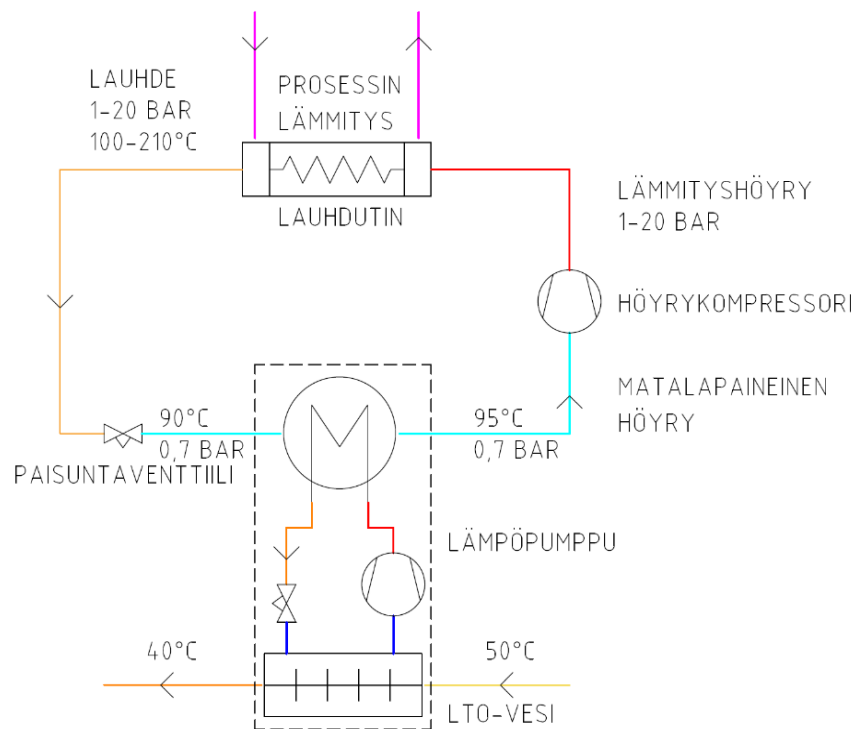
MVR-tekniikan tyypillisiä käyttökohteita ovat haihdutusprosessit, joissa vettä haihdutetaan va-  
kiopaineessa ja -lämpötilassa nesteestä, jota halutaan väkevöidä. Eräs tyypillinen käyttökohde  
MVR-tekniikalle ovat sellutehtaiden haihduttamot, joissa sellunkeitosta jäänyt mustalipeä väke-  
vöidään korkeaan kuiva-ainepitoisuuteen, jonka jälkeen se poltetaan soodakattilassa. Tuore

sellutehdasesimerkki MVR-tekniikasta löytyy Kotkamillsin Kotkan tehtaalta, jossa uuteen haihduttamoon toteutettiin MVR-haihdutus suljetulla höyrykierrolla, mikä puolitti tehtaan höyrynkulutuksen (Adven, 2024). Toinen käytännön esimerkki Suomesta on Advenin toteuttama MVR-haihduttamo Finnamyyl Oy:lle (Adven, 2020). Finnamyylin MVR-haihduttimella väkevöidään perunaproteiinin erotuksessa ylijäänyttä solunestettä haihduttamalla vettä, jonka lämpöä kierrätetään suljetulla MVR-kierrolla lauhduttamalla haihtunut vesi ja siirtämällä lämpö takaisin haihduttimeen.

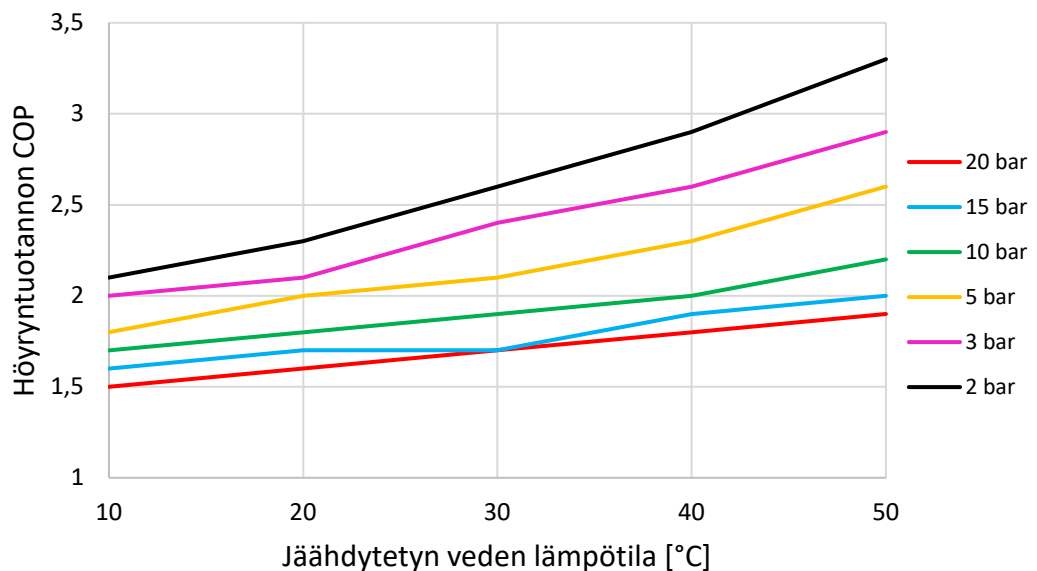
### 5.2.2 Lämpöpumpun ja höyrykompressorin yhdistelmä

Alemmilla lämpötilatasoilla olevien hukkalämpöjen hyödyntäminen ja jalostaminen höyryksi onnistuu lämpöpumpun ja höyrykompressorin yhdistelmällä. Tämän kytkennän huono puoli on järjestelmän monimutkaisuus verrattuna suoraan kytkentään. Kytkennässä lämpöpumpun lämmönlähde on alemman lämpötilatason hukkalämpö ja lämpöpumpulla höyrystetään vettä esimerkiksi 80–120°C lämpötilatasolla. Kuvassa 12 on prosessikaavioesimerkki lämpöpumpun ja höyrykompressorin yhdistelmästä.

Kuvaan 13 on koottu höyryntuotannon laskennallisia COP-arvoja eri korkeapaineilla ja lämmönlähteiden menolämpötiloilla (esim. jäähdetytyn veden lämpötila), kun lämpöpumpussa käytetään kylmäaineena ammoniakkaa. Laskennassa veden höyrystyminen tapahtuu lämpötilassa 90°C ja asteisuus on 5 K, ammoniakkompressorin isentrooppinen hyötysuhde on 0,80, höyrykompressorin isentrooppinen hyötysuhde on 0,85 ja sähkömoottorien hyötysuhde on 0,9. Taulukossa olevat arvot ovat laskennallisia, eivätkä edusta suoraan mitään olemassa olevaa sovellusta.



**Kuva 12** Prosessikaavioesimerkki lämpöpumpun ja höyrykompressorin yhdistelmästä.



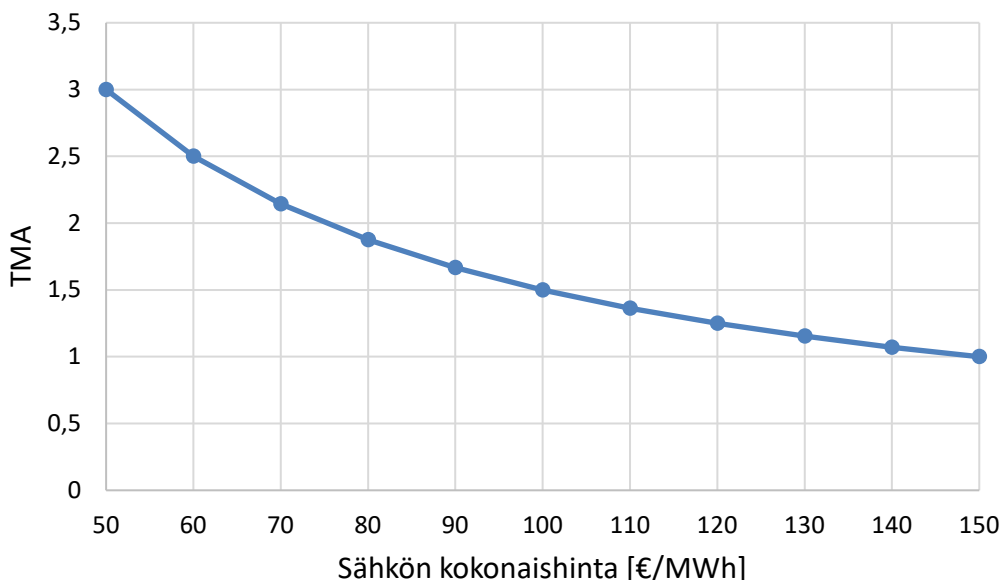
**Kuva 13** Lämpöpumpun ja höyrykompressorin yhdistelmän COP-arvoja jäähdytetyn hukkalämpöveden lämpötilan funktiona, kun höyryä tuotetaan eri painetasoille.

Lämpöpumpun ja höyrykompressorilla tuotetun höyryn COP-arvot vaihtelevat 1,5 ja 3,3 välillä. Jos tuotetaan yli 5 baarin höyryä, niin alemmilla lämmönlähteen lämpötilatasoilla COP-arvot tippuvat jo alle kahden. Lisäksi 20 baarin höyryntuotannon COP on aina alle 2, kun jäädytetyn veden lämpötila on 50°C tai alle.

Korkeapaineisen höyryn tuotannossa on hyötysuhteiden lisäksi huomioitava laitteiston investointikustannukset, jotka nousevat lisääntyvien puristusportaiden myötä. Höyryä tuottava sähkökattila on todennäköisesti järkevämpi vaihtoehto 10–20 bar höyryn tuottamiseksi, jos sähköä on saatavilla järkevään hintaan ja mikäli sähkökattilan vaatima sähköliittymän koko ei ole ongelma.

Suurempien, noin 50 MW tehoisten höyryntuotantolaitosten kannattavuutta voidaan arvioida hyötysuhteen ja investointikustannusten avulla. Kaukolämpöä tuottavien sähkökattiloiden ominaisinvestoinnit ovat Suomessa suuruusluokaltaan 0,1–0,2 M€/MW (Etelä-Savon Energia Oy, 2023; Tampereen Energia, 2023). Höyryä tuottavan sähkökattilan ominaisinvestoinnin voidaan olettaa olevan samaa suuruusluokkaa kuin kaukolämpöä tuottavien sähkökattiloiden ja niiden hyötysuhteeksi voidaan olettaa karkeasti 1. Lämpöpumpun ja höyrykompressorin yhdistelmä, joka tuottaa 3,5 bar höyryä 60°C lämmönlähteestä hyötysuhteella 2,8, ominaisinvestointi on 0,8 M€/MW (MAN Heat pumps for industrial processes, 2024).

Teollisuuskokoluokan ammoniakkilämpöpumpun ja höyrykompressorin ominaisinvestointi on siis noin neljä kertaa kalliimpi kuin sähkökattilan. Kuvassa 14 on esimerkkilaskelma 50 MW höyryä tuottavan lämpöpumpun ja höyrykompressorin yhdistelmän takaisinmaksuajasta sähkökattilaan verrattuna lämpökertoimella 3, kun laitosten huipunkäyttöaika on 6000 tuntia vuodessa. Takaisinmaksuajassa ei ole huomioitu mahdollisia sähköverkon tasapainottamiseen liittyviä tuloja, joita saadaan ylös- ja alassäädöstä, joita molemmilla vaihtoehdoilla on mahdollista tehdä.



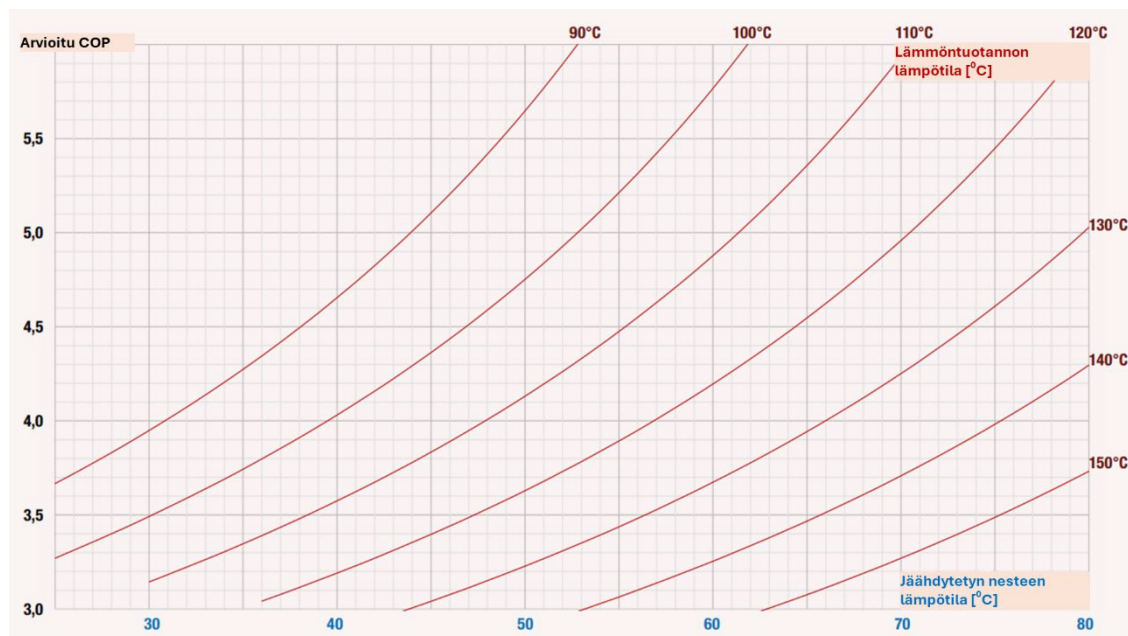
**Kuva 14 Teholtaan 50 MW höyryä tuottavan ammoniakkilämpöpumppu+höyrykompressorin -yhdistelmän takaisinmaksuajasta sähkökattilaan verrattuna sähkön hinnan funktiona, kun huipunkäyttöaika on 6000 h/a ja höyryntuotannon hyötysuhde on 3.**

### 5.2.3 Höyryn tuotanto lämpöpumpulla

Pelkällä lämpöpumpullakin on mahdollista tuottaa höyryä pienillä höyrynpaineilla ja -lämpötiloilla. Käytännössä tällä hetkellä ainoat vaihtoehdot kylmäaineiksi ovat synteettiset kylmäaineet R1233zd ja R1336mzz, joiden käyttöalueet ulottuvat 150–160 °C asti. Niillä olisi teoriassa mahdollista tehdä 3–5 bar (n. 130–150 °C) höyryä.

Luonnollisista kylmäaineista ammoniakki ja isobutaani sopivat termodynaamisilta ominaisuuksiltaan höyryn tuotantoon noin 100–115°C lämpötiloihin asti, mikä vastaa höyrynpaineita 1–1,5 bar. Isobutaanin ja ammoniakkin kohdalla molemmissa kehitystyö on vielä käynnissä yli 100°C lauhtumislämpötiloihin pääsemiseksi. Ammoniakilla toimivat lämpöpumput kykenevät tällä hetkellä noin 100°C lauhtumislämpötiloihin, mikä vastaa noin 60 baarin painetasoa. Kustomoiduilla ammoniakkilämpöpumpuilla voidaan tällä hetkellä tuottaa esim. 120°C höyryä höyrystämällä vesi 80–90°C lämpötilatasossa ja puristamalla alipaineinen höyry haluttuun lämpötilaan ja paineeseen, kuten edellä olevissa esimerkeissä esitettiin (Natural Refrigerants, 2023).

Höyryä tuottavia lämpöpumppeja on vielä tällä hetkellä asennettu melko vähän ja pitkään toimineita referenssikohteita ei juuri ole. Saksalaiselta valmistajalta SPH:lta (Sustainable Process Heat) löytyy muutama vuonna 2024 toimitettu referenssi, joissa noin 90°C lämmönlähde jäähdytetään noin 70°C:een, joissa tuotetaan 1,5 ja 2,0 bar höyryä COP-arvoilla 5,5 ja 4,4 (SPH, 2024). Toinen esimerkkivalmistaja on ranskalainen Enertime, joka käyttää korkean lämpötilan lämpöpumpuissaan R1233zd kylmäainetta (Enertime, 2023). Kuvassa 15 näkyy Enertimen arvioimia COP-arvoja kuuman veden tai höyryn tuotannolle lämmönlähteen ja lämpönielun lämpötilan mukaan.



Kuva 15 Höyryä tai kuumaa vettä tuottavan korkean lämpötilan lämpöpumpun arvioituja COP -arvoja jäähdytetyn lämmönlähteen lämpötilan ja tuotetun höyryn tai kuuman veden lämpötilojen mukaan. Muokattu lähteestä (Enertime, 2023).

## 6 Sähköstä lämmöksi -teknologiat ja lämmön varastointi

---

### 6.1 Tuntuvan lämmön varastointi

---

Tuntuvan lämmön varastointi (engl. Sensible Heat Storage, SHS) perustuu lämpötilaeroihin joko kiinteässä tai nestemäisessä faasissa. Varasto on täynnä, kun väliaine on lämmitetty suunniteltuun maksimilämpötilaan ja varasto on tyhjä, kun väliaineen lämpötila on suunnitellussa minimissään tai sen lämpötila on järjestelmän paluulämpötilassa.

Tuntuvan lämmön varastoinnissa ei tapahdu faasimuutosta, vaan lämpöenergia varastoidaan lämmittämällä varaston nestemäistä tai kiinteää ainetta, kuten vettä tai hiekkaa. Varastot voivat olla kytketty suoraan tai välillisesti kulutuskohteeseen.

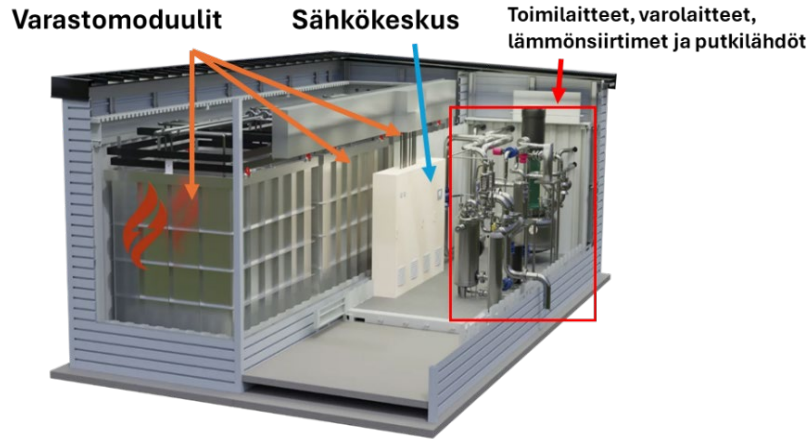
Esimerkki suorasta kytkennästä ovat kaukolämpöakut, jotka kytketään suoraan kaukolämpöverkkoon niin, että akussa vesi muodostaa lämpötilakerrostuman korkeussuunnassa, kun akkua puretaan tai ladataan. Kun akkua ladataan, niin akun alaosaan pumpataan vettä lämmönvaihtimeen, lämpöpumppuun tai sähkökattilaan, josta se johdetaan akun yläosaan. Akkua purettaessa pumpaus tapahtuu päinvastaiseen suuntaan, eli akun yläosaan pumpataan lämmintä vettä verkkoon ja verkosta pumpataan paluuvettä akun alaosaan.

Energiayhtiöillä on mahdollisuus rakentaa suuriakin kausivarastoja isojen lämpöverkkojensa ansiosta. Energiayhtiöiden isoista vesilämpövarastoista esimerkkinä Suomessa toimii Helenin lämpövarasto, joka rakennettiin vanhojen öljyvarastojen tilalle Mustikkamaalle (Helen Oy, 2021) sekä suunnitteilla oleva Vantaan Energian lämpövarasto kehä III:n alle (Vantaan Energia Oy, 2024). Tavallisesti vesisäiliöön perustuvilla lämpöakuilla voidaan optimoida energiantuotantoa tunti- ja viikkotasolla. Vesilämpöakkua voidaan lämpötilatasojen puolesta lämmittää myös lämpöpumppuilla, joilla on sähkökattiloita parempi hyötysuhde, mikä mahdollistaa lämpöakun latauksen kannattavasti myös hieman korkeammilla sähköhinnoilla kuin sähkökattilalla, jos lämpöpumpulle on tarjolla sopiva lämmönlähde.

Välillisessä kytkennässä sähköllä lämmitetään esimerkiksi kiinteää väliainetta, kuten hiekkaa, korkeaan lämpötilaan ja lämpöä voidaan hyödyntää esimerkiksi höyryn- tai lämpimän veden tuotannossa välipiirin avulla. Kaupallisia suomalaisia esimerkkejä tuntuvan lämmön varastoinnista kiinteään aineeseen ovat Elstorin ja Polar Night Energyn lämpövarastot.

Elstorin lämpövaraston päätuote on höyry, jonka paine on maksimissaan 16 bar ja lämpötila enintään 250°C. Varasto on kilpailukykyisimmillään, kun sillä tuotetaan höyryä korkeissa lämpötiloissa. Lämpövarastolla voidaan tuottaa myös kuumaa vettä, mutta iso vesisäiliö on tähän tarkoitukseen kustannustehokkaampi vaihtoehto. Varaston lataus tapahtuu sähkövastuksilla, joilla pyritään hyödyntämään sähkön hintavaihteluita varaston mitoituksen määrittämässä rajoissa.

Varastolla voidaan myös osallistua sähkön säätö- ja reservimarkkinoille, koska lataus ja purku ovat toisistaan riippumattomia, eikä höyryntuotanto häiriinny, jos lataus katkaistaan säätö- tai reservimarkkinoille osallistumisen vuoksi. Kuva 16 on havainnekuva Elstorin lämpövarastosta.



**Kuva 16 Havainnekuva Elstorin lämpövarastosta. (Elstor Oy, 2024b)**

Elstorin lämpövarasto on rakenteeltaan modulaarinen ja koostuu 5 MWh varastomoduuleista. Modulaarinen rakenne vaikuttaa varaston maksimi lataus- ja purkutehoon. Varaston koon ollessa 5–15 MWh latausteho on 0,5–2,5 MW ja purkuteho maksimissaan 2 MW. Varaston hyötysuhde sähköstä lämmöksi on 95–97% ja höyryntuotannon lisäksi varastoon on mahdollista yhdistää höyryturbiini ja sähköntuotanto, jolloin voidaan puhua sähkötermisestä varastoinnista (ETES). (Elstor Oy, 2024b, 2024a)

Polar Night Energyn lämpövarasto perustuu kuumaan hiekkaan, joka lämmitetään 600–1000°C lämpötilaan. Hiekka-akusikin kutsuttu lämpövarasto skaalautuu purkuteholtaan 2–100 MW välillä ja varastointikapasiteetiltaan 200–20 000 MWh välillä. Akku ladataan ja puretaan kierrättämällä akussa ilmaa, joka lämmitetään sähkövastuksilla. Myös tähän lämpövarastoon on mahdollista yhdistää höyryturbiini, mutta se luonnollisesti kasvattaa investointikustannuksia ja monimutkaistaa laitosta. Kuvassa 17 on Polar Night Energyn hiekka-akku Vatajankosken voimalaitoksella Kankaanpäässä. (Polar Night Energy Oy, 2024)





**Kuva 17 Kankaanpäähän Vatajankosken voimalaitosalueelle rakennettu ensimmäinen kaupallinen Polar Night Energyn hiekka-akku. (Polar Night Energy Oy, 2022)**

## 6.2 Latentin lämpöenergian varastot

---

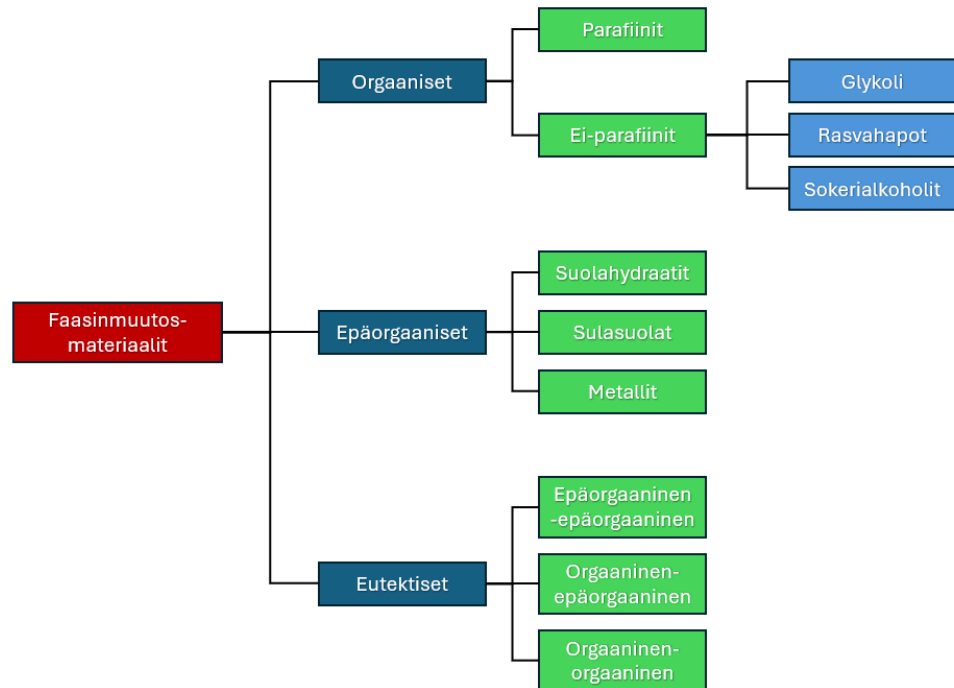
Latentin lämmön varastointi perustuu faasimuutokseen. Varastoa ladatessa ja purkaessa varastointimateriaalissa tapahtuu faasimuutos, tyypillisimmin kiinteän ja nestemäisen faasin välillä. Näistä varastointimateriaaleista käytetään termiä faasinmuutosmateriaalit tai lyhennettä PCM (engl. phase change materiaalit). Esimerkkejä latentin lämmön lämpövarastoista ovat jää/vesi tai jää/vesi-suolaliuoksiin perustuvat varastot, joita käytetään jäähdytyssovelluksissa sekä parafiinit ja epäorgaaniset suolat, joita käytetään korkeampien lämpötilojen varastoinnissa.

Faasinmuutosmateriaalien käytössä lämpövarastona on muutamia etuja verrattuna tuntevan lämmön varastointiin, kuten lämmön varastointi tasaisessa lämpötilassa ja suuri energiatiheys varaston kokoon nähden. Huonot puolet liittyvät esimerkiksi faasinmuutosmateriaalien kestoon pitkäaikaisessa käytössä ja korroosioon.

Faasinmuutosmateriaalit jaetaan orgaanisiin, epäorgaanisiin ja eutektisiin materiaaleihin. Nämä jaetaan edelleen omiin alakategorioihinsa. Orgaaniset faasinmuutosmateriaalit kestävät hyvin faasinmuutoskyyklejä menettämättä termodynaamisia ominaisuuksiaan, mutta niiden huono puoli on alhainen lämmönjohtavuus. Epäorgaaniset faasinmuutosmateriaaleilla on orgaanisia faasinmuutosmateriaaleja parempi lämmönjohtavuus, laajempi lämpötila-alue ja suurempi energiatiheys, eli niiden faasinmuutosentalpia on suurempi. Epäorgaanisten materiaalien huonoja puolia ovat mahdollisesti korroosio eri materiaalien kanssa, hajoaminen ja terminen epästabiilius, joiden takia ne eivät ole yleistyneet laajaan käyttöön. Eutektiset faasinmuutosmateriaalit ovat kahden tai useamman orgaanisen tai epäorgaanisen komponentin seos. Eutektisilla seosaineiden ominaisuuksiin kuuluu eutektinen piste, jossa seos jähmettyy ja sulaa alhaisessa vakio­lämpötilassa, kuten esimerkiksi vesi, joka koostuu yhdestä komponentista. Eutektisten seosten eutektisen pisteen lämpötila ja seossuhde on komponenteistaan riippuvainen. Esimerkiksi veden ja

natriumkloridin eutektinen piste saavutetaan lämpötilassa  $-21,2^{\circ}\text{C}$  pitoisuudella 22,4 %. (Aittomäki and Aalto, 2012; Faraj et al., 2021; Mundra and Pardeshi, 2021)

Faasinmuutosmateriaalien käyttö ei ole laajalti yleistynyt mm. materiaalien hintojen, kemiallisen kestävyuden ja esimerkiksi huonon lämmönjohtavuuden takia. Jokaisen sovelluskohteen kohdalla tulee kuitenkin tarkastella erikseen esimerkiksi lämpötilatasojen osalta, että millaisia faasinmuutosmateriaaleja kohteessa voisi käyttää. Esimerkiksi matalan lämpötilan faasinmuutosmateriaalit sopisivat rakennusten sisälämpötilojen hallintaan jäähdyttämällä sisäilmaa päivällä ja lämmittämällä sisäilmaa yöaikaan. Materiaaleja voidaan käyttää seinissä, katossa, lattiassa tai esimerkiksi ilmanvaihto voidaan johtaa lämpövaraston kautta, jolloin päivällä varastoa ladataan, kun sisäilmaa jäähdytetään ja yöllä varastoa puretaan, kun ilmaa lämmitetään. Faasinmuutosmateriaaleilla voidaankin säästää energiaa esimerkiksi ilmanvaihdon jäähdytyksessä ja lämmityksessä sekä tasoittaa lämmityksen ja jäähdytyksen piikkitehoja ja siirtää kulutusta päiväajalta yöajalle. Kuvassa 18 on faasinmuutosmateriaalien jako eri kategorioihin. (Faraj et al., 2021)



**Kuva 18** Faasinmuutosmateriaalien jako eri kategorioihin. Muokattu lähteistä (Faraj et al., 2021; Mundra and Pardeshi, 2021).

### 6.3 Sähköterminen lämpövarasto

Sähköterminen lämmön varastointi (engl. ETES, Electro-thermal Energy Storage) yhdistää lämmön varastoinnin ja mahdollisuuden tuottaa varastoidulla lämmöllä uudelleen sähköä. Lämmön

varastointi voidaan toteuttaa tuntuvan lämmön tai latentin lämmön lämpövarastona. Sähkön tuotanto voidaan toteuttaa perinteisellä höyryprosessilla tai jollain muulla väliaineella.

Sähköterminen lämpövarasto (ETES) yhdistää lämmön varastoinnin ja sähkön tuotannon mahdollisuuden, kun sähkön hinta on korkea. Tyypillisin tapa tehdä sähköä on Rankine-höyryprosessilla, jossa korkeapaineista vettä höyrystetään lämpövarastolla ja höyry johdetaan turbiiniin, joka tuottaa sähköä. Lauhdutus voidaan tehdä joko kylmävarastoon tai johonkin muuhun ympäristön lämpönieluun. Kiertoprosessi voidaan toteuttaa veden sijasta myös hiilidioksidilla, jota esimerkiksi MAN Energy Solutions käyttää MAN ETES lämpövarastoratkaisussaan, johon on integroitu myös hiilidioksidilämpöpumppu (MAN Energy Solutions, 2024b). Lämpöpumppua hyödyntävä lämpövarasto pystyy tuottamaan samaan aikaan sekä kylmää että kuumaa. Esimerkiksi kylmää voidaan varastoida jää/vesi -säiliöön ja kuumaa vettä kuuman puolen säiliöön.

#### 6.4 Termokemiallisen lämpöenergian varasto

---

Termokemiallinen lämmön varastointi (engl. Thermo-chemical Energy Storage, TCES) perustuu reversiibeihin kemiallisiin reaktioihin, jotka sitovat lämpöenergiaa, kun varastoa ladataan ja jotka vapauttavat lämpöenergiaa, kun varastoa puretaan.

Termokemialliset lämpövarastot (TCES) voidaan jakaa kemiallisten reaktioiden varastoihin ja sorptioprosesseja hyödyntäviin varastoihin. Kemiallisten reaktioiden lämpövarastot varastoivat lämpöenergiaa sitomalla lämpöä endotermisellä reaktiolla, joka hajottaa lähtöaineen reaktiotuotteiksi. Varastoitu energia vapautetaan käyttöön eksotermisellä reaktiolla, joka käyttää lähtöainean endotermisen reaktion lopputuotteita.

Sorptioprosesseja hyödyntävät lämpövarastot perustuvat joko absorptioprosesseihin tai adsorptioprosesseihin. Absorptioprosessissa kaasua liukenee nesteeseen ja adsorptioprosessissa kaasua liukenee kiinteään aineeseen. Kaasun liuetessa syntyy liukenemislämpöä, jota muodostuu lämpövarastoa purettaessa. Käänteinen prosessi on desorptio, jossa absorptio- tai adsorptioaineesta höyrystetään vettä lämmittämällä sitä, jolloin lämpövarastoa ladataan.

Termokemialliset lämpövarastot mahdollistavat korkeat lämpötilat ja suuren energiatihedden tuntuvan ja latentin lämpöenergian varastoihin verrattuna, mutta niiden kehitysaste ei ole vielä kovin pitkällä. Ongelmat liittyvät mm. reaktioiden kiertomääriin ja aineiden kustannuksiin.

Älyratkaisuilla tarkoitetaan digitaaliseen teknologiaan ja automaation pohjautuvia järjestelmiä tai järjestelmäkokonaisuuksia, joiden avulla pyritään parantamaan prosessin laatua sekä ohjaamaan energian käytön tehokkuutta ja joustavuutta. Tällaisia ratkaisuja ovat esimerkiksi älykkäät mittarit ja sensorit, prosessiin jatkuvaan analysointiin ja optimointiin perustuvat ohjausjärjestelmät, älyverkot sekä älykkäät varastointijärjestelmät. Älyratkaisuihin liittyy olennaisesti myös tekoäly, robotiikka ja mekaniikka. Älyratkaisut ja niiden tuoma ohjattavuus ovat usein niitä teknologioita, jotka mahdollistavat energiatehokkuuden parantamiseen tähtäviä toimia. Älyratkaisujen käyttöaste on tällä hetkellä suomalaisilla pk-teollisuusyrityksillä maltillinen, joten niiden yleistymisellä on potentiaalia (Motiva, 2024). Esimerkkejä teollisuuden älyratkaisuiden hyödyntämisestä ovat materiaalivirtojen ja valmistuksen optimointi, tuotannon automatisointi, robotiikan lisääminen, tuotannonohjauksen ja koneohjauksen yhdistäminen, digitaalinen tuotteiden tunnistus, laadunvarmistus ja seuranta (Motiva, 2024).

Älykäs ohjaus perustuu usein toimintamalliin, jossa tarkasteluprosessiin vaikuttavien tekijöiden ja prosessin ulostulon jatkuvatoimisesta mittauksesta ja seurannasta saatavaa tietoa käytetään prosessin ohjaamiseen. Tiedon perusteella pystytään reagoimaan prosessissa tapahtuviin muutoksiin siten, että prosessin ohjausta muutetaan pyrkien stabiloimaan prosessissa esiintyvien poikkeaminen ja häiriötekijöiden vaikutus. Mittauksista saatava tietoa voidaan käyttää myös prosessin ennakoivaan ohjaukseen, jolla pyritään kompensoimaan ulkopuolisen tekijän vaikutus ennen kuin se ehtii vaikuttamaan prosessin ulostuloon. Digitalisaatio ja tekoäly mahdollistavat prosessissa esimerkiksi reaaliaikaisen tiedonsiirron, etäseurannan ja reagoinnin sekä itseohjautuvan oppimisen ja ennakoivan analytiikan. Tekoälyä hyödynnetään erityisesti kokoamaan tietoa eri tietolähteistä ja -malleista sekä luomaan käyttäjälle malleja ja ennusteita tämän keräämänsä tiedon perusteella. (VTT Oy, 2024a)

Tekoälyn ja tiedonhallintajärjestelmien hyödyntäminen edellyttää tiedonsiirron rajapintojen yhteen tuomista. Monipuoliset liittymärajapinnat mahdollistavat tiedonsiirron ja keskustelun eri seuranta- ja hallintajärjestelmien välillä. Tästä saadaan hyötyjä kuten:

- reaaliaikainen valvonta ja tasehallinta eri rajapintojen välillä
- prosessin ohjaus ja ajosuunnittelmien laadinta ennustetun kysynnän mukaisesti
- suurien tietomäärien automatisoitu käsittely
  - vähentää manuaalisen raportoinnin virhealttiutta ja monimutkaisten taulukkolaskentasovellusten ylläpitotarvetta
  - helpottaa raporttien ja ennusteiden luontia ja ylläpitoa sekä parantaa samalla ennuste tarkkuutta

Lisäksi reaaliaikainen seuranta ja tiedonkeruu luovat työkalun, jonka ansiosta voidaan tuottaa tietoa energiankulutuksen sekä -tuotannon poikkeustilainten hallintaan ja oikeanlaiseen

reagointiin. Reaaliaikainen seuranta ja kulutuksen ennustaminen on tärkeää kohteissa, jotka hyödyntävät erilaisia sähkömarkkinapaikkoja.

Tehokas älyratkaisujen hyödyntäminen mahdollistaa oman energian käytön optimoinnin. Optimointi on tärkeää, jotta energiankulutus ja käytössä olevat resurssit voidaan keskittää sinne, jossa niillä eniten on tarvetta. Tällöin vältetään turhalta resurssien ylikuormitukselta, jolloin saavutetaan myös parempi toimintavarmuus. Samalla omaa energiankulutusta voidaan ohjata esimerkiksi kannattavuuden mukaan ajanhetkiin, jolloin energian tuotantoa on paljon ja saatavuus edullista.

## 7.1 Energianhallintajärjestelmät

---

Energianhallintajärjestelmien avulla on tarkoitus ohjata energiavirtojen kuten sähkön, höyryn ja polttoaineiden käyttöä pyrkien optimoimaan omaa energian tuotantoa ja ostoenergian käyttöä, jota useimmiten ohjaa kustannustehokkuus.

Energianhallintajärjestelmien tyypillisiin ominaisuuksiin kuuluu:

- Energiantuotannon ja -hankinnan sekä energiankulutuksen ja -myynnin reaaliaikainen seuranta.
- Energian käytön ennustaminen toteutuneiden historiatietojen ja tuotannon ajosuunnitelmien perusteella
- Energian hankinnan lyhyen tähtäimen suunnittelu markkinatilanteen ja erilaisten ennusteiden kuten sää- ja pörssiennusteiden perusteella.
- Ajosuunnitelmien hallinta, ohjaus ja raportointi.
- Mahdollistaa liitynnät muihin järjestelmiin.

Ajosuunnitelmaa päivitetään yhtäjaksoisesti energian saatavuuden, -kulutuksen ja hintakehityksen ennusteiden perusteella, pyrkien reagoimaan tarvittaviin muutoksiin oikea-aikaisesti. Kulutuskohteiden osalta tämä optimointimalli tarkoittaa sitä, että kuluttaja säätelee omaa hetkellistä energiankulutustaan energian saatavuuden ja prosessintuotantotilanteen mukaan. Energiaa kannattaa käyttää silloin, kun sitä tuotetaan paljon ja vähäpäästöisesti sekä se on edullista. (Siponen, 2023; Syncron Tech Oy, 2023a, 2023b; VTT Oy, 2024b)

## 7.2 Reservimarkkinat ja kulutusjoustoos osallistuminen

---

Sähköverkon tasapaino edellyttää, että sähkö tuotetaan verkkoon joka hetki yhtä paljon kuin sitä kulutetaan. Tasapainosta kertoo sähköverkon taajuus, joka on tasapainotilassa 50,0 Hz (Fingrid, Reservimarkkinat - Fingrid, 2024). Siirryttäessä kohti uusiutuvaa energiantuotantoa ja sähköntuotannon sääriippuvuuden voimistuessa sekä vastaavasti sähkönkuluttajien lisääntyessä kantaverkon taajuus poikkeaa yhä useammin tavoitearvostaan. Tasapainon ylläpitämiseksi sähkömarkkinaosapuolet suunnittelevat etukäteen kulutuksensa ja tuotantonsa tasapainoon, mutta käyttötunnin aikaisten poikkeamien tasapainotukseen tarvitaan reservejä, joita Fingrid hankkii

ylläpitämiltään reservimarkkinoilta. Reservimarkkinoista on saatavilla laajasti julkista tietoa Fingridin sivuilta. (Finess Energy Oy, 2024b; Fingrid Oyj, 2024b)

#### 7.2.1 **Reservimarkkinatuotteet**

Energiamurroksen edetessä, tarvitsemme yhä enemmän sähkövarastoja sekä muuta taajuussäätöön kykenevää kapasiteettiä. Suomessa käytössä olevat reservituotteet voidaan käyttötarkoituksensa mukaan jakaa kahteen eri ryhmään, joita ovat taajuuden vakautusreservi (FCR, eng. Frequency Containment Reserve), jota käytetään jatkuvaan taajuuden hallintaan ja taajuuden palautusreservi (FRR, eng. Frequency Restoration Reserve), jota käytetään taajuuden palauttamiseen normaalialueelle. Taulukkoon 3 on koottu Fingridin reservimarkkinoilla tarjolla olevat reservituotteet sekä niiden tärkeimmät vaatimukset. Nopeammat automaattiset reservit aktivoituvat automaattisesti verkon taajuuden perusteella tai Fingridin lähettämän signaalin mukaan, kun taas manuaaliset reservituotteet aktivoidaan Fingridin tasehallinnan aktivointikäskystä. (Fingrid Oyj, 2023, 2024a)

Taulukko 6. Fingridin reservimarkkinoiden reservituotteet ja niiden tärkeimmät vaatimukset.

	Reservituote	Aktivointi- nopeus	Minimi tarjouskoko
Taajuuden vakautusreservi (FCR)	<b>Nopea taajuusreservi - FFR (Fast Frequency Reserve)</b>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reservyä käytetään pienen inertian tilanteiden hallintaan</li> <li>Soveltuu kohteille, jonka reserviteho voidaan nopeasti aktivoida täysimääräiseen käyttöön (kohteen tulee kyetä uuteen aktivointiin 15 min kuluessa edellisestä aktivoinnista)</li> </ul> <input checked="" type="checkbox"/> Sähkövarastot / teollinen kulutus / pienkulutus / tuulivoima	0,7...1,3 s ≤ 49,7 Hz / 1,3 s ≤ 49,6 Hz / 1,0 s ≤ 49,5 Hz / 0,7 s	1 MW, aktivoinnin vähimmäis-kesto 5...30 s
	<b>Taajuusohjattu häiriöreservi - FCR-D (Frequency Containment Reserve for Disturbances)</b>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reservyä käytetään suurempien taajuuspoikkeamien hallintaan               <ul style="list-style-type: none"> <li>ylössääto: 49,9–49,5 Hz, alassääto: 50,1–50,5 Hz</li> </ul> </li> <li>Soveltuu kohteille, jonka sähkön tuotantoa on nopeasti mahdollista lisätä tai kulutusta vähentää (Soveltuu sekä dynaamiseen tai staattiseen säätöön)</li> <li>Kohteen tulee kyetä uuteen aktivointiin 15 min kuluessa edellisestä aktivoinnista</li> </ul> <input checked="" type="checkbox"/> Ylössääto: Sähkövarastot / teollinen kulutus / pienkulutus / vesivoima <input checked="" type="checkbox"/> Alassääto: Sähkövarastot / pienkulutus / vesivoima / tuulivoima	< 10 s  Teho: n. 86 % / 7,5 s  Energia: n. 3,2 / 7,5 s	1 MW, aktivoinnin kesto 20–60 min
	<b>Taajuusohjattu käyttöreservi - FCR-N (Frequency Containment Reserve for Normal operation)</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Reservyä käytetään normaalitilan taajuudensäätöä varten (49,9–50,1 Hz)</li> <li>Soveltuu kohteille, jonka sähkötehoa on mahdollista sekä lisätä että vähentää useita kertoja tunnissa (soveltuu vain dynaamiseen säätöön)</li> </ul> <input checked="" type="checkbox"/> Sähkövarastot / teollinen kulutus / pienkulutus / vesivoima / lämpövoima	3 min n. 63 % / 1 min n. 95 % / 3 min	0,1 MW, aktivoinnin kesto 60 min	
Taajuuden palautusreservi (FRR)	<b>Automaattinen taajuuden palautusreservi – aFRR (Automatic Frequency Restoration Reserve)</b>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reservyä käytetään ennalta sovittuina aamu-, ilt- ja yötunteina</li> <li>Soveltuu kohteelle, joka kykenee jatkuvaan tehon säätöön</li> <li>Automaattinen aktivointisignaalin seuranta</li> </ul> <input checked="" type="checkbox"/> Ylössääto: Teollinen kulutus / vesivoima / lämpövoima <input checked="" type="checkbox"/> Alassääto: Tuulivoima / vesivoima / lämpövoima	5 min	5 MW, aktivoinnin kesto 60 min
	<b>Manuaalinen taajuuden palautusreservi – mFRR (Manual Frequency Restoration Reserve)</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Reservillä varaudutaan mitoittaviin vikoihin</li> <li>Soveltuu kohteille, jota voidaan säätää (tuotantoa lisätä tai kulutusta pienentää) nopeasti</li> <li>Manuaalinen aktivointi säätötarjouksen mukaisesti</li> </ul> <input checked="" type="checkbox"/> Ylössääto: Teollinen kulutus / vesivoima / lämpövoima <input checked="" type="checkbox"/> Alassääto: Tuulivoima / vesivoima / lämpövoima	15 min	5 MW, aktivoinnin kesto 60 min (1 MW, jos elektroninen aktivointi)	

Reservimarkkinoiden ansaintamalli perustuu markkinoille tuodun reservikapasiteetin tehoon sekä reservituotteen pysyvyyteen eli tuotteen hankintatunti- ja saatavuusmääriin. Korvaus maksetaan kapasiteetista, osassa tuotteista myös energian aktivoitumisesta. Reservimarkkinoilla käytetään marginaalihinnoittelua, jolloin kallein tarjous määrää hinnan kaikille. (Fingrid, Reserveistä ja reservimarkkinoista, 2024) Mitä edullisemmat tuotantokustannukset ovat, sitä enemmän kohteen on mahdollista saada voittoa. Toteutuneita tuntihintoja ja hankintamääriä on mahdollista seurata Fingridin avoimen datan -palvelusta.

Pääasiallisena reservikaupankäynnin tiedonvaihtovalustana reservitoimittajien sekä Fingridin välillä toimii internetpohjainen Vaksi-järjestelmä. Vaksi järjestelmää käytetään mm. tarjousten jättämiseen, kauppojen hyväksymiseen, ja siellä voidaan hyväksyä säätösähkömarkkinalla pyydettyjä aktivointeja. Tarjouksia voidaan sopimustyyppistä riippuen jättää joko tunneittain tai vuosittain. Reservimarkkinoille osallistuminen edellyttää tuotteesta riippuen 0,1–5 MW minimitarjouskapasiteettia.

### 7.2.2 Reservimarkkinoille osallistuminen

Reservimarkkinoille voivat osallistua sellaiset voimalaitokset, kulutuskohteet ja energiavarastot, jotka kykenevät muuttamaan tehoaan tarpeen mukaan ja jotka ovat suoraan kytkettävissä Suomen sähköverkkoon. Reservimarkkinoille osallistuminen edellyttää Fingridin hyväksyntää kohteen teknisestä ja kaupallisesta soveltuvuudesta ja valmiudesta. Vaadittavat tekniset ominaisuudet koskevat mm. laitoksen kapasiteettia, säätökykyä ja automaation toimintaa. Tekniset vaatimukset määräytyvät reservituotteen mukaan. Näistä tärkeimpinä ominaisuuksina ovat:

- reservin aktivointiaika ja aktivointikyky eli viive, jolla reservi saadaan käyttöön
- säätökyvyn ylläpitoaika, eli aika, jonka kohde pystyy ylläpitämään säätöä

Lisäksi kohteella tulee olla riittävät tiedonsiirtovalmiudet koskien esim. reaaliaikaista tiedonsiirtoa ja valvomotoimintaa. Tiedonsiirto reservikohteen ja Fingridin kantaverkkokeskuksen välillä käydään SCADA-järjestelmän kautta. SCADA-järjestelmää käytetään kantaverkon ohjaamiseen ja valvontaan ja se kerää reaaliaikaista tietoa kantaverkkoon liitetyistä sähköasemista, kuluttajista/asiakkaista, reservimarkkinatoimijoilta sekä naapurimaiden kantaverkkoyhtiöiltä. SCADA-järjestelmän avulla hallitaan kantaverkon tasapainoa, mikä tekee järjestelmästä kriittisen osan kantaverkon toimintaa. Järjestelmän kriittisyys asettaa tiedonsiirrolle erityiset vaatimukset, jotka reservimarkkinoille osallistuvan kohteen tulee täyttää. Kyseiset vaatimukset on määritelty Fingridin reaaliaikaisen tiedonvaihdon sovellusohjeessa sekä reservikaupankäynnin ja tiedonvaihto -ohjeessa. Ohjeessa määritellään mm. hyväksytyt tiedonsiirtoprotokollat sekä se mitä tietoja minäkin reservituotteen osalta tulee toimittaa.

Ennen kuin kohde pääsee mukaan säätömarkkinoille, sen soveltuvuus varmennetaan säätökokeilla, jonka jälkeen kohde voidaan tietoliikenneyhteyksin liittää kaupankäyntialustalle sekä muihin tarvittaviin Fingridin järjestelmiin. Lisäksi allekirjoitetaan reservisopimus. Kaupankäynti voidaan aloittaa, kun kaikki edellä kuvatut vaiheet on suoritettu ja kohde on saanut Fingridiltä luvan tarjousten jättämiseen.



### 7.2.3 Reservimarkkinoille pyrkivän yrityksen pohdittavia asioita

Edellä kuvattujen vaatimusten ja tuoteryhmien perusteella on ennen reservimarkkinoille ja kulusjoustoön ryhtymistä hyvä pohtia seuraavia kysymyksiä:

- Millainen kohteen sähkön kulutusprofiili on (kausi-, päivä- ja tuntitasolla)?
  - Onko kulutusprofiili tasainen vai esiintykö siinä paljon vaihtelua?
  - Kohdistuuko kulutus tietyille ajanhetkille?
  - Kuinka ennustettava oma kulutus on?
- Mitkä ulkoiset tai sisäiset tekijät vaikuttavat kulutusprofiiliin?
  - Kuinka riippuvainen tuotanto on näistä tekijöistä ja pystytäänkö näihin tekijöihin vaikuttamaan?
- Miten laitoksen tuotantoprofiili soveltuu nopeisiin tehon muutoksiin?
  - Kuinka säädettävä esim. tuotantolaitteisto on? Reagointinopeus?
- Miten tehon muutokset vaikuttavat tuotantomääriin, tuotantotavoitteisiin ja kustannustehokkuuteen?
  - Mitä hävitään omassa tuotannossa vs. mitä saadaan tuotoksi reservimarkkinoilta?
- Mihin suuntaan tehon säätöä olisi järkevä tehdä (tehon lisäys vai pudotus)?
  - Kuluttajan näkökulmasta: nostetaanko kapasiteettia, kun verkossa on ylituotantoa vai ajetaanko kulutus alas kun sähköstä on pulaa?
  - Tuottajan näkökulmasta: voidaanko omaa tuotantoa ajaa alas ylituotantotilanteessa (sähkön hinta alhaalla) vs. tuotannon ylösnosto kun sähköstä pulaa (sähkön hinta ylhäällä)
- Onko kannattavampaa osallistua ylläpito vai häiriöreserviin?
  - Häiriöreservi edellyttää osallistumista vain, kun verkon taajuus nousee/laskee tietyille tasolle. Edellyttää kuitenkin jatkuvaa valmiutta.

### 8.1 Peab – materiaalivaraston lämmitysjärjestelmän sähköistäminen

---

Peab- konserni on Pohjoismainen suuri rakennusyhtiö, jonka tarjonta on laaja, käsittäen mm. asuntojen, toimitilojen ja infrastruktuurin rakentamista ja korjaamista, teiden päällystämistä, kiviaineksen ja betonin tuottamista sekä torninostureiden toimittamista.

#### 8.1.1 **Tavoite**

Peabin materiaalivarastossa edellytetään tietyn lämpötilatason jatkuvaa ylläpitoa. Tällä hetkellä lämpö tuotetaan kaasukattilalla automaatio-ohjattuun lämmitysjärjestelmään, jossa lämmönsiirtonesteenä toimii kuumaöljy. Tavoitteena on selvittää seuraavia vaihtoehtoja kaasun korvaamiseksi.

- Kuumaöljylämmityksen tuottaminen sähkökattilalla
- Kuumaöljyn korvaaminen höyryllä, sähkötoiminen höyrykattila

Nykyisen kattilan toimintaa ja lämmityspiirin tehontarvetta arvioitiin kenttämittauksin. Kenttämittauksissa nykyisen kattilan lämmöntuotannon hyötysuhteeksi määritettiin n. 80 %.

#### 8.1.2 **Vaihtoehto 1: uuden kuumaöljysähkökattilan hankinta**

Sähkölämmitteinen kuumaöljykattila hankittaisiin konttiratkaisuna nykyisen kattilakontin rinnalle. Uusi kattila kytkettäisiin rinnan olemassa olevan lämmitysjärjestelmän kanssa. Kattilan mitoituksessa on huomioitava koko verkoston todellinen jäähtymä ja tehontarve.

- Hyötysuhteella n. 97 % on mahdollista pienentää tarvittavan lämmitysenergian määrää noin 18 %.
- Voidaan hyödyntää olemassa olevaa kuumaöljyn lämmönsiirtojärjestelmää.
- Investointikustannus, sähkökattilakonttikokonaisuuden kustannustaso on noin 1 milj. €.
- Sähköliittymän koko ja mahdollinen tarve liittymän suurentamiseen tarkistettava.

#### 8.1.3 **Vaihtoehto 2: kuumaöljyn korvaaminen höyryllä, sähkötoiminen höyrykattila**

Väliaineena käytetty kuumaöljy korvattaisiin höyryllä, mikä tarkoittaa sitä, että lämmöntuotannon lisäksi olisi uusittava myös lämmönsiirtoverkosto. Höyryntuotanto sijoitettaisiin omaan konttiin, joten sijoituspaikka ja siirtomatkat ovat eri vaihtoehtoilla samat. Höyryjärjestelmän mukanaan tuomat seikat, jotka tulee huomioida ennen järjestelmän uusintaa suunnitteluvaiheessa:

- Ensiö- ja toisiopuolen lämpötilatasot.
- Höyryjärjestelmältä vaadittava painetaso nousee korkeaksi.

Järjestelmältä vaadittavien toimintaolosuhteiden vaativuuden kasvaessa on vaaditun tekniikan vaikutus järjestelmän kustannustasoon merkittävä.

Käytännössä höyryjärjestelmä toisi kohteeseen niin paljon teknisiä muutoksia, että se on käytännön syistä poissuljettu vaihtoehto. Suora sähkötoiminen kuumaöljykattila on teknillisesti yksinkertaisempi toteuttaa, sekä vaatii pienemmän investoinnin.

## 8.2 Canatu -prosessilämmöntalteenottopotentialin selvittäminen

---

### 8.2.1 Tavoite

Canatu Oy valmistaa hiilinanoputkia erittäin korkealämpöisillä reaktoreilla. Tavoitteena oli selvittää mahdollisuus prosessilämmön talteenottoon pienistä sähkölämmitteisistä reaktoreista ja lämmön hyödyntäminen lämmityksessä, tai takaisinmyynti kaukolämpöyhtiölle.

### 8.2.2 Tilojen lämmitys, jäähdytys ja ilmanvaihto

Kiinteistön kaukolämmönvaihtimet palvelevat myös muita kiinteistössä toimivia vuokralaisia, lämmönjakautumista eri toimijoille ei mitata. Canatun laskennallinen osuus lämmön vuosikulutuksesta on noin 20 % kokonaismäärästä.

Sähkötoimisten reaktoreiden sähkötehot ovat pienehköjä. Kolmelta reaktorilta lämpö johdetaan ulos erillispoistoilla, muilta lämpö siirtyy sisätilaan, josta se poistetaan ilmanvaihdon jäähdytysverkostolla. Tuotannon ilmanjäähdytystä palvelee kaksi (2) vedenjäähdytyskoneetta, joissa on molemmissa talviaikainen vapaajäähdytys, jonka rajalämpötila on +5 °C.

Lämpöä kuluttavia laitteita ovat kaksi ilmanvaihtokonetta, molemmat on varustettu lämmöntalteenottokiekoilla. Tulo- ja poistoilmamäärät ovat koneilla epäsuhtaiset, mikä hiukan pienentää lämmöntalteenoton tehoa. Tuloilmaa on enemmän kuin poistoilmaa, koska tuotantotilat pidetään tarkoituksella ylipaineisina ympäröiviin tiloihin nähden. Molempien ilmanvaihtokoneiden perässä on omat tuotannon kosteus- ja lämpötilaolosuhdetta säätävät kiertoilmakoneet. Ilmankuivaimia on neljä.

### 8.2.3 Mittaukset

Kohteessa mitattiin reaktoreiden poistokanavien kautta poistuva lämpömäärä. Lisäksi mitattiin vedenjäähdytyskoneiden sekä muutaman erikokoisen yksittäisen reaktorin sähkönkulutusta. Nestejäähdyttimien kautta poistuu lämpöä noin 250 kW:n teholla ja erillispoistoista noin 20 kW:n teholla.

### 8.2.4 Jatkomietintää

Nykyiset tehomäärät ovat liian pieniä kaukolämpöyhtiölle myytäväksi. Mikäli uusien reaktorien lämmön kanavointi ulos pystyttäisiin toteuttamaan keskitetympin, niiden lämpöjen hyödyntäminen olisi teknisesti helpompaa.

Jos tehdas kasvaa ja jäähdytyslämmön tehomäärä nousee 1 MW:n kokoluokkaan, paranee mahdollisuus kaukolämmön takaisinmyyntiin. Siitä on kuitenkin neuvoteltava erikseen kaukolämpöyhtiön kanssa.

Kaukolämmön kulutuksesta ei nyt makseta kulutuksen mukaan, hinnoittelutapaa tulisi muuttaa, jotta lämpöä säästävät investoinnit saadaan kannattaviksi. Kun nykyiset kylmäkoneet noin 10 vuoden kuluttua ovat uusintaiässä ne voisi uusia lämpöpumpputjärjestelmäksi, jolloin jäähdytyslämpöä saataisiin hyödynnettyä kiinteistön omaan käyttöön.

### 8.3 Purso – prosessilämmöntalteenottopotentialin selvittäminen

---

Purso suunnittelee ja valmistaa alumiinituotteita ja -järjestelmiä, mm teollisuuteen, rakennusten julkisivuihin ja valaistukseen.

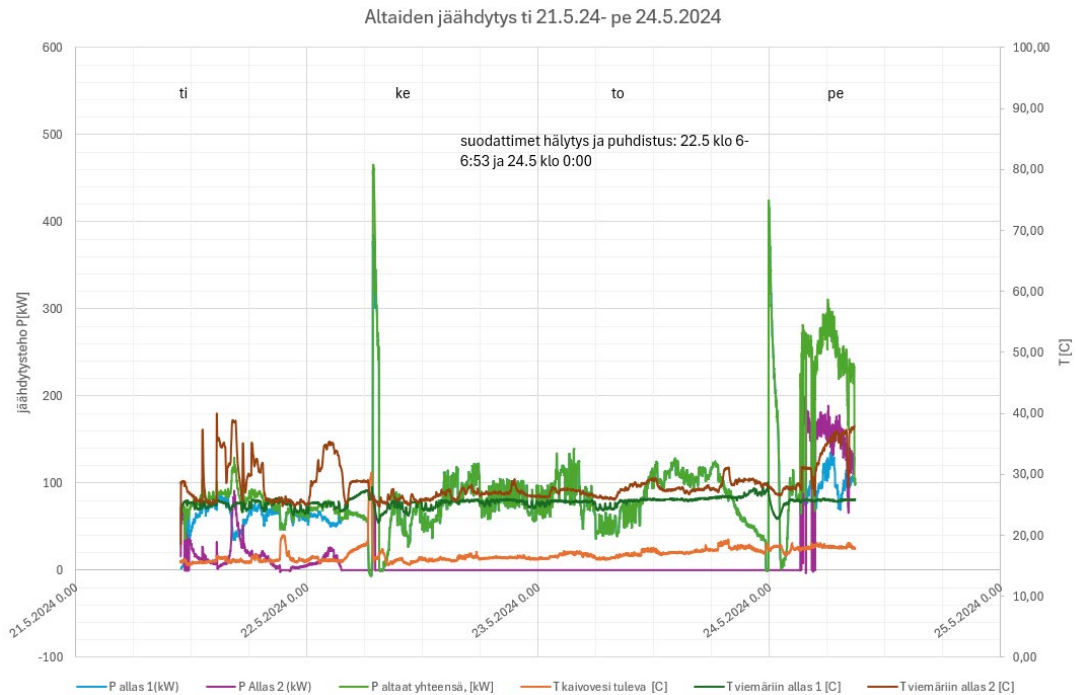
#### 8.3.1 Tavoite

Tavoitteena on selvittää tuotannon jäähdytyksen lämmöntalteenoton potentiaalia, sekä jäähdytyslämmön hyödyntämistä toisessa tuotantoprosessissa, joka kuluttaa lämpöä myös kesällä.

Prosessijäähdytyksestä saatavan jäähdytyslämmön lämpötilatasoa tulisi nostaa lämpöpumpulla, jotta sitä voidaan hyväksikäyttää muualla, joko toisen prosessin lämmityksessä tai kiinteistön lämmityksessä.

Kohteessa on aluelämpöverkosto, jota kutsutaan tässä kaukolämmöksi. Lämpö tuotetaan 2,5 MW:n kiinteän polttoaineen biokattilalla. Kaksi vanhaa öljykattilaa ovat varalla. Lämpötilataso verkostossa on melko korkea 115 °C /80°C. Menolämpötila määräytyy prosessien lämpötilan vaatimuksien mukaan. Tuotannon toisiopuolen lämpötilatasot vaihtelevat 85 °C–95 °C. Kaukolämpöä jaetaan tuotannon puolella kolmeen eri suuntaan.

Jäähdytysenergiamäärät vaihtelevat mittauksien perusteella tuotannon mukaan. Mittaukset on suoritettu kaivoveden puolelta, jolloin koko jäähdytystehon kulutus saatiin yhden mittauksen perään.



**Kuva 19 Jäähdytysaltaiden jäähdytystehon kuvaaja**

Jäähdytyksen energiamäärä vaihtelee 100–350 kW, teho riippuu siitä mitä tuotannossa tehdään. Tuotannosta riippuvan pätkittäisen lämmöntalteenoton takia lisälämpöä olisi hyvä saada kerättyä muistakin lähteistä yhteiseen säiliöön, jotta lämpöpumpulle saadaan mahdollisimman paljon käyntitunteja täydellä teholla.

Tässä yhteydessä voitaisiin hyödyntää viereistä vesistöä, josta tulee jo valmiiksi jäähdytysallastilaan linja rantapumppaamolta. Talvella lämpöpumppu voisi tuottaa matalampaa lämpötilatasoa kiinteistön tilalämmitykseen, jolloin sille saadaan parempi COP myös talviaikaan. Kesällä lämpöpumppu voisi tuottaa korkeampaa menoveden lämpötilaa prosessien tarpeisiin. Loppu lämmöstä tehtäisiin esimerkiksi sähkökattilalla.

Kohteena olevan prosessin lämpötehonto on normaalitilanteessa 300–500 kW, yksittäiset huiput ovat korkeampia. Lämmityksen kiertovesi on viikonloppuisinkin peruslämmössä.



**Kuva 20** Prosessin lämmitystehon kuvaaja

Kuvaajasta huomataan että mikäli lämpöpumpulla saataisiin valmistettua 80 °C vettä sitä tulisi vielä priimata sähkökattilalla. Ongelmana kohteessa on lämpöä kuluttavan tuotannon pieni jäähdytymä. Prosessi tulisi käydä vielä yksityiskohtaisemmin läpi, jotta voitaisiin löytää vaihtoehtoja tuotantoprosessin paluulämpötilan madaltamiseksi. Vaihtoehtoisesti lämpöpumpulla on valmistettava vielä kuumempaa yli 90 °C vettä, jolloin lämpöpumpun COP laskee.

### 8.3.2 Jatkoimenpiteet

Nykyisellä dokumentaatiomäärällä investointikustannusta on hankalaa arvioida. Kohdeprosessin sisäinen toiminta on selvitettävä tarkemmin, lisäksi lämpöverkosto tulisi kartoittaa ja piirtää kokonaisuutena, jotta putkistot komponentteineen saadaan mitoitettua uudelleen. Uudessa tilanteessa lämmönlähteitä tulisi useita ja ne sijaitsevat eri kohdissa verkostoa. Toisiopuolen lämmönkuluttajien tehot ja lämpötilatasot tulee selvittää, jotta saadaan selville, riittäisivätkö laitteiden tehot matalammille lämpötiloille. Lämpimän käyttöveden tuotanto ratkaistava uudelleen. Järjestelmän automaatio- ja säätö suunniteltava huolella.

Kustannustason tarkentaminen vaatii esisuunnittelua. Kohteeseen periaatteessa soveltuvat sekä synteettisellä kylmäaineella että ammoniakilla toimivat lämpöpumppuratkaisut.

## 8.4 Metsä Board – hukkalämpöjen hyödyntäminen Simpeleen kartonkitehtaalla

---

### 8.4.1 Metsä Board Simpele

Metsä Board Simpeleen kartonkitehdas tuottaa kevyttä taivekartonkia esimerkiksi elintarvikkeita ja lääkepakkauksia varten. Tehtaalla on yksi kartonkikone, jonka tuotantokapasiteetti on 300 000 t/a. (Metsä Group, 2024)

Kartongin- ja paperinvalmistus ovat hyvin energiaintensiivisiä prosesseja, joissa suurin osa energiasta kuluu veden haihduttamiseen radalla kulkevasta kartonki- tai paperimassasta. Lämmönsiirto tapahtuu rataa pyörittävien sylindereiden kautta, joissa koneesta ja koneen osasta riippuen lauhtuu vesihöyryä eri painetasoilla muutamasta baarista pariin kymmeneen baariin.

Simpeleen tehtaalla höyry tuotetaan pääosin kattilalla K6, joka on otettu käyttöön vuonna 1976. Alun perin turvepölykattilana toiminut K6 on muutettu vuonna 1997 kuplapetikattilaksi (BFB) uusimalla kattilan alaosalla, mikä mahdollistaa kosteiden kiinteiden polttoaineiden käytön polttoaineena. Muutoksen myötä kattilan pääpolttoaineet ovat metsähake ja kuori (Hanski, 2018).

### 8.4.2 Tavoite

Mittauksilla ja selvityksellä kartoitettiin voimalaitoksen hukkalämpöpotentiaaleja ja hyödyntämismahdollisuuksia. Metsä Boardin tavoitteena Simpeleellä on vähentää tuorehöyryn kulutusta.

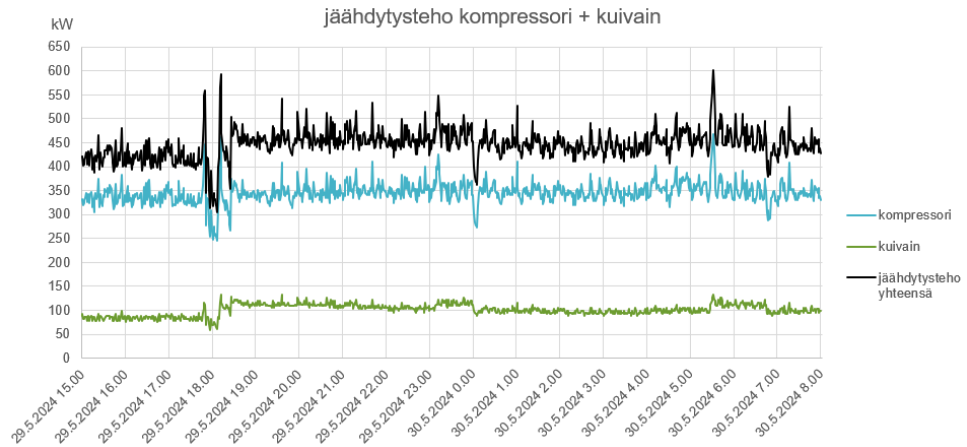
Tämän hankkeen puitteissa mittauksilla tutkittiin ja tunnistettiin seuraavia voimalaitoksen hukkalämmönlähteitä:

- paineilmakompressori, ulospuhalluslauhde ja kattilan pohjatuhkaruuvit 2 kpl
- savukaasut (ekonomaiserin tilanne).

Tehtaalla on käynnissä vedenvähennysprojekti, jonka myötä ulospuhallusvedet ja kompressorin jäähdytysvedet jäävät jatkossa ylimääräisiksi, kun vesien nykyinen hyödyntämiskohde jää pois käytöstä.

### 8.4.3 Voimalaitoksen hukkalämmöt

Voimalaitoksen hukkalämmöistä hyödyntämispotentiaalia on paineilmakompressorin ja -kuivaimen jäähdytyksessä syntyvässä lämmössä. Kompressori-kuivainyhdistelmä tuotti mittausjakson aikana jäähdytyslämpöä keskimäärin 450 kW, käyntiasteen ollessa keskimäärin 70 %. Kompressorin ja kuivaimen lämpötilat ja jäähdytystehot mittausjaksolta näkyvät kuvassa

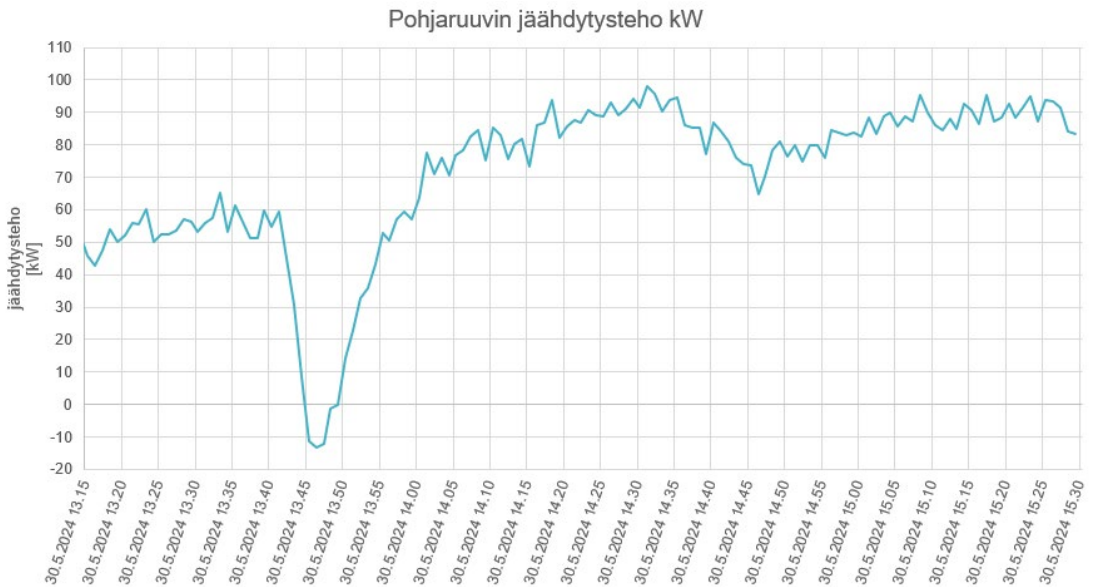


**Kuva 21 Paineilmakompressorin jäähdytysteho**

Lämpötilatasojen notkahdus johtuu kartonkikoneen seisokista, jonka aikana voimalaitoksen apu-lauhdutin lämmitti raakavesiallasta, josta kompressori ottaa jäähdytysvetensä.

Pohjatuhkaruuvien jäähdytys

Pohjatuhkaa siirtävien ruuvien jäähdytystehot näkyvät kuvassa 22. Normaalin käynnin aikana ruu-veja jäähdytettiin yhteensä n. 100–120 kW teholla.



**Kuva 22 Kattilan pohjaruuvien jäähdytysteho**



#### 8.4.4 Kattilan ulospuhalluslauhde

Kattilan ulospuhalluslauhteen virtaus viemäriin on noin 1,6 l/s ja sen lämpötilataso on noin 75–80 °C. LTO potentiaali on tällöin noin 360–400 kW, jos ulospuhalluslauhteesta otettaisiin lämpöä talteen jäädyttämällä lauhde 80°C → 20°C, jonka jälkeen lauhde laskettaisiin viemäriin.

Normaalissa tuotantotilanteessa kesäaikana voimalaitokselta olisi saatavissa summana edellä kerättyistä lämmönlähteistä (paineilman jäädytys, pohjaruuvien jäädytys, lauhde) noin 1000 kW:n hukkalämpöteho. Enimmillään hukkalämpöteho olisi noin 1200–1300 kW:n suuruusluokkaa.

#### 8.4.5 Savukaasut

Savukaasujen keskilämpötila on noin 156 °C. Aiemmin tehtaalla olleen ekonomaiserin haasteena oli kestävyys. Pattereiden elinikä on ollut lyhyt ja tällä hetkellä ekonomaiserin on ollut pois käytöstä. Ekonomaiserista saatavalla lämmöllä voitaisiin lämmittää lisävettä tai tuottaa kaukolämpöä olemassa olevalla tekniikalla.

Savukaasujen hyödyntämispotentiaalia tarkasteltiin tuotevalmistajan kanssa, savukaasun lämpötilahyöty laskettiin 35 °C lämpötilan laskulla. Vanhan tiilipiipun vuoksi savukaasun loppulämpötilan on oltava vähintään 130 °C. Laskelmien mukaan savukaasuista saisi jatkuvaa LTO-tehoa kaukolämpöön noin 1,6 MW.

#### 8.4.6 Hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämmön tuotannossa lämpöpumpulla

Hukkalämpöjen hyödyntäminen kaukolämmön tuotannossa vähentää suoraan höyryn kulutusta. Tällä hetkellä kaukolämpö tuotetaan höyrylämmönvaihtimilla. Lämpöpumppua ei kannata mitoitaa tekemään korkeampaa lämpötilaa kuin kaukolämpöverkon alin menolämpötila, sillä sitä voidaan lisäksi priimata höyryllä korkeammalle lämpötilatasolle. Näin lämpöpumppumitoitus saadaan mahdollisimman edulliseksi ja energiatehokkaaksi. Kaukolämmön menolämpötilan asetusarvo on 80 °C, kun ulkolämpötila on plussan puolella, joten tätä arvoa on käytetty lämpöpumpun hyötysuhteen ja tehon määrittämisessä.

Kaukolämmön paluulämpötila oli tarkasteluhetkellä kesällä reilu 50 °C ulkolämpötilan ollessa 24°C. Näin korkealla paluulämpötilalla hiilidioksidilämpöpumppu ei ole realistinen vaihtoehto. Lämpöpumpputarkastelu tehtiin ammoniakilla (R717), R1234ze:llä ja R515B:llä.

Mitoitus 80 °C menolämpötilalle mahdollistaa ruuvikompressorien käytön. Ruuvikompressoreilla toimivat lämpöpumput ovat yleisesti hieman halvempia lämpöpumpun tehoon (€/kW) nähden, kuin mäntäkompressorit mutta menolämpötila rajoittuu noin 80 °C tasolle. Ruuvikompressorien puristuksen hyötysuhde on hieman huonompi kuin mäntäkompressoreilla, minkä vuoksi ruuvikompressoreilla toimivien lämpöpumppujen COP-arvot ovat huonompia samoilla LTO:n ja kaukolämmön meno- ja paluulämpötiloilla.

Alle taulukkoon 3 on koottu eri kylmäaineilla toimivien lämpöpumppujen suoritusarvot sekä mäntä- että ruuvikompressoreilla, kun kaukolämmön paluu- ja menolämpötilat ovat 50/80°C ja LTO:n paluu- ja menolämpötilat ovat 30/20°C. R1234ze:n ja R515B:n suoritusarvot on laskettu

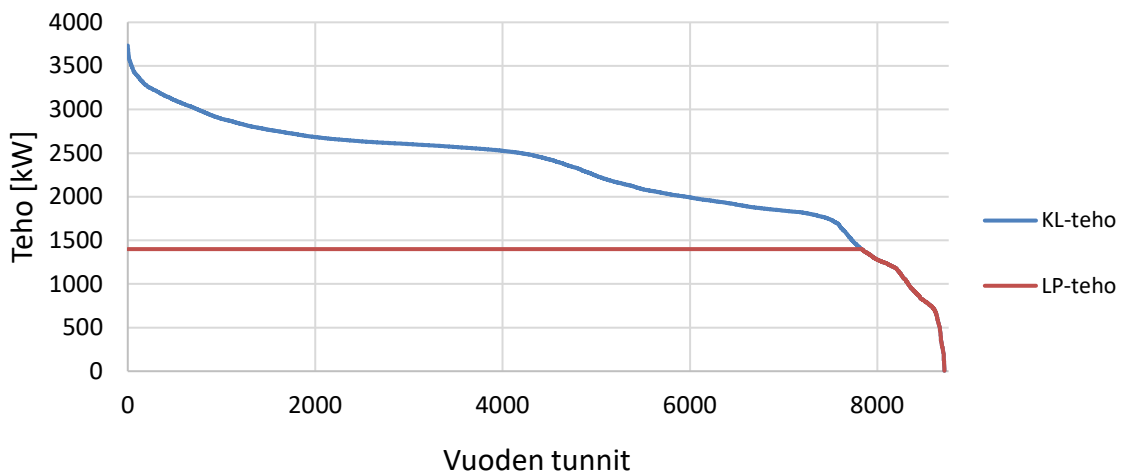
Oilon Selection Tool -mitoitusohjelmalla (Oilon Technology Oy, 2023) ja ammoniakkin suoritusarvot CoolProp -aineominaisuuskirjaston (Bell et al., 2014) avulla ja GEA RTSelect softwarella (GEA Group, 2024).

**Taulukko 6 Eri lämpöpumpputekniikoiden suoritusarvot kohteen lämmöntalteenottopotentiaalini ja kaukolämmön lämpötilatasoilla.**

Kylmäaine	GWP	COP mäntä	COP ruuvi
Ammoniakki (R717)	0	4,30	3,80
R1234ze	7	3,70	3,43
R515B	299	3,50	3,45

Kuvassa 23 näkyy kaukolämmön ja lämpöteholtaan 1400 kW tehoisen lämpöpumpun pysyvyyskäyrät Simpeleen vuoden 2023 kaukolämmön tuotannolle. Laskelman perusteella lämpöpumpun huipunkäyttöaika olisi 8465 tuntia, ja lämpöpumppu kävisi täydellä teholla noin 7800 tuntia. Kun lämpöpumpulle otetaan huomioon vuosittaiset huollot, niin huipunkäyttöajaksi voidaan arvioida karkeasti 8000–8200 tuntia vuodessa, mikä on sekin erittäin suuri lukema. Lämpöpumpulla saataisiin katettua noin 85 % kaukolämmön vuosituotannosta.

**Kaukolämmön ja lämpöpumpun pysyvyyskäyrät**



**Kuva 23 Kaukolämmön ja lämpöpumpun pysyvyyskäyrät**

#### 8.4.7 Yhteenveto ja yleistä pohdintaa

Simpeleen kartonkitehtaalla hukkalämmönlähteitä tunnistettiin sekä voimalaitokselta että kartonkikoneen puolelta. Tässä työssä käydään lävitse voimalaitoksen tilannetta.

Voimalaitokselta tunnistettujen hukkalämpöjen teho on normaalissa tuotantotilanteessa noin 1000 kW. Voimalaitoksen hukkalämmöt olisivat helpoiten hyödynnettävissä kaukolämmön tuotannossa lyhyiden putkimatkojen ja keskenään samaa kokoluokkaa olevien tehojen ansiosta. Lämpöpumpulla saisi hyödynnettyä voimalaitoksen hukkalämpökohteet suurimmaksi osaksi kaukolämpöverkkoon, mikä tarkoittaa erittäin suurta huipunkäyttöaikaa ja mahdollisimman lyhyttä takaisinmaksuaikaa lämpöpumpuinvestoinnille.

## 8.5 Boliden – haihdutusprosessin sähköistäminen Harjavallan tehtaalla

---

### 8.5.1 Boliden Harjavalta

Boliden Harjavallan tehtaiden päätuotteet ovat kupari ja nikkeli. Lisäksi tehdas valmistaa sivutuotteena rikkihappoa ja pienempiä määriä kultaa ja hopeaa. Harjavallan sulatolla kierrätysmetalleista ja kaivoksilta tulevista rikasteista jalostetaan kuparikatodeja, eli lähes puhtaita kuparilevyjä sekä nikkelikiveä, jonka nikkeliipitoisuus on noin 50 %. (Boliden Group, 2024)

Metallien jalostus sulatolla vaatii paljon energiaa korkeissa lämpötiloissa niin liekkisulatuksessa kuin rikkihapon valmistuksessa. Tehdasalueen höyryn tuoton hoitaa STEP Oy.

### 8.5.2 Tavoite

Työn tavoitteena oli selvittää raskaaseen polttoöljyyn perustuvan rikkihapon haihdutusprosessin sähköistäminen, sekä muut mahdolliset lämmitysvaihtoehdot.

Harjavallan tehtaalla ei tehty mittauksia prosessin rajujen olosuhteiden vuoksi, mutta prosessiarvoja saatiin tehtaan automaatiojärjestelmästä. Prosessi on jatkuvatoiminen. Tällä hetkellä rikkihappo kuumennetaan väkevöintilämpötilaan 800 °C asteeseen lämmitettävällä ilmalla. Ilma syötetään tuotteen sekaan suutinputkistolla, joka uusitaan muutaman kuukauden välein. Lisäongelman prosessille tuottaa rikkihapon sisältämä arseeni, joka kiteytyy liian kuumille lämmönsiirtopinoille ja putkistoihin. Kiteytyminen on riippuvainen sekä rikkihapon lämpötilasta, että konsentraatiosta. Koska reaktio on jatkuvatoiminen ja reaktoria viilennetään syötettävällä hapolla, on reaktion mallintaminen vaikeaa.

Mikäli raskaan polttoöljyn kulutusta saataisiin vähennettyä, mm savukaasuhäviöiden ja öljyn hajottamiseen tarvittavan höyryn kulutuksesta, on säästöpotentiaali kokoluokkaa 1300–1400 MWh/a.

### 8.5.3 Tunnistetut lämmitysvaihtoehdot

Kohteeseen tunnistettiin vaihtoehtoisia lämmitys-/prosessiparannustapoja:

1. reaktorin vaipan lämmitys kuumaöljyllä
2. kuumaöljylämmitys sisäpuolinen kierto ja PTFE pinnoitusratkaisut kiertoputkistoihin
3. ilmamäärän lisääminen ja lämpötilan pienentäminen -> enemmän vaihtoehtoja

4. lämmönsiirratkaisut
5. sähkövastukset.

Lisäksi todettiin että Boliden Harjavallan tehtaalla olisi runsaasti hukkalämpövirtoja 70–90°C lämpötilatasoissa. Hukkalämpövirtojen lämpötilataso ei riitä suoraan tarkastellun prosessin lämmitykseen, mutta ne voivat olla osa ratkaisua.

#### **Kuumaöljytoiminen sähkökattila**

Kuumaöljyratkaisut vaatisivat pientä koelaitteistoa ja testaamista. Pinnoitusratkaisuja vaikeuttaa eri lämpötila rikkihapossa ja sen yläpuolisessa ilmassa, koska kuuma ilma polttaa PTFE päällysteen.

#### **Ilmamäärän lisääminen**

Lisäämällä ilmamäärää saadaan siirrettyä suurempi lämpömäärä matalammassa lämpötilatasossa. Rajoitteeksi nousee reaktorin läpi kulkevan ilman jälkikäsitteilykapasiteetti. Ilmamäärän lisääminen ei ole yksinään realistinen vaihtoehto, mutta voi olla osa ratkaisua.

#### **Höyrylämmönsiirratkaisut**

Höyrylämmönsiirratkaisussa nousevat esille materiaalin keston liittyvät ongelmat sekä arseenin kiteytymiseen liittyvät ongelmat. Levylämmönsiirtimen levyt vaatisivat vuosittaisen uusinnan, mikä sinänsä on mahdollista. Isompi ongelma on painetaso höyrypuolella 200 °C/20 bar tuottaisi korkeapaineisen järjestelmän. Nykyinen järjestelmä on yksinkertainen tähän verrattuna.

#### **Suora sähköistys**

Yksinkertaisin vaihtoehto on lämmittää reaktoriin puhallettavaa ilmaa kanavalämmittimillä, joissa on sähkövastukset. Prosessi pysyisi pitkälti ennallaan, mutta nykyisistä ongelmista ei päästäisi kokonaan eroon.

Sähkövastuksilla ilman lämmittäminen 600 °C asteeseen on realistisempi vaihtoehto kuin lämmittäminen 800 °C lämpötilaan. Matalammassa lämpötilassa vastuksen elinikä pitenee ja sen ohjaus on helpompaa. Tuloilma on suodatettava, jotta estetään ilman epäpuhtauksien kiinnipalaminen vastuksiin.

Puhallin ja suutinratkaisu tarvitaan edelleen kuten nykyisessä ratkaisussa on. Lämpötilan laskun vaikutusta nykyisen reaktorin toimintaan olisi hyvä testata.

Tuloilmaa voitaisiin esilämmittää esimerkiksi 70 °C asteen verran, vesikiertojen hukkalämmöillä. Tällöin katettaisiin noin 10–15 % ilman lämmityksen kuluttamasta energiasta.

#### **Rikkihapon esilämmitys hukkalämmöillä**

Tähän voisi hyödyntää tehdasalueen vesikiertoisia hukkalämpöjä, joita on tarjolla 70–90 °C lämpötilassa.

Esilämmitys voidaan toteuttaa lämmönsiirtimellä tai eristämällä ja lämmittämällä prosessivaiheiden välistä säiliötä. Rikkihapon esilämmitys pienentäisi arseenin kiteytymisriskiä ja vähentäisi reaktorin lämmönkulutusta. Välisäiliön esilämmitykseen voisi mahdollisesti käyttää myös kaukolämmön paluuvettä, mutta se vaatii sopimisen Stepin kanssa.

#### 8.5.4 **Koko tehdasalueen ratkaisuvaihtoehto yleisesti**

Tehtaan lämpimistä hukkalämpövesistä voisi jalostaa höyryä alipaineessa höyrykompressorilla (MVR, engl. Mechanical Vapour Recompression) tai lämpöpumpun ja höyrykompressorin yhdistelmällä. Tämä vaatisi laajempaa kokonaisuus tarkastelua.

Korkeiden lämpötilojen tuottaminen onnistuu tulevaisuudessa sähköllä tämänhetkisen teknologisen kehityksen perusteella. Polttoon perustuvasta prosessien lämmöntuotannosta luopuminen on merkittävä asia hiilidioksidipäästöjen ja energiansäästöjen kannalta, sillä teollisuusprosessit kuluttavat paljon energiaa.

### 9.1 Sähkökattilat yhteenveto

---

Teollisuusyrityksen kannalta on oleellista selvittää, minkä tehoista sähkökattilaa kohteessa tarvitaan ja toisaalta minkälainen sähköverkkojen jännitetaso kohteessa on käytössä. Vastuskattilat soveltuvat pienempiin teholuokkiin kohteissa, joissa sähköjärjestelmä ja syöttö toimivat pienjännitetasolla. Elektrodikattila sopii suuremmille tehoille ja vaatii keskijännitesyötön. Siirtymätehon raja näiden välillä vaihtelee hiukan kattilavalmistajasta riippuen 5–10 MW kokoluokassa.

Sähkökattilaratkaisun etuna esimerkiksi kiinteän polttoaineen höyrykattilaan verrattuna on suhteellisen yksinkertainen ratkaisu ja mikäli laitosalueen sähköliitännät riittävät, maltillisempi investointikustannus. Sähköistysratkaisujen osalta on aina varmistuttava kohteen sähköverkon ja sähkönjakelun tilanteesta.

### 9.2 Lämpöpumput yhteenveto

---

Lämpöpumppuja on markkinoilla tarjolla monilla eri kylmäaineilla ja kompressoritekniikoilla. Lämpöpumppujen ja kylmäkoneiden kanssa onkin oleellista ymmärtää, että ei ole yhtä universaalia kylmäainetta ja tekniikkaa, joka sopii kaikkiin sovelluskohteisiin. Tämä johtuu eri kylmäaineiden erilaisista käyttöalueista lämpötilojen osalta ja esimerkiksi kompressoritekniikoiden soveltuvuudesta eri tehoalueille. Synteettisten kylmäaineiden kanssa on hyvä muistaa, että sama lämpöpumppumalli ja kompressoritekniikka voi toimia eri kylmäaineilla hyvin erilaisissa toimintapisteissä ja lämpötilatasot sekä hyötysuhteet voivat vaihdella paljon erilaisissa sovelluskohteissa. Lämpöpumppujärjestelmät tulee näistä syistä suunnitella kohdekohtaisesti, jotta järjestelmästä saadaan mahdollisimman toimintavarma sekä energia- ja kustannustehokas.

F-kaasuasetuksen jatkuvasti tiukentuvien rajoitusten ja kieltojen myötä yleinen suuntaus kylmäaineissa on kohti luonnollisia sekä matalan GWP-arvon synteettisiä kylmäaineita. Luonnollisiin kylmäaineisiin, joista yleisimmät ovat ammoniakki, hiilidioksidi, propaani, isobutaani ja isopentaani, ei kohdistu poliittisia riskejä. Niillä jokaisella on omat sopivat sovelluskohteensa ja rajoitteensa, joiden lisäksi suunnittelussa ja käytössä tulee huomioida turvallisuusnäkökohdat, kuten syttyvyys ja myrkyllisyys. Matalan GWP-arvon (alle 150) synteettisiin kylmäaineisiin ei kohdistu rajoituksia F-kaasuasetuksen osalta, mutta mahdollinen PFAS-kielto kohdistaa synteettisiin

kylmäaineisiin oman poliittisen riskinsä, koska se kieltäisi muiden PFAS-kemikaalien ohella tähän laajaan kemikaaliryhmään kuuluvat synteettiset kylmäaineet.

Tällä hetkellä (2024) synteettiset kylmäaineet ovat edelleen mahdollinen vaihtoehto teollisuussovelluksissa, mikäli mietitään hankintaa 10–15 vuoden käyttösyklille. Yleensä ratkaisuun vaikuttaa voimakkaasti lämpöpumppujärjestelmän investointikustannus ja siitä saatava taloudellinen hyöty sekä niistä laskettava järjestelmän takaisinmaksuaika. Mahdollisiin lämpöpumppuvaihtoehtoihin vaikuttaa voimakkaasti se, mistä lämpötilasta lämpöä saadaan kerättyä ja mihin lämpötilaan lämmöntuotannossa halutaan päästä. Sovelluskohteen osalta on oleellista tietää, kuinka tasainen lämmönlähteen teho on ja otetaanko lämpöä talteen esimerkiksi tuotannosta, joka on syklittäistä ja/tai onko lämpöä tarjolla hetkittäin enemmän, kuin sitä pystytään kuluttamaan? Tällöin on mietittävä myös lämmön mahdollista välivarastointia esimerkiksi lämpöakkuun, jolla voidaan tasata tuoton ja kulutuksen eriaikaisuutta, sekä mahdollistaa lämpöpumpulle tasaiset toimintaedellytykset.

Korkeiden lämpötilojen tuottaminen rajoittuu lämpöpumppujen osalta noin 150–160°C lämpötilatasolle. MVR-tekniikalla päästään vielä tätäkin korkeammalle, mutta korkeampien lämpötilojen tuottamisessa on otettava huomioon järjestelmän hyötysuhde ja käytettävissä olevat lämmönlähteet sekä investointikustannus (€/kW), joka kasvaa mitä korkeampia lämpötiloja tuotetaan. Esimerkiksi 20 bar vesihöyry (lauhtuminen/höyrystyminen 212°C) voi olla järkevämpää tuottaa yksinkertaisemmalla ja huomattavasti halvemmalla sähkökattilalla kuin matalalämpötilaisesta lämmönlähteestä lämpöpumpun ja höyrykompressorin yhdistelmällä, jonka COP-arvo höyryntuotannolle on alle 2. Teollisuuden lämmönkulutuksen osalta olisikin alkuun järkevintä tarkastella, kuinka korkeita lämpötiloja ja painetasoja kohteessa tarvitaan ja voiko kohteessa pudottaa höyryverkon painetasoa koko verkossa tai verkon jossain osassa, jos kohteessa olisi potentiaalia MVR-tekniikan hyödyntämiselle?

Kohteen mukaan on mahdollista miettiä myös lämmön myymistä eteenpäin. Tämä vaatii kuitenkin neuvotteluja paikallisen kaukolämpöyhtiön kanssa. Kaukolämmön myyntiin tuottamisessa on huomioitava investoinnit pumpputhinkin ja lämmönsiirtimiin sekä mahdollisesti järjestelmän huonon hyötysuhde, jos kaukolämmön tuotanto ja myynti vaatii vedeltä korkeampaa menolämpötilaa kuin mitä kohteen muut lämmönkulutuskohteet vaativat. Lämmön myynnin kannalta isoin hintaan vaikuttava tekijä on se, että riittääkö lämpöä myytäväksi vain kesäaikaan, kun kaukolämmön kulutus on pientä vai onko sitä tarjolla myös talvella, jolloin sillä on suurempi arvo. Kaukolämpöyhtiön näkökulmasta oleellista on myös lämmöntuotannon tasaisuus tai miten suurilla lämpöakuilla sitä tasataan.

Lämpöpumppujärjestelmän suunnittelun näkökulmasta tärkein asia on hyvät lähtötiedot, jotta järjestelmää lähdetään suunnittelemaan taloudelliseksi todellisen tarpeen mukaiseksi järjestelmäksi. Oleellisia asioita suunnittelussa ovat esimerkiksi hukkalämpöjen sekä lämmön tuotannon ja kulutuksen tehot ja samanaikaisuus, tarvittava varaajakapasiteetti, toimintavarmuus, kahden- ja kolmen vaiheiset riskit ja häiriöt, tehoalueet ja järjestelmän säädettävyydet.

### 9.3 Kulutusjousto ja älyratkaisut yhteenveto

---

Kulutusjousto ja reservimarkkinoille osallistumisen edellytyksinä ovat riittävä tiedonsiirto ja tiedonkeruuvalmius. Sähköä käyttäviä järjestelmiä ja laitteita on kyettävä seuraamaan ja niiden tilasta on voitava kerätä tietoa. Tieto järjestelmien tilasta ja saatavilla olevasta kapasiteetista tulee pystyä varmentamaan kuten myös kriittinen tiedonsiirto järjestelmän ja markkinapaikan liityntärajapinnalla. Kohteen kannalta tärkeää on myös oman kapasiteetin riittävä säätökyky ja reagointiaika.

Teknisten vaatimusten lisäksi ennusteiden hyödyntäminen on tärkeä osa omaa energian käytön tehostamista ja kulutusjouston toteuttamista. Ennusteiden avulla pyritään vastaamaan tulevaisuuden arvioihin siitä, kuinka paljon kohteesta on tehoa saatavilla sekä kuinka pitkäksi aikaa tehoa on tarjolla ja mikä on sillä saatava taloudellinen hyöty.

### 9.4 Mittausten yhteenveto

---

Läpikäydyissä projektikohteissa löytyi erilaisissa muodoissa olevia hukkalämpöjä. Osassa lämpö on tarjolla vetenä, osassa poistoilmana tai savukaasuina.

Kahdessa kohteessa tarkasteltiin polttoaineen vaihtamista pois fossiilisesta suoraan sähkölämmitykseen. Kaksi kohdetta oli selkeitä lämpöpumppukohteita ja kolmas todennäköisesti myös tulevaisuudessa sellainen, kunhan toiminta kasvaa suuremmaksi. Mikäli lämpöä halutaan hyödyntää kaukolämmön suuntaan, tulee sitä olla tarjolla ainakin 1 MW teholuokkaa, lisäksi on neuvoteltava paikallisen kaukolämpöyhtiön kanssa, sillä kaukolämpöyhtiöillä on hyvin erilaisia tarpeita yhtiökohtaisesti.

Oleellista lämpöpumpun toiminnan kannalta on lämpötilatasojen valinta. Kohteissa ei kannata lämpöpumpulla tuottaa kohteen kuuminta mahdollista lämpötilan tarvetta, koska järjestelmä on tällöin suurimman osan käyntiajasta ylimitoitettu. Mitoituksessa pyritään tilanteeseen, että lämpöpumppu saisi mahdollisimman hyvät käyttötunnit, jotta saataisiin mahdollisimman hyvä €/kWh vastine. Tällä on vaikutusta myös järjestelmän hintaan.

Yhdistelmä- eli hybridijärjestelmissä avainasemassa on kokonaisuuden hallinta automaation ja ohjauksen kautta, jotta järjestelmä toimii kuten on suunniteltu. Erityisesti tämä korostuu laajoissa järjestelmissä, joissa lämmönlähteitä ja käyttökohteita on useissa kohdissa laajaa lämpöverkostoa.

Polttoaineenvaihtokohteista toinen oli selkeä sähkökattilakohde ja toiseen löydettiin sähkövastuksilla toteutettavissa oleva ratkaisu. Molemmat sijaitsevat teollisuusalueilla, joissa on riittävä sähkönsyöttö ratkaisujen toteuttamiseen.

Normaalisti isojen sähköistysratkaisujen osalta on aina varmistuttava sähköistämisen edellytyksistä kohteessa, koskien sähköverkon ja sähkönjakelun tilannetta.



Korkean lämpötilan prosessikohteessa pohdittiin vaihtoehtoja myös alhaisemman lämpötilatason hukkalämpöjen osittaiselle hyödyntämiselle. Prosessin vaatima lämmitys 600–800 °C todettiin mahdolliseksi toteuttaa resistiivisillä sähkövastuksilla, lisäksi hukkalämpöjen hyödyntämisen osalle tunnistettiin mahdollisuuksia prosessin esilämmitykseen. Lämmitysilman esilämmityksellä todettiin saavutettavan noin 10–15 % säästöpotentiaali kuumen ilman lämmityksessä. Lisäksi mahdollisia hyödyntämiskohteita ovat tuotteen esilämmitys lämmönsiirtimellä tai prosessin väli-vaiheen säiliön lämmitys. Välisäiliön eristys ja ulkoinen lämmitys olisi mahdollista toteuttaa joko lämpimillä vesillä tai vaihtoehtoisesti kaukolämmön paluuedellä.

Kustannusten varmistaminen vaatii kaikissa kohteiden osalta esisuunnittelua ja osissa kohteissa myös vanhojen järjestelmien tietojen tarkempaa selvittämistä, yhteenvetoa ja yhteensovittamista. Vanhoissa tehtaissa järjestelmiä on usein rakennettu eri ajankohtina ja mahdolliset lämpötilamuutokset vaikuttavat usein myös muualle, kuin vain tarkasteltavaan prosessiin. Erityisesti lämmitysjärjestelmät, jotka kattavat myös koko ison tehdaskiinteistön lämmityksen, vaativat usein verkoston toiminnan tarkempaa selvittämistä, jotta verkoston lämpötilan lasku ei aiheuta ongelmia muissa osissa kiinteistöä tai muissa prosesseissa.

Kohteiden investointitarpeet vaihtelivat määrällisesti 100 000–600 000 €, säästöpotentiaalit olivat etenkin jatkuvatoimisten prosessien ja kaukolämmön kulutuksen säästön osalta merkittäviä 10–15 % lämmitysenergian määrästä jopa 80 % kaukolämmöntuottomäärän säästöön. Takaisinmaksuaika riippuu toki hyvin voimakkaasti sähkön ja lämmöntuotannon hintasuhteista, sekä investointikokonaisuudesta. Usein investointi vaatii toteutukseen myös kiinteistön perusjärjestelmien, esimerkiksi rakennusautomaation uusintaa, eikä kaikkea ole aina mahdollista lukea energiansäästöinvestoinniksi vaan kuuluu osaksi kunnossapitoa tai järjestelmien perusparannusta. Rajan määrittäminen energiatehokkuusinvestoinnin ja peruskorjauksen välille ei aina ole suoraviivaista tai helppoa, mutta energiansäästöinvestoinnin kannalta on oleellista, että rakennettavan järjestelmän toimintaa pystytään seuraamaan jatkuvatoimisesti. Järjestelmän rakentaminen on dokumentoitava kunnolla, että muutoksia ja mahdollisia laajennuksia pystytään jatkossakin toteuttamaan. Suurissa kohteissa projekteista tulee usein pitkiä ja järjestelmäuusinnan osuuksia kannattaa jaotella useammille vuosille.

## Lähteet

---

Adven (2020) Finnamyl Oy:n haihdutusjärjestelmä palveluna, <https://adven.com/fi/yhteistyotarinat/finnamyl-oy-n-haihdutusjarjestelma-palveluna/>.

Adven (2024) Kotkamillsin ympäristökuorma pienenee kierrätyksellä, <https://adven.com/fi/yhteistyotarinat/kotkamillsin-ymparistokuorma-pienenee-kierratyksella/>.

Aittomäki, Antero. and Aalto, Esa. (2012) Kylmäteknikka. 4. p. Helsinki: Suomen kylmäyhdistys.

Arpagaus, C. et al. (2018) 'High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials', *Energy (Oxford)*, 152, pp. 985–1010. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.166>.

Bell, I.H. et al. (2014) 'Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp', *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(6), pp. 2498–2508. Saatavilla: <https://doi.org/10.1021/ie4033999>.

Boliden Group (2024) Sulatot Boliden Harjavalta, <https://www.boliden.com/fi/operations/smelters/boliden-harjavalta/>. Saatavilla: <https://www.boliden.com/fi/operations/smelters/boliden-harjavalta/>

Calefa (2020) Hukkalämmön hyödyntämisyjärjestelmä puolittaa Sinituotteen kaukolämpölaskun, <https://calefa.fi/hukkalammon-hyodyntamisjarjestelma-puolittaa-sinituotteen-kaukolampolas-kun/>.

Calefa (2022a) Jäähdytyksen tehostaminen ja hukkalämmön hyödyntäminen, <https://calefa.fi/referenssit/kiilto/>.

Calefa (2022b) Kiilto ja Lempäälän Lämpö aloittavat yhteisen energia-ekosysteemin – päästöt leikkaantuvat merkittävästi, <https://calefa.fi/kiilto-ja-lempaalan-lampo-aloittavat-yhteisen-energiaekosysteemin-paastot-leikkaantuvat-merkittavasti/>.

Calefa (2024) Mäkelä Alu varmistaa tuotantoprosessien jatkuvuuden CalefaCaren avulla, <https://calefa.fi/makela-alu-varmistaa-tuotantoprosessien-jatkuvuuden-calefacaren-avulla/>.

Coolbrook Oy (2024) Industrial Process Heating: Replacing Fossil Fuels with RotoDynamic Heater, <https://coolbrook.com/electrification-solutions/rdh-industrial-process-heating/>. Saatavilla: <https://coolbrook.com/electrification-solutions/rdh-industrial-process-heating/>

ECHA (2023) PFAS restriction proposal, <https://echa.europa.eu/fi/-/echa-publishes-pfas-restriction-proposal>.

Elstor Oy (2024a) 'Elstor lämpövarastot'. Teams, 3.6.2024.

Elstor Oy (2024b) Ratkaisu & Teknologia, <https://elstor.fi/ratkaisu-teknologia/>. Saatavilla: <https://elstor.fi/ratkaisu-teknologia/>

Enertime (2023) HIGH TEMPERATURE & STEAM GENERATING HEAT PUMPS, <https://www.enertime.com/assets/documents/Fiche-PAC-2022.02.10-EN-1676032452.pdf>.

Etelä-Savon Energia Oy (2023) Investoinnit sähkökattilaan ja vetytalouteen mahdollistavat polttamisen vähentämisen lämmöntuotannossa ja vähentävät CO<sub>2</sub>-päästöjä Mikkelissä, <https://ese.fi/fi-fi/article/uutiset/uusi-sahkokattila/1620/>. Saatavilla: <https://ese.fi/fi-fi/article/uutiset/uusi-sahkokattila/1620/>

EUROOPAN PARLAMENTTI (2015) EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON ASETUS (EU) N:o 517/2014, annettu 16 päivänä huhtikuuta 2014, fluoratuista kasvihuonekaasuista ja asetuksen (EY) N:o 842/2006 kumoamisesta. Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517>

EUROOPAN PARLAMENTTI (2024) EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON ASETUS (EU) 2024/573, annettu 7 päivänä helmikuuta 2024, fluoratuista kasvihuonekaasuista, direktiivin (EU) 2019/1937 muuttamisesta ja asetuksen (EU) N:o 517/2014 kumoamisesta. Saatavilla: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=OJ:L\\_202400573](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202400573)

Faraj, K. et al. (2021) 'A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: Heating and hybrid applications', Journal of Energy Storage, 33, p. 101913. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101913>.

Finess Energy Oy (2024a) 'SÄHKÖ + POLTIN HYBRIDIKATTILA BT-COMBI'. Saatavilla: <https://finess.fi/wp-content/uploads/2024/06/combikattilaesite-finess.pdf>

Finess Energy Oy (2024b) Sähkökattilat ratkaisuna sähkön reservimarkkinoilla. Saatavilla: <https://www.sttinfo.fi/tiedote/70192484/sahkokattilat-ratkaisuna-sahkon-reservimarkkinoilla?publisherId=69820076&lang=fi>

Fingrid Oyj (2023) 'Reservituotteet ja reservien markkinapaikat', 26 September. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-reservien-markkinapaikat.pdf>

Fingrid Oyj (2024a) 'Reserveistä ja reservimarkkinoista'. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservien-perusteet.pdf>

Fingrid Oyj (2024b) Reservimarkkinat. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/#reservilajit>

Fortum Oyj (2024) Vermon ainut-laatuinen ilma-vesiläm-pö-pump-pu-laitos lisää puhtaan kauko-lämmön osuutta, <https://www.fortum.fi/yrityksille-ja-yhteisolle/lammitys-ja-jaahdytys/kaukolampo/espoo-clean-heat/vermo>. Saatavilla: <https://www.fortum.fi/yrityksille-ja-yhteisolle/lammitys-ja-jaahdytys/kaukolampo/espoo-clean-heat/vermo>

GEA Group (2024) 'GEA RTSelect software'. GEA Group Aktiengesellschaft. Saatavilla: <https://www.gea.com/en/campaigns/rtselect/>

Hanski, T. (2018) METSÄ BOARD SIMPELE, KATTILA K6 AJETTAVUUS JA PÄÄSTÖJEN HALLINTA. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Saatavilla: [https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/153120/DI-ty%F6\\_Hanski\\_Tuomas.pdf;jsessionid=D1000CDBF86078EB-BADB22D95B4D3EF3?sequence=1](https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/153120/DI-ty%F6_Hanski_Tuomas.pdf;jsessionid=D1000CDBF86078EB-BADB22D95B4D3EF3?sequence=1)

Helen Oy (2021) Mustikkamaan jättimäiset lämpöluolat ovat nyt täynnä vettä, <https://www.helen.fi/uutiset/2021/ilmastoteko-jalkojemme-alla-mustikkamaan-j%C3%A4ttim%C3%A4iset-l%C3%A4mp%C3%B6luolat-ovat-nyt-t%C3%A4ynn%C3%A4-vett%C3%A4>. Saatavilla: <https://www.helen.fi/uutiset/2021/ilmastoteko-jalkojemme-alla-mustikkamaan-j%C3%A4ttim%C3%A4iset-l%C3%A4mp%C3%B6luolat-ovat-nyt-t%C3%A4ynn%C3%A4-vett%C3%A4>

MAN Energy Solutiuons (2023a) MAN Energy Solutions to Provide Climate-Neutral District-Heating to Aalborg, <https://www.man-es.com/company/press-releases/press-details/2023/09/28/man-energy-solutions-to-provide-climate-neutral-district-heating-to-aalborg>.

MAN Energy Solutiuons (2023b) 'MAN heat pumps Vapor compression cycle (VCC)'. MAN Energy Solutiuons. Saatavilla: [https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync/man-heat-pumps---vapor-compression-cycle-\(vcc\)-eng.pdf?sfvrsn=ef27de90\\_15](https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync/man-heat-pumps---vapor-compression-cycle-(vcc)-eng.pdf?sfvrsn=ef27de90_15)

MAN Energy Solutiuons (2024a) MAN Energy Solutions to Supply World's Largest Air-to-Water Heat Pump for Helsinki's District Heating, <https://www.man-es.com/company/press-releases/press-details/2024/08/28/man-energy-solutions-to-supply-world-s-largest-air-to-water-heat-pump-for-helsinki-s-district-heating>. Saatavilla: <https://www.man-es.com/company/press-releases/press-details/2024/08/28/man-energy-solutions-to-supply-world-s-largest-air-to-water-heat-pump-for-helsinki-s-district-heating>.

MAN Energy Solutiuons (2024b) 'MAN ETES Electro-thermal energy storage'. MAN Energy Solutiuons. Saatavilla: [https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync/man-etes-eng.pdf?sfvrsn=6ab704bc\\_7](https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync/man-etes-eng.pdf?sfvrsn=6ab704bc_7)

MAN Energy Solutiuons (2024c) 'MAN RG Integrally geared compressors'. MAN Energy Solutiuons. Saatavilla: [https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync/rg-integrally-geared-compressors-eng.pdf?sfvrsn=95a5619\\_8](https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync/rg-integrally-geared-compressors-eng.pdf?sfvrsn=95a5619_8)

MAN Heat pumps for industrial processes (2024). (MAN ExpertTalks). Saatavilla: <https://www.man-es.com/process-industry/campaigns/heat-up-carbon-down>.

Mäntynen, J. (2024) 'CT Industrial esittely, elektrodikattilat'.

Metsä Group (2024) Simpeleen kartonkitechdas, <https://www.metsagroup.com/fi/metsaboard/metsa-board/tuotantoyksikot/simpeleen-kartonkitechdas/>. Saatavilla: <https://www.metsagroup.com/fi/metsaboard/metsa-board/tuotantoyksikot/simpeleen-kartonkitechdas/>

Motiva (2024) 'Sähköistämällä energiatehokkuutta teollisuudessa -Kirjallisuusselvitys'. Motiva Oy. Saatavilla: [https://www.motiva.fi/files/22074/Sahkoistamalla\\_energiatehokkuutta\\_teollisuudessa\\_kirjallisuusselvitys\\_2024.pdf](https://www.motiva.fi/files/22074/Sahkoistamalla_energiatehokkuutta_teollisuudessa_kirjallisuusselvitys_2024.pdf)

Mundra, S.S. and Pardeshi, S.S. (2021) 'Latent heat energy storage system using phase change materials and techniques for their performance improvement: A Review', IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1126(1), p. 012068. Saatavilla: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1126/1/012068>.

Natural Refrigerants (2023) ATMO Europe: GEA Ammonia Heat Pump Produces 120°C Steam for Animal-Feed Processing in Norway, <https://naturalrefrigerants.com/atmo-europe-gea-ammonia-heat-pump-produces-120c-steam-for-animal-feed-processing-in-norway/>. Saatavilla:

<https://naturalrefrigerants.com/atmo-europe-gea-ammonia-heat-pump-produces-120c-steam-for-animal-feed-processing-in-norway/>

Oilon Technology Oy (2023) 'Oilon Selection Tool'. Oilon Technology Oy.

PARAT (2021) 'High Voltage Electrode Boiler - POWER to HEAT for Steam or Hot water'. PARAT Halvorsen AS. Saatavilla: <https://www.parat.no/media/eigabtot/parat-ieh-english-2021.pdf>

Piller Blowers & Compressors GmbH (2024) 'PILLER VAPOFLEX – ENGINEERED-TO-ORDER'. Piller Blowers & Compressors GmbH. Saatavilla: [https://www.piller.de/fileadmin/media/pdf-files/product-sheets/PILLER\\_VapoFlex\\_en.pdf](https://www.piller.de/fileadmin/media/pdf-files/product-sheets/PILLER_VapoFlex_en.pdf)

Polar Night Energy Oy (2024) Technology, <https://polarnightenergy.fi/technology>. Saatavilla: <https://polarnightenergy.fi/technology>

Siponen, T. (2023) 'Uusiutuvalla energialla reservimarkkinoille - 5 vinkkiä asiaa harkitseville', 28 November. Saatavilla: <https://www.syncrontech.com/blogi/uusiutuvalla-energialla-reservimarkkinoille-5-vinkkia-asiaa-harkitseville>

SPH (2024) References, [https://spheat.de/neu/wp-content/uploads/2023/10/4141\\_Flyer\\_EN.pdf](https://spheat.de/neu/wp-content/uploads/2023/10/4141_Flyer_EN.pdf).

Suomen Kylmäyhdistys (2024) 'Fortum kiihdyttää vauhtia kaukolämpöhankkeissa', KylmäExtra, 30 April. Saatavilla: <https://kylmaextra.fi/teemat/fortum-kiihdyttaa-vauhtia-kaukolampohankkeissa/>

Syncron Tech Oy (2023a) Energianhallinta. Saatavilla: <https://www.syncrontech.com/tuotteet/syncpower/energiahallinta?hsCtaTracking=53d33083-feeb-441e-80d4-63b795727023%7C9d76e350-f5d5-4b27-a128-f86ba13a5efa>

Syncron Tech Oy (2023b) Voimalaitoksen energiatehokkuus. Saatavilla: <https://www.syncrontech.com/tuotteet/syncpower-plant>

Tampereen Energia (2023) Miljoonainvestointi vihreään siirtymään – Tampereelle tulee kaksi uutta kaukolämpöä tuottavaa sähkökattilaa, <https://www.tampereenergia.fi/uutiset/miljoonainvestointi-vihreaan-siirtymaan-tampereelle-tulee-kaksi-uutta-kaukolampoa-tuottavaa-sahkokattilaa/>. Saatavilla: <https://www.tampereenergia.fi/uutiset/miljoonainvestointi-vihreaan-siirtymaan-tampereelle-tulee-kaksi-uutta-kaukolampoa-tuottavaa-sahkokattilaa/>

Thapa, S. (2023) Turboden Heat Pumps Deliver Superheated Steam for the Pulp and Paper Industry Using R600a and R601a, <https://hydrocarbons21.com/turboden-heat-pumps-deliver-superheated-steam-for-the-pulp-and-paper-industry-using-r600a-and-r601a/>.

Turboden S.p.A. (2024) Large Heat Pump, <https://www.turboden.com/solutions/2602/large-heat-pump>.

Valio Oy (2024) Valion Seinäjoen tehtaan uusi lämpöpump-pu-jär-jestelmä edistää energian kierrätystä, <https://www.valio.fi/uutiset/valion-seinajoen-tehtaan-uusi-lampopumppujarjestelma-edistaa-energian-kierratysta/>.

Vantaan Energia Oy (2024) Varanto eli lämmön kausivarasto, <https://www.vantaanenergia.fi/energiantuotanto/hiilinegatiivinen/lammonkausivarasto/>. Saatavilla: <https://www.vantaanenergia.fi/energiantuotanto/hiilinegatiivinen/lammonkausivarasto/>

VTT Oy (2024a) Mikä on tekoälyn rooli tulevaisuuden energiajärjestelmissä? Saatavilla: <https://www.vttresearch.com/fi/syvenny-aiheeseen/mika-tekoalyn-rooli-tulevaisuuden-energiajarjestelmissa>

VTT Oy (2024b) Sähkön kulutusjousto: rahanarvoisia mahdollisuuksia kaupallisille toimijoille. Saatavilla: <https://www.vttresearch.com/fi/syvenny-aiheeseen/sahkon-kulutusjousto-rahamarvoisia-mahdollisuuksia-kaupallisille-toimijoille#webform>

Zühlsdorf, B., Neksa, P. and Elmegaard, B. (2024) 4th High-temperature Heat Pump Symposium: Book of Presentations. Kööpenhamina, Tanska: DTU Mechanical Engineering.